

ALBERTO XAVIER PAVIM

**CONTRIBUIÇÕES NA OTIMIZAÇÃO
DE UM SISTEMA DE VISÃO PARA DETECÇÃO,
MEDIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA
DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM**

FLORIANÓPOLIS

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTRIBUIÇÕES NA OTIMIZAÇÃO
DE UM SISTEMA DE VISÃO PARA DETECÇÃO,
MEDIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA
DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ALBERTO XAVIER PAVIM

Florianópolis, Agosto de 2005.

**CONTRIBUIÇÕES NA OTIMIZAÇÃO
DE UM SISTEMA DE VISÃO PARA DETECÇÃO,
MEDIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA
DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM**

Alberto Xavier Pavim

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.
Orientador

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.
Presidente

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr.
Co-orientador

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. Mec.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. Mec.

Prof. Guilherme Bittencourt, Dr. Rer. Nat.

Ainda quando eu falasse todas as línguas dos homens e a língua dos próprios anjos, se eu não tiver caridade, serei como o bronze que soa e um címbalo que retine.

Ainda quando tivesse o dom de profecia, que penetrasse todos os mistérios, e tivesse perfeita ciência de todas as coisas; ainda quando tivesse toda a fé possível, até ao ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, nada sou.

E, quando houvesse distribuído os meus bens para alimentar os pobres e houvesse entregado meu corpo para ser queimado, se não tivesse caridade, tudo isso de nada me serviria.

A caridade é paciente; é branda e benfazeja; a caridade não é invejosa; não é temerária, nem precipitada; não se enche de orgulho; não é desdenhosa; não cuida de seus interesses; não se agasta, nem se azeda com coisa alguma; não suspeita mal; não se rejubila com a injustiça, mas se rejubila com a verdade; tudo suporta, tudo crê, tudo espera, tudo sofre.

Agora, estas três virtudes: a fé, a esperança e a caridade permanecem; mas, dentre elas, a mais excelente é a caridade.

São Paulo, 1ª Epístola aos Coríntios, cap. XIII, vv. 1 a 7 e 13.

AGRADECIMENTOS

Alcançar bons resultados neste trabalho de mestrado foi possível graças à ajuda técnica e emocional de vários familiares, amigos e colegas no Brasil e na Alemanha ao longo destes dois anos e meio.

Primeiramente agradeço a Deus pela minha vida, saúde, trabalho e motivação abundantes, que são fatores essenciais para o crescimento de qualquer indivíduo. Lembro também todo o carinho recebido de meus pais, que sempre me apoiaram em meus estudos, educação e trabalhos desde pequeno.

Agradeço em especial ao professor Marcelo Ricardo Stemmer, pela orientação no projeto e pelos conselhos que me foram dados mesmo quando se encontrava na França para seu pós-doutorado. Agradeço também ao professor Rômulo Silva de Oliveira que me orientou durante este período.

O grupo S2i me deu toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do projeto e aprendizado de uma série de ferramentas e tecnologias novas que auxiliaram e influenciaram na conclusão deste projeto. Agradeço aos amigos Mário Roloff, Fernando Deschamps, Fabricio Forgerini, José Bittencourt, Ricardo Grützmacher, Mathias Erdtmann, Adriano Bess, Fábio Terra, Ricardo Donada, Christian Silvano e Luis Carlos Junges, todos integrantes do grupo que contribuíram diretamente na execução de atividades do projeto no Brasil e também nas correções deste documento.

Os amigos Daniel de Moraes e Marcelo Adur ainda tiveram participação ativa no desenvolvimento do projeto, ao longo de seus projetos de fim de curso na Alemanha, ajudando significativamente para que os objetivos traçados para este trabalho fossem alcançados.

Quanto aos meus amigos que se encontram na Alemanha, muito obrigado Alexandre Orth e Guilherme Mallmann por me receberem tão bem e permitirem minha permanência por três meses junto a vocês. Neste tempo o trabalho foi intenso e realmente valeu a pena muito por causa da ajuda, incentivo e descontração de vocês.

No instituto WZL recebi atenção de diversos colegas, em especial do doutorando René Hermes, responsável pelo projeto TOOLSPY no lado alemão, com quem conversei ao longo de todo o projeto por vídeo-conferência. Agradeço ainda ao Doutor Reinhard Freudenberg e ao professor Robert Schmitt pela cooperação para que minha estadia na Alemanha fosse possível e ao professor Tilo Pfeifer por acompanhar a defesa de minha dissertação na Alemanha. Os demais colegas, Frank, Bjorn, Ubaldo, Torben, Alina, Achile, Bahare, Peter, Christoph e Andre (espero não ter esquecido ninguém), agradeço pela ajuda com o aprendizado da língua alemã, pela descontração no ambiente de trabalho e me desculpem pelo Brasil ter vencido a Alemanha de novo ok?

Por fim agradeço ainda à Capes que me financiou ao longo do projeto de mestrado no Brasil e ao S2i que financiou minha ida para o término de atividades na Alemanha.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**CONTRIBUIÇÕES NA OTIMIZAÇÃO
DE UM SISTEMA DE VISÃO PARA DETECÇÃO,
MEDIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA
DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM**

Alberto Xavier Pavim

Agosto/2005

Orientador: Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Palavras-chave: processos de fabricação, ferramentas de corte, sistemas de visão, processamento de imagens

Número de Páginas: xxviii + 205

O crescimento e alteração de comportamento do mercado consumidor ao longo das últimas décadas provocou uma série de mudanças nos setores produtivos, que passaram a fiscalizar com rigor a qualidade de seus produtos, visando manter competitividade no mercado e atender às exigências do consumidor. Para atingir este objetivo, as empresas do ramo industrial tiveram de investir em tecnologias de monitoramento para seus processos de manufatura, sendo este um excelente meio de alcançar redução de custos e manter flexibilidade produtiva em conjunto. Dentre as técnicas de monitoramento mais promissoras estão as que focam a inspeção do desgaste em ferramentas de corte nos processos de usinagem, através de métodos de sensoriamento direto ou indireto. Este trabalho apresenta conteúdo a respeito das áreas de processos de fabricação metal-mecânica, ferramentas de corte, desgaste em ferramentas e as técnicas de monitoramento do desgaste, para poder enunciar uma aplicação de visão voltada para inspeção direta e automática do desgaste. O sistema de visão desta aplicação, conhecido como TOOLSPY, visa medir e classificar o desgaste em ferramentas de fresamento com rapidez e exatidão suficientes para substituir as técnicas de inspeção tradicionais utilizadas, dispensando o emprego de operadores experientes para a realização destas tarefas. Neste documento estão descritos os componentes de *hardware* e *software* utilizados no sistema, dando-se grande ênfase também na cadeia de processamento de imagens da solução.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment
of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**CONTRIBUTIONS IN THE OPTIMIZATION OF A
MACHINE VISION SYSTEM FOR AUTOMATICALLY
DETECTING, MEASURING AND CLASSIFYING
THE WEAR ON CUTTING TOOLS
IN MACHINING PROCESSES**

Alberto Xavier Pavim

August/2005

Advisor: Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Informatics

Key words: manufacturing processes, cutting tools, machine vision, image processing

Number of Pages: xxviii + 205

The growth and change of behaviour of the consumer market during the last decades caused a series of changes in the manufacturing fields, which started to inspect deeper its products' quality, in order to keep competitiveness in the market and attend its costumers' demands. To reach this goal, enterprises from the industrial field had to invest in monitoring technologies for their manufacturing processes, as this was an excellent way to achieve costs reduction and mantain manufacturing flexibility together. The most promissory monitoring techniques focus the inspection of tool wear in machining processes, using direct or indirect sensing methods. This work presents a brief literature on manufacturing processes, cutting tools, tool wear and wear monitoring, in order to introduce a vision application for direct and automatic tool wear inspection. This machine vision system, known as TOOLSPY, intends to measure and classify the wear on milling tools in a rapid and precise way, allowing the substitution of the traditional inspection techniques currently used and dispensing the need of experient operators for performing those tasks. In this document the hardware and software components of the system are described, giving also special emphasis to the image processing chain of the system.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Controle de Qualidade no Setor Industrial	1
1.2	Importância do Monitoramento de Processos	2
1.3	Contexto do Projeto	4
1.4	Descrição do Problema	6
1.5	Histórico do Projeto	8
1.6	Objetivos	12
1.7	Principais Contribuições	13
1.8	Metodologia	13
1.9	Organização do Documento	14
2	Processos de Fabricação, Ferramentas de Corte e Desgaste em Ferramentas	17
2.1	Processos de Fabricação Metal-Mecânica	17
2.2	Ferramentas de Corte	19
2.3	Desgaste em Ferramentas de Corte	21
2.3.1	Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte	22
2.3.2	Causas para o Aparecimento do Desgaste	24
3	Células Autônomas de Produção e Monitoramento de Processos	27
3.1	Células Autônomas de Produção	27
3.1.1	Conceito de Autonomia	29
3.2	Monitoramento de Processos de Fabricação	30

3.2.1	Justificativas para o Monitoramento	30
3.2.2	Métodos de Monitoramento do Desgaste em Ferramentas	31
3.2.3	Considerações sobre o Monitoramento do Desgaste	41
4	Sistemas de Visão	45
4.1	Terminologia associada à Visão	45
4.2	Componentes de um Sistema de Visão	47
4.3	Aplicações	49
4.4	Monitoramento do Desgaste em Ferramentas de Corte por Visão	50
4.4.1	Histórico de Abordagens	52
4.4.2	Aplicabilidade da Tecnologia de Visão para Monitorar Desgaste	56
5	O Sistema TOOLSPY	59
5.1	Requisitos Gerais do Sistema TOOLSPY	59
5.2	Componentes de <i>Hardware</i> do Sistema de Visão	60
5.2.1	Sistema Óptico	61
5.2.2	Sistema de Iluminação	63
5.2.3	Sistema de Aquisição	65
5.2.4	Sistema de Manipulação das Ferramentas de Corte	66
5.2.5	Sistema de Processamento	68
5.2.6	Sistema de Transmissão de Dados	68
5.3	Componentes de <i>Software</i> do Sistema de Visão	69
5.3.1	Desenvolvimento de <i>Software</i> segundo a Metodologia do S2i/WZL	70
6	Deteção, Medição e Classificação do Desgaste das Ferramentas de Corte	85
6.1	Cadeia de Processamento de Imagens	85
6.1.1	Aquisição de Imagens	86
6.1.2	Deteção de Bordas	88
6.1.3	Pré-processamento	89
6.1.4	Extração de Características	91

6.1.5	Classificação do Desgaste	93
6.1.6	Medição do Desgaste	97
6.1.7	Calibração Automática do Sistema	98
7	Resultados	103
7.1	Validação dos Resultados de Medição e Classificação	108
7.2	Quadro Completo da Cadeia de Processamento de Imagens	115
8	Conclusões e Perspectivas Futuras	121
8.1	Conclusões	121
8.2	Perspectivas Futuras	123
A	Projeto de Sistemas de Visão	127
A.1	Componentes de <i>Hardware</i> de um Sistema de Visão	127
A.1.1	Sistema Óptico	130
A.1.2	Sistema de Iluminação	135
A.1.3	Sistema de Aquisição de Imagens	143
A.1.4	Sistema de Transmissão de Dados	152
A.1.5	Sistema de Processamento de Dados	156
A.1.6	Sistema de Atuação	159
A.1.7	Calibração do Sistema de Visão	159
A.2	Componentes de <i>Software</i> de um Sistema de Visão	160
A.2.1	Propriedades das Imagens	160
A.2.2	Pré-Processamento de Imagens (Realce de Características)	163
A.2.3	Morfologia Matemática	173
A.2.4	Segmentação	174
A.2.5	Inteligência Artificial aplicada à Visão	182
B	A Biblioteca S2iLib e o Projeto Harpia	183
B.1	Objetivos com o Desenvolvimento de <i>Software</i> Livre	183
B.2	A Biblioteca S2iLIB	184
B.2.1	Módulos da S2iLIB	185
B.3	Projeto HARPIA	187

Lista de Figuras

1.1	Faturamento da indústria metal-mecânica brasileira de 1995 a 2004.	4
1.2	Primeiro protótipo de visão para medir desgaste em ferramentas de corte.	8
1.3	Interface gráfica organizada segundo as etapas de processamento de imagem.	9
1.4	Cúpula de iluminação que projeta diferentes ângulos de incidência luminosa.	10
1.5	Infraestrutura mecânica de integração da máquina-ferramenta com o sistema de visão.	10
1.6	Protótipo e interface gráfica de aquisição de imagens antigo.	11
1.7	Nova interface gráfica do protótipo alemão do projeto TOOLSPY.	11
2.1	Classificação dos processos de fabricação metal-mecânica.	18
2.2	Remoção de cavaco e curvas de temperatura geradas durante usinagem.	19
2.3	Alguns tipos de processos de usinagem com ferramenta de geometria definida.	19
2.4	Exemplos de diferentes tipos de ferramentas de torneamento e fresamento.	20
2.5	Terminologia associada a ferramentas de torneamento ou aplainamento.	21
2.6	Desgaste de flanco e cratera evidenciados em uma ferramenta de torneamento.	22
2.7	Classificação de diferentes tipos de desgaste em ferramentas de corte.	24
2.8	Quadro comparativo de tipos de materiais conforme a resistência ao desgaste.	25
2.9	Influência de parâmetros de processo no aparecimento do desgaste.	26
3.1	Integração de atividades necessárias à autonomia de uma célula de produção.	28
3.2	Métodos de monitoramento de processos de manufatura.	32
3.3	Arquitetura genérica para aplicações de multi-sensoamento.	40
3.4	Modelo de multi-sensoamento com processamento inteligente dos sinais.	43
4.1	Interdependência entre os termos da área de sistemas de visão.	47

4.2	Componentes gerais de um sistema de visão.	49
4.3	Diversas áreas de aplicação das tecnologias de visão e processamento de imagens. . .	51
5.1	Sistema completo de interfaceamento do TOOLSPY.	60
5.2	Integração do protótipo do sistema TOOLSPY com a máquina-ferramenta.	61
5.3	Esquema do sistema TOOLSPY.	61
5.4	Protótipo do sistema TOOLSPY.	62
5.5	Magnificação do flanco principal da ferramenta alcançada através de um microscópio. .	63
5.6	Tabela para escolha do melhor conjunto óptico.	64
5.7	Painéis flexíveis de iluminação.	64
5.8	Placa de E/S PO64T da empresa Contec.	65
5.9	Camera analógica Sony CCD XC-75CE com sensor CCD de 1/2 polegada.	66
5.10	Sistema de manipulação da ferramenta dentro da estação de medição.	67
5.11	Placa CAN-PCI/200 da empresa ESD para controle da rede CANbus.	67
5.12	Placa de aquisição PXC200A da empresa Imagenation Technology.	68
5.13	Diagrama de caso de uso para utilização do sistema TOOLSPY.	75
5.14	Diagrama de componentes e de classes do sistema TOOLSPY.	76
5.15	Ambientes de desenvolvimento Visual C++ e Anjuta, respectivamente.	79
5.16	Ambiente de controle de versões de código fonte CVS.	80
5.17	Ferramentas inspecionadas durante os testes do sistema TOOLSPY.	81
5.18	Janela principal da interface gráfica do TOOLSPY.	83
5.19	Janela principal da interface gráfica executando medição manual do TOOLSPY. . . .	83
5.20	Janela de configuração de parâmetros do TOOLSPY.	83
5.21	Janela de configuração do sistema de manipulação do TOOLSPY.	84
5.22	Janela de configuração do sistema de manipulação executando a calibração.	84
5.23	Janela de relatório do TOOLSPY.	84
6.1	Cadeia de processamento de imagens do sistema ToolSpy.	86
6.2	Aquisição de duas imagens com configuração de iluminação diferentes.	87
6.3	Regiões de interesse (ROIs) para detecção das bordas da imagem.	88

6.4	Detecção de bordas empregadas com filtro <i>Canny</i> nas ROIs da imagem.	89
6.5	Utilizando informações da borda da ferramenta para isolá-la do fundo da imagem. . .	90
6.6	Equalização automática do histograma da imagem.	91
6.7	Etapa final de limpeza da imagem: binarização e filtragem estatística.	92
6.8	Conjunto de pontos iniciais definido pelo algoritmo <i>jacket</i>	92
6.9	Conjunto de pontos que representam o contorno do desgaste retornado pelo <i>snakes</i> . .	93
6.10	Contorno do desgaste aplicado sobre a imagem com iluminação frontal.	94
6.11	Diferentes características superficiais de um desgaste de flanco e uma quebra.	95
6.12	Arquitetura de rede <i>feedforward</i> com três camadas.	96
6.13	Identificação de quebra lateral por inspeção do canto da ferramenta.	97
6.14	Identificação de quebra superior por inspeção do contorno do desgaste da ferramenta.	97
6.15	Linhas perpendiculares ao topo da ferramenta projetadas sobre área do desgaste. . . .	98
6.16	Vetor de imagens da ferramenta de calibração em diferentes posições focais.	99
6.17	Escolha da imagem de melhor foco através da inspeção da variância de seus <i>pixels</i> . .	100
6.18	Binarização automática da imagem de calibração e posterior limpeza de ruídos. . . .	100
6.19	Processo de identificação das linhas verticais e horizontais da imagem de calibração.	101
6.20	Calibração do sistema pela medição da distância média entre as linhas do gabarito. .	102
7.1	Sequência de resultados obtidos para ferramenta com desgaste de flanco da SECO. .	116
7.2	Sequência de resultados obtidos para ferramenta com quebra da SECO.	117
7.3	Sequência de resultados obtidos para ferramenta com desgaste de flanco da SANDVIK.	118
7.4	Sequência de resultados obtidos para ferramenta com quebra da SANDVIK.	119
A.1	Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico.	128
A.2	Metodologia sistemática para o projeto de um sistema de visão.	129
A.3	Exemplo de componentes ópticos.	130
A.4	Relacionamento entre a profundidade de campo e a abertura de lentes.	131
A.5	Relação entre tamanho do sensor e campo de visão.	132
A.6	Contraste entre diferentes tonalidades de cinza em uma imagem.	133
A.7	Ilustração de fenômenos que afetam a aquisição de imagens.	134

A.8	Princípio de funcionamento das lentes telecêntricas.	134
A.9	Todas as faixas do espectro luminoso.	135
A.10	Ilustração da técnica de iluminação direcional.	139
A.11	Ilustração da técnica de iluminação multi-direcional.	139
A.12	Ilustração da técnica de iluminação em anel.	140
A.13	Ilustração da técnica de iluminação de campo escuro (<i>dark-field</i>).	140
A.14	Ilustração da técnica de iluminação de fundo (<i>backlight</i>).	140
A.15	Ilustração da técnica de iluminação de cúpula (<i>dome</i>).	141
A.16	Ilustração da técnica de iluminação difusa.	141
A.17	Ilustração da técnica de iluminação dia nublado (<i>cloudy day</i>).	142
A.18	Ilustração da técnica de iluminação estruturada.	142
A.19	Ilustração da técnica de iluminação polarizada.	143
A.20	Sensibilização, armazenamento e deslocamento da imagem em CCDs.	146
A.21	Operações de sensibilização e transferência de dados em sensores CMOS.	146
A.22	Cores arranjadas por mosaico ou por linhas numa imagem.	148
A.23	Técnica de divisão de feixes luminosos em 3 componentes coloridos.	149
A.24	Tamanhos padrão de sensores CCD.	149
A.25	Resolução de um sensor em termos de pares de linha.	150
A.26	Representação de resolução de 5 bits para o nível de intensidade luminosa da imagem.	151
A.27	Diferentes tipos de câmeras encontradas no mercado.	153
A.28	Diferentes tipos de conectores em cabeamento de vídeo analógico.	154
A.29	Estrutura modular genérica de placas de aquisição de imagens.	157
A.30	Estrutura funcional das unidades de entrada de vídeo.	158
A.31	Estrutura funcional das unidades de saída de vídeo.	159
A.32	Etapas de formação das imagens em um sistema de visão.	161
A.33	Tarefas de amostragem e quantização dos dados analógicos de uma linha da imagem.	162
A.34	Vizinhanças $N_4(p)$, $N_D(p)$ e $N_8(p)$ do <i>pixel</i> $p = 0$	162
A.35	Ilustração de caminhos conectados e regiões em uma imagem binária.	163

A.36 Ilustração do operador T sobre a vizinhança de um ponto da imagem.	164
A.37 Típicos arranjos de operadores para processamento espacial.	165
A.38 Operador 3X3 aplicado sobre a vizinhança de um ponto da imagem.	166
A.39 Ilustração de operações básicas de pré-processamento.	167
A.40 Ilustração de operações lógicas e aritméticas de pré-processamento.	168
A.41 Ilustração de operações de filtragem de suavização e ênfase.	169
A.42 Representação de uma imagem através de seu histograma.	170
A.43 Ilustração do processo de equalização do histograma de uma imagem.	171
A.44 Passos realizados no processamento frequencial de imagens.	172
A.45 Representação de uma imagem no domínio da frequência.	172
A.46 Principais formas de elementos estruturantes na morfologia matemática.	173
A.47 Princípio de funcionamento de operadores morfológicos.	175
A.48 Diversas configurações de máscaras para a detecção de descontinuidades.	176
A.49 Detecção de pontos, linhas e bordas numa imagem.	177
A.50 Simples ilustração de técnicas de detecção de limiares.	178
A.51 Processo de segmentação por crescimento de regiões.	179
A.52 Processo de segmentação por divisão e agrupamento.	181
A.53 Processo de segmentação por divisores de águas.	182
B.1 Módulos da biblioteca S2ILIB.	185
B.2 Ilustração do mascote do projeto HARPIA e o logotipo.	188
B.3 Interface gráfica do ambiente de desenvolvimento de aplicações do WIT.	189
B.4 Versão beta da interface gráfica do HARPIA.	189

Lista de Tabelas

7.1	Classificação de Ferramentas SECO.	109
7.2	Classificação de Ferramentas SANDVIK com revestimento.	110
7.3	Classificação de Ferramentas SANDVIK sem revestimento.	111
7.4	Medição de 5 ferramentas SECO.	113
7.5	Medição de 5 ferramentas SANDVIK com revestimento.	114
7.6	Medição de 5 ferramentas SANDVIK sem revestimento.	114

Nomenclatura

- ABIMAQ Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos
- ADC Conversor Analógico-Digital, do inglês *Analog-to-Digital Converter*
- APC Célula de Produção Autônoma, do inglês *Autonomous Production Cell*
- API Interface de Programação da Aplicação, do inglês *Application Programming Interface*
- AWK Colóquio de Máquinas-Ferramentas de Aachen, do alemão *Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium*
- CAD Projeto Assistido por Computador, do inglês *Computer Aided Design*
- CAN Rede de Área de Controle, do inglês *Controller Area Network*
- CBN Nitreto de Boro Cúbico, do inglês *Cubic Boron Nitret*
- CCD Dispositivos de carga acoplados, do inglês *Charged Coupled Devices*
- CCIR Comitê de Consulta Internacional em Radio-Comunicação, do francês *Comité Consultatif International des Radiocommunications*
- CMOS Semicondutor de óxido-metal complementar, do inglês *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
- CVS Sistema de Versões Concorrentes, do inglês, *Concurrent Versions System*
- DAO Objetos de Acesso a Dados, do inglês, *Data Access Objects*
- DAS Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina
- DFG Conselho de Pesquisa Alemão, do alemão *Deutsche Forschungsgemeinschaft*
- DFT Transformada Discreta de Fourier, do inglês *Discrete Fourier Transform*

- DOF Profundidade de campo, do inglês *Depth of Field*
- DSP Processador Digital de Sinais, do inglês *Digital Signal Processor*
- EIA Associação das Indústrias de Eletrônica, do inglês *Electronics Industries Association*
- EMC Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina
- f^* Limites focais, normalmente definidos como uma faixa de valores (f_{min} e f_{max})
- $f/\#$ Número que representa uma porcentagem de abertura das lentes
- FB Armazenador de Quadros, do inglês *Frame Buffer*
- FOV Campo de visão, do inglês *Field of Vision*
- HTML Linguagem para Marcação de Hipertexto, do inglês, *HyperText Markup Language*
- IA Inteligência Artificial
- IAW Instituto para Ciências do Trabalho da RWTH-Aachen, do alemão *Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH-Aachen*
- IDE Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês, *Integrated Development Environment*
- IFAS Instituto para Acionamento e Controle Fluídicos da RWTH-Aachen, do alemão *Lehrstuhl und Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen der RWTH-Aachen*
- IIDC Instrumentação e Controle Industrial de Câmeras Industriais, do inglês *Instrumentation and Industrial Control Digital Camera*
- ILT Instituto Fraunhofer para Tecnologia Laser da RWTH-Aachen, do alemão *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik der RWTH-Aachen*
- IPT Instituto Fraunhofer para Tecnologia de Produção, do alemão *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie*
- IRT Instituto para Controle de Sistemas da RWTH-Aachen, do alemão *Lehrstuhl und Institut für Regelungstechnik der RWTH-Aachen*
- LED Diodo Emissor de Luz, do inglês *Light Emitting Diode*
- LMP Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina
- LVDS Sinalização Diferencial de Baixa Voltagem, do inglês *Low Voltage Differential Signaling*

MRA Mínima área confiável, do inglês, *Minimum Reliabel Area*

MRD Mínima distância confiável, do inglês, *Minimum Reliable Distance*

NTSC Comitê Nacional de Sistemas de Televisão, do inglês *National Television System Committee*

OCR Reconhecimento Óptico de Caracteres, do inglês, *Optical Character Recognition*

OCV Verificação Óptica de Caracteres, do inglês, *Optical Character Verification*

PAL Linha de Alternação de Fase, do inglês *Phase Alternation Line*

PCI Interconexão de Componentes Periféricos, do inglês, *Peripheral Component Interconnect*

PDA Assistente Digital Pessoal, do inglês *Personal Digital Assistant*

Placa de E/S Placa de Entrada e Saída

PMAG Magnificação Primária, do inglês *Primary Magnification*

QTH Lâmpada de quartzo tungstênio halógena, do inglês *Quartz Tungsten Halogen Lamp*

R Resolução, do inglês *Resolution*

RAM Memória de Acesso Aleatório, do inglês *Random Access Memory*

RWTH-Aachen Universidade Técnica de Aachen, do alemão *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*

S2i Sistemas Industriais Inteligentes, grupo de pesquisa ligado ao Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina

S2iDoc Metodologia de desenvolvimento e documentação de projetos do grupo S2i

SECAM Cor Sequencial à Memória, do francês *Sequentiel Couleur à Memoire*

SFB368 Centro Colaborativo de Pesquisa 368, do alemão *Sonderforschungsbereich 368*

SMAG Magnificação do Sistema, do inglês *System Magnification*

SS Tamanho do sensor, do inglês *Sensor Size*

TTL Lógica Transistor-para-Transistor, do inglês *Transistor-to-Transistor Logic*

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

USB Barramento Serial Universal, do inglês *Universal Serial Bus*

- VIU Unidade de Entrada de Vídeo, do inglês *Video Input Unit*
- VOU Unidade de Saída de Vídeo, do inglês *Video Output Unit*
- WD Distância de trabalho, do inglês *Working Distance*
- WZL Laboratório de Máquinas-Ferramentas e Engenharia Industrial, do alemão *Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre*

Capítulo 1

Introdução

O mercado consumidor de forma global tem crescido e transformado seu comportamento, tornando-se cada vez mais exigente. O reflexo desta mudança é notado principalmente no setor industrial. Atualmente, para se manter competitiva no mercado uma empresa tem de desenvolver produtos altamente especializados em curtos períodos de tempo, a baixos custos de produção e oferecendo preços competitivos [1].

Além de exigir preços competitivos e variedade de produtos com rápida entrega, os consumidores passaram a cobrar pela alta qualidade dos mesmos, tornando os processos de controle de qualidade cada vez mais comuns e de certa forma indispensáveis dentro dos setores produtivos de uma empresa. Grande contribuição para o desenvolvimento de novas técnicas de **inspeção e controle de qualidade** foi dada pelos governos federais, ao incentivar e delegar responsabilidades a órgãos e entidades especializadas em regulamentar os processos industriais, passando assim a exigir da indústria, por intermédio do decreto de leis e normas, um padrão de qualidade mínimo para seus produtos.

1.1 Controle de Qualidade no Setor Industrial

Os primeiros sistemas de controle de qualidade iniciaram suas atividades por volta dos anos 80 e naquela época a produção industrial era apenas inspecionada por amostras (ou lotes), utilizando-se métodos estatísticos [2]. Ou seja, ao término da linha de produção, testes eram realizados em determinados produtos escolhidos aleatoriamente, para verificar se seu estado estava de acordo com as especificações de fabricação. Obtinha-se assim uma certeza estatística do estado de qualidade final de toda a produção, necessária para caracterizar o produto como satisfatório para a venda.

Por basear-se em métodos estatísticos, a inspeção por amostragem não apresenta confiança absoluta sobre o **nível de qualidade final da produção**, permitindo ainda que produtos defeituosos

entrem no mercado causando insatisfação nos clientes e resultando em prejuízos para a empresa, devido à necessidade de retrabalho (ou refugo) dos produtos defeituosos e do maquinário danificado. Mesmo sendo aplicados ainda hoje com sucesso em linhas de produção estáveis, estes métodos estatísticos de inspeção vêm sendo aos poucos substituídos por técnicas mais eficientes.

A busca por excelência na qualidade de produtos e serviços obrigou especialmente o setor industrial a investir em novas tecnologias de inspeção que garantissem 100% (ou valor aproximado) da qualidade final de seus produtos. Uma nova gama de soluções para o controle de qualidade surgiu, cada qual específica para algum tipo de aplicação ou ramo industrial. Entretanto, permaneceu uma lacuna a ser preenchida, pois se novos sistemas eficientes no controle de qualidade dos produtos finais surgiram, os sistemas produtivos não acompanharam este mesmo desenvolvimento. O resultado foi o surgimento de linhas de produção com um índice alto de refugos e remanufaturamento, permanecendo a empresa a sofrer com os mesmos prejuízos anteriores, apenas evitando de entregar produtos defeituosos no mercado e de criar novos conflitos com seus consumidores.

Esta situação instável marcou uma nova era para os sistemas de inspeção e controle de qualidade no setor industrial. Ficou claro que a solução para este problema não resumia-se a inspecionar o produto final, mas sim, o processo completo de manufatura, evitando que erros cometidos no início da linha de produção se propagassem até o fim da mesma. Estes novos **sistemas de monitoramento da produção** foram sendo empregados de forma experimental e gradativa, passando a tornar-se essenciais na medida em que foram provando sua eficiência na redução dos prejuízos e no aumento da confiabilidade e qualidade da produção final da empresa.

1.2 Importância do Monitoramento de Processos

Dada a grande importância e influência do setor produtivo industrial na economia mundial, devido principalmente às volumosas movimentações financeiras que ocorrem neste setor, há uma forte preocupação e uma extensa área de pesquisa dirigida ao melhoramento dos processos produtivos, visando a redução nos custos de desenvolvimento, a diversificação e flexibilidade das soluções entregues e a alta qualidade final dos produtos [3].

Para os casos de produção em massa, qualquer redução na escolha de componentes eletrônicos/mecânicos para o desenvolvimento de produtos, ou mudanças tecnológicas nos processos produtivos que venham a trazer uma redução da ordem de centavos na fabricação de um produto específico, já representam uma expressiva quantidade financeira no balanço de contas de uma grande empresa do ramo industrial ao fim do mês.

Dentre os setores produtivos, um problema frequente que afeta a qualidade dos produtos e a eficiência produtiva da linha de manufatura é o estado de desgaste das ferramentas de corte. Para se ter uma idéia da dimensão do problema, estas ferramentas são utilizadas nos principais processos de fabricação metal-mecânica, como torneamento, fresamento e furação. Uma análise do estado de desgaste das ferramentas é necessária para possibilitar a melhor configuração dos parâmetros de operação das máquinas-ferramentas das linhas de manufatura, visando maiores taxas de produção e atingindo a qualidade necessária ao produto final [4].

Não é a toa que inúmeras pesquisas e esforços estão sendo direcionados para o problema de monitoramento dos processos de fabricação metal-mecânica, em especial o de controle do desgaste das ferramentas de corte, pois numa situação ideal de operação, onde se tem uma utilização otimizada de toda a vida útil de uma ferramenta de corte, descartando-a apenas momentos antes de sua inutilização total (quebra), identificam-se expressivas vantagens econômicas, como por exemplo: economia com compra de novas ferramentas de corte (pois estas agora tem maior vida útil), economia com remanufatura e refugo de materiais (devido à produção com ferramentas de corte em estado impróprio), economia na manutenção das máquinas-ferramentas (danificação das máquinas quando da quebra das ferramentas) e menores tempos de *setup* das mesmas.

Há uma grande linha de pesquisa tanto por parte da comunidade científica quanto por parte do setor industrial atacando este problema, sendo que vários artigos são publicados visando gerar novas idéias para o monitoramento e melhoramento dos processos produtivos [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Algumas aplicações nesta área inclusive já se tornaram produtos, porém ainda bem restritos para a resolução de uma aplicação específica. Há uma demanda crescente por soluções mais inteligentes e genéricas que sejam aplicáveis a maiores quantidades de processos de fabricação.

A pesquisa nesta área não se limita aos maiores pólos de fabricação industrial do mundo, como Estados Unidos, Alemanha, França e Japão. Nota-se um crescimento da atividade industrial no Brasil, o que traz o problema do monitoramento dos processos de fabricação metal-mecânica à tona para a comunidade científica e industrial brasileira, visando manter o setor industrial nacional competitivo internacionalmente. Segundo dados da ABIMAQ¹, o Brasil tem hoje papel de destaque no setor de produção metal-mecânica, sendo um dos maiores desenvolvedores de maquinaria e equipamentos industriais e agrícolas do mundo. A prova disto é que nos últimos 20 anos, as exportações destes produtos (desde equipamentos agrícolas, até maquinaria industrial pesada, bombas, válvulas, refrigeradores, automóveis e aviões) foram quintuplicadas, sendo que grande parte deste crescimento (aproximadamente 40%) ocorreu recentemente, a partir do ano 2000. A destinação de mais da metade destes produtos é para mercados de países tecnologicamente desenvolvidos, como Estados Unidos,

¹<http://www.abimaq.org.br/>

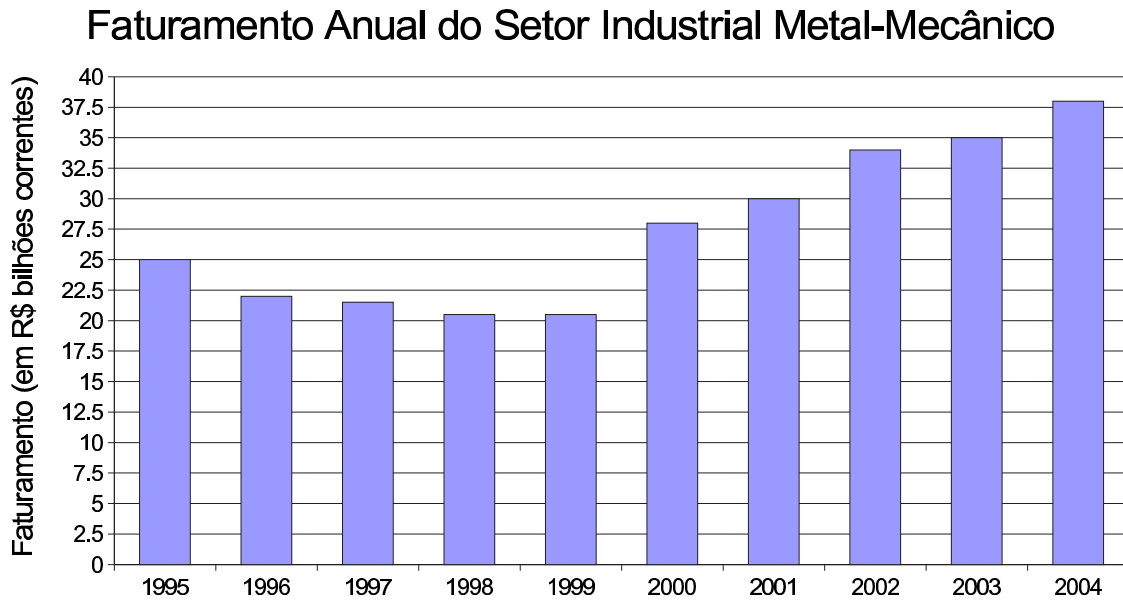


Figura 1.1: Faturamento da indústria metal-mecânica brasileira de 1995 a 2004.
Fonte: ABIMAQ.

Alemanha, Inglaterra, Itália, França e Holanda. A figura 1.1 apresenta um gráfico com o faturamento anual da indústria metal-mecânica brasileira no período de 1995 a 2004, sendo que o IBGE apontou o ano de 2004 como sendo o ano de melhor desempenho do setor nos últimos 18 anos.

Diante deste cenário, e de acordo com diversos estudos já levantados sobre a tecnologia de monitoramento aplicados a sistemas flexíveis de manufatura [15, 16, 17, 18, 19, 20], fica claro que novas pesquisas nesta área são de relevante importância para o setor industrial brasileiro e mundial.

1.3 Contexto do Projeto

Devido à importância do tema de monitoramento dos processos produtivos, foi criado um grande projeto de pesquisa nas dependências da Universidade Técnica de Aachen – RWTH-Aachen – na Alemanha, intitulado de *SFB368 – Autonome Produktionszellen* (Células Autônomas de Produção), com o objetivo de desenvolver uma célula de produção com alto índice de autonomia e flexibilidade, capaz de atender demandas de produção complexas e altamente especializadas, e ainda assim manter boa eficiência e qualidade de produção [21]. Para cumprir estes requisitos faz-se necessário o emprego de métodos preventivos de monitoramento do processo de manufatura, de forma a evitar a produção defeituosa e/ou de refugo.

Neste contexto, vários institutos afiliados à RWTH-Aachen, especializados em diferentes áreas da engenharia, desde engenharia mecânica, controle e planejamento de processos, até mecatrônica,

se uniram no escopo do projeto SFB368 para formar um Centro Colaborativo de Pesquisas na área de Células Autônomas de Produção, sendo financiados pelo órgão DFG – *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (Conselho de Pesquisa Alemão). Os institutos que integram o projeto atualmente são:

- **IAW**²: Instituto para Ciências do Trabalho da RWTH-Aachen.
- **IFAS**³: Instituto para Acionamento e Controle Fluídicos da RWTH-Aachen.
- **IPT**⁴: Instituto Fraunhofer para Tecnologia de Produção – Metrologia e Controle de Qualidade.
- **IRT**⁵: Instituto para Controle de Sistemas da RWTH-Aachen.
- **ILT**⁶: Instituto para Tecnologia Laser da RWTH-Aachen.
- **WZL**⁷: Laboratório de Máquinas-Ferramentas e Engenharia Industrial.

O projeto SFB368 conta ainda com algumas parcerias internacionais. A Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – mantém já há um bom tempo vários projetos de cooperação com universidades alemãs, em especial com a RWTH-Aachen, onde o intercâmbio cultural, tecnológico e de recursos humanos tem se mostrado eficiente e proveitoso para ambos os lados. Atualmente, o grupo de pesquisa em Sistemas Industriais Inteligentes (S2i⁸) do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da UFSC mantém um projeto de cooperação internacional com o Instituto WZL da RWTH-Aachen, onde parte das tarefas do projeto SFB368 delegadas ao WZL seriam pesquisadas e desenvolvidas dentro da infraestrutura do grupo S2i no Brasil. O escopo destas atividades está definido dentro do subprojeto *Technische Maßnahmen zur Steigerung der Autonomie von Produktionszellen* (Medições Técnicas para a Ampliação da Autonomia de Células de Produção), e dentre as principais atividades desenvolvidas no Brasil estão:

- Pesquisa e desenvolvimento de uma ferramenta *web* para o monitoramento e configuração da rede de sensores e atuadores das células autônomas de produção [22].
- Pesquisa e desenvolvimento de um sistema de visão para medição e classificação automática do desgaste das ferramentas de corte utilizadas nas células autônomas de produção [2, 3].

²<http://www.iaw.rwth-aachen.de/>

³<http://www.ifas.rwth-aachen.de/>

⁴<http://www.ipt.rwth-aachen.de/>

⁵<http://www.rwth-aachen.de/irt/>

⁶<http://www.ilt.fhg.de/>

⁷<http://www.wzl.rwth-aachen.de/>

⁸<http://s2i.das.ufsc.br/>

Esta cooperação tem se mostrado bastante produtiva, e já resultou na defesa de 3 dissertações de mestrado [2, 3, 22] e diversos trabalhos de conclusão de curso [1, 23, 24, 25, 26], além da publicação de diversos artigos [12, 13, 27, 28, 29, 30, 31, 32]. O trabalho atual apresenta-se como a quarta dissertação de mestrado abordando temas definidos dentro do escopo do projeto e paralelo a esta dissertação outros dois trabalhos de conclusão de curso estão em andamento. Nos 5 anos de cooperação, além do intercâmbio de recursos humanos e de produção científica, foram também realizados *workshops*, treinamentos e um protótipo do sistema de medição e classificação do desgaste das ferramentas de corte continua sendo construído no Brasil, para ser testado junto a algumas empresas do ramo de fabricação industrial nacionais – WEG⁹ e LESI¹⁰ – e com o Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP do Departamento de Engenharia Mecânica – EMC da UFSC.

1.4 Descrição do Problema

O projeto SFB368 visa o desenvolvimento de Células de Produção Autônomas (APCs), de alto grau de flexibilidade, eficiência e qualidade de produção. Diversas tarefas foram delegadas a cada instituto membro do projeto, de acordo com sua área de conhecimento. Dentro do escopo das Células Autônomas de Produção, diversas variáveis de processo devem ser monitoradas para atingir estabilidade e qualidade de manufatura, com baixos níveis de defeitos e redução de custos. Um problema clássico a ser tratado é o monitoramento do desgaste das ferramentas de corte da linha de produção. Através de uma análise do estado de desgaste das ferramentas, em especial o de flanco, é possível corrigir algumas variáveis de processo, tais como a velocidade de corte, avanço da ferramenta, torque exercido pela máquina-ferramenta, dentre outros. Esta análise visa extrair as melhores condições de usinagem possíveis do conjunto, obtendo melhor eficiência e qualidade na produção. Caso seja atingida uma classificação precisa do tipo do desgaste encontrado, é possível inferir para que tipo de operação de usinagem a ferramenta encontra-se mais adequada e impedir que situações como a quebra de uma ferramenta ocorram, que resultaria na danificação não só da ferramenta de corte, como também da peça sendo usinada e possivelmente da própria máquina-ferramenta.

Ao instituto WZL coube a pesquisa de viabilidade e o desenvolvimento de um protótipo para medição e classificação automática do desgaste de ferramentas de corte, em especial ferramentas de fresamento. Este tipo de solução requer a implementação de um sistema de monitoramento do processo, podendo ser atacado de diversas formas, utilizando diferentes tipos de tecnologia.

Algumas técnicas de monitoramento são conhecidas para a investigação do estado das ferramentas de corte, sendo classificadas de acordo com o tipo de sensoramento utilizado: diretas ou

⁹WEG Indústrias S.A. – <http://www.weg.com.br/>

¹⁰LESI Soluções em Processos de Usinagem (representante SECO) – <http://www.lesi.com.br/>

indiretas, contínuas ou intermitentes, pós- ou em processo [15]. Dentre as técnicas diretas, por exemplo, utiliza-se da própria ferramenta como objeto de análise para estimar o estado de desgaste. Já nas técnicas indiretas procura-se avaliar algum parâmetro do sistema em que a ferramenta está inserida, de forma a inferir sobre seu estado de desgaste de maneira indireta. Nas contínuas, a aquisição de dados do processo é realizada continuamente, enquanto que nas intermitentes esta aquisição é periódica e bem definida. Nas técnicas pós-processo o monitoramento é feito após o término da manufatura, enquanto que nas em processo é feito concomitantemente ao desenrolar do processo.

Exemplos de técnicas de monitoramento diretas são a microscopia óptica e a visão computacional, que costumam também ser intermitentes e pós-processo. Dentre as técnicas indiretas, pode-se citar a medição através de sensores de força, vibração e emissão acústica, colocados em pontos pré-determinados da máquina-ferramenta, que costumam ser também contínuas e em processo.

Ambas as técnicas apresentam vantagens e desvantagens próprias. A motivação para a utilização de uma técnica de monitoramento direta se dá devido ao desgaste ser estimado diretamente a partir da ferramenta de corte, que é o objeto de estudo, descartando-se a necessidade da análise de modelos empíricos inerentes ao comportamento das máquinas-ferramentas, como se dá com as técnicas indiretas. Além disso, a ausência de contato com a ferramenta de corte anima este tipo de escolha, que contorna diversos contratempos encontrados em técnicas indiretas, como por exemplo, as altas temperaturas do processo, presença de cavacos e fluido de corte.

Atualmente a tecnologia de sistemas de visão e processamento de imagens encontra-se em estágio bem evoluído e robusto, já sendo empregada em diferentes ramos de aplicação industrial, comercial e até mesmo residencial [33]. Ela possibilita uma análise precisa e completa das características da ferramenta de forma muito rápida e automática, ao contrário das técnicas de microscopia óptica tradicionais, aplicadas de forma manual. Não só a medição do desgaste pode ser atingida de forma automática, como também a própria classificação do tipo de desgaste, de acordo com a análise das características superficiais da região do flanco da ferramenta.

Por estas breves razões, que serão melhor detalhadas nos capítulos seguintes, é que um sistema de visão para controle automático do desgaste em ferramentas de corte está atualmente sendo desenvolvido no instituto WZL na Alemanha, tendo como parceiro de pesquisa e desenvolvimento o grupo S2i no Brasil, com o intuito de gerar um produto eficiente e robusto que atenda, de início, aos setores industriais alemão e brasileiro, e futuramente, o setor industrial mundial.

1.5 Histórico do Projeto

A medição e classificação do desgaste em ferramentas era inicialmente desempenhada por operadores experientes na área através de métodos de microscopia óptica, capaz de atingir boa magnificação da face da ferramenta, permitindo as inspeções. Mas nem sempre a inspeção era precisa, pois esta é extremamente dependente da experiência do operador. Outro fator preocupante eram os tempos de parada de máquina para que se pudesse realizar tais tipos de inspeção.

No início da cooperação entre o grupo S2i e o instituto WZL, o projeto ainda caracterizava-se como um projeto de pesquisa para averiguar a viabilidade de uma solução para a medição e classificação do desgaste em ferramentas de corte através de um sistema de visão, usando técnicas de processamento de imagem. Neste período, Orth [2], em sua dissertação, desempenhou boa parte da pesquisa necessária para a criação de um primeiro protótipo simplificado e provar a eficiência de tal sistema para atacar o problema, baseando-se em trabalhos já publicados pela comunidade científica [6, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41] e em trabalhos prévios desenvolvidos dentro do grupo S2i [42, 43, 44]. Este primeiro protótipo de laboratório, apesar de contar com algumas deficiências devido à falta de recursos, apresentou bons resultados para a medição e classificação do desgaste de um tipo específico de ferramenta de torneamento (figura 1.2).

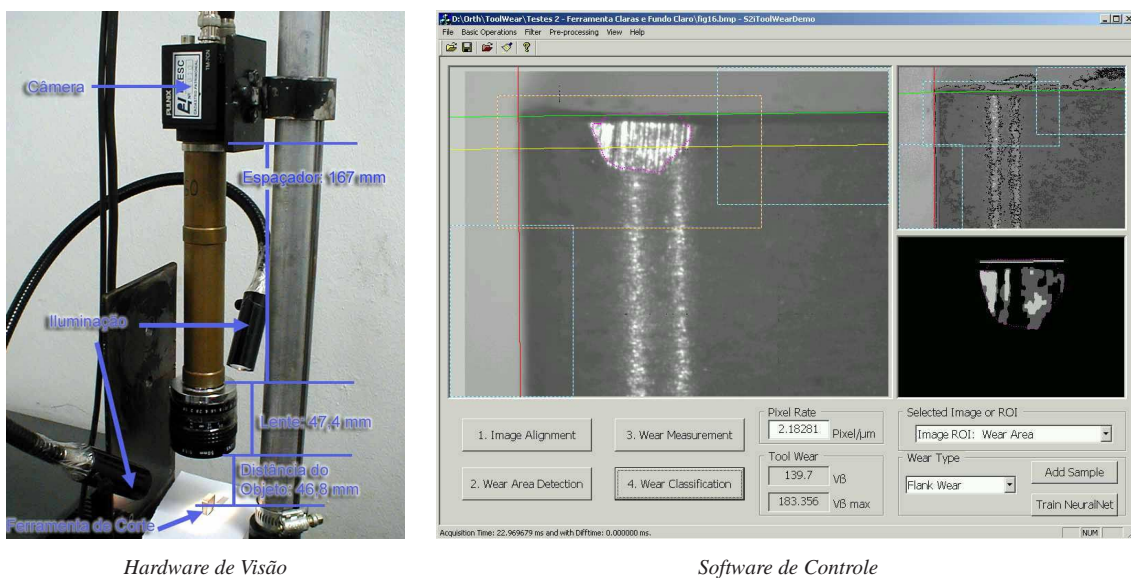


Figura 1.2: Primeiro protótipo de visão para medir desgaste em ferramentas de corte.
Fonte: Orth [2].

Para provar a robustez da solução, alguns fatores tinham de ser melhorados, tais como:

- Desenvolver um novo módulo de iluminação mais apropriado, pois o sistema com fibras ópticas direcionáveis requeria inúmeros ajustes e atendia especificamente àquela solução.

- Reprojetar o sistema óptico, para suprir as deficiências com a falta de luminosidade e profundidade de campo necessárias para garantir bom foco em toda a região do flanco da ferramenta.
- Aperfeiçoar o *software* do sistema, que apesar de contar com uma interface gráfica própria para facilitar sua operação, não apresentava modularidade boa suficiente para a alteração ou inclusão de etapas de processamento de imagem para o crescimento do sistema.
- Desenvolver um sistema de aquisição e calibração automática para permitir a validação dos resultados obtidos por comparação com medições realizadas através de microscopia óptica.
- Adaptar o *hardware* do sistema para ser integrado em um ambiente de chão de fábrica.

Na continuidade do projeto, Deschamps [25], em seu projeto de fim de curso, pesquisou a viabilidade do uso de algoritmos genéticos para otimização de parâmetros dos algoritmos de processamento de imagem do sistema. Em paralelo, focou também a melhoria do *software*, dando modularidade ao código-fonte para facilitar a inclusão de novos algoritmos de processamento.

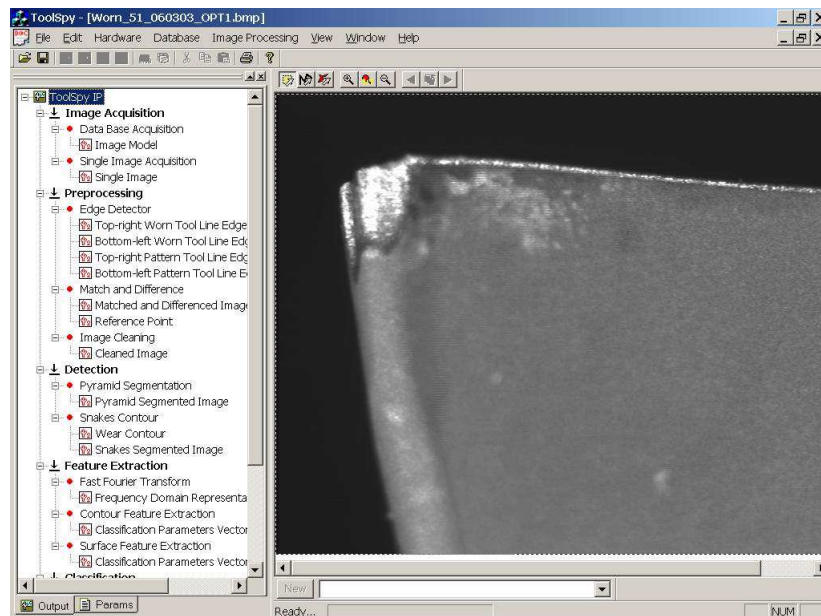


Figura 1.3: Interface gráfica organizada segundo as etapas de processamento de imagem.

Fonte: Pavim [1].

Neste período um novo módulo de iluminação estava sendo preparado no instituto WZL. A princípio, a iluminação seria composta de um anel de LEDs. Posteriormente, passou a ser composto por uma cúpula com 4 anéis de LEDs que possibilitaria a projeção de diversos feixes luminosos em diferentes ângulos sobre a superfície da ferramenta de corte, propiciando melhor reflexão e destaque da área desgastada. Ao mesmo tempo uma infraestrutura mecânica composta por três eixos foi construída para permitir a integração automática do sistema de visão com uma máquina-ferramenta

do chão de fábrica do instituto WZL. Os eixos eram acionados por motores de passo controlados via protocolo CANopen através de uma rede CANbus. Neste momento a solução já ganhava características de produto, e o sistema recebeu um nome e logo próprio, de acordo com a aplicação: TOOLSPY.



Simple Anel de LEDs

Cúpula com múltiplos anéis de LEDs

Figura 1.4: *Cúpula de iluminação que projeta diferentes ângulos de incidência luminosa.*

Fonte: Deschamps [25] e Pavim [1].

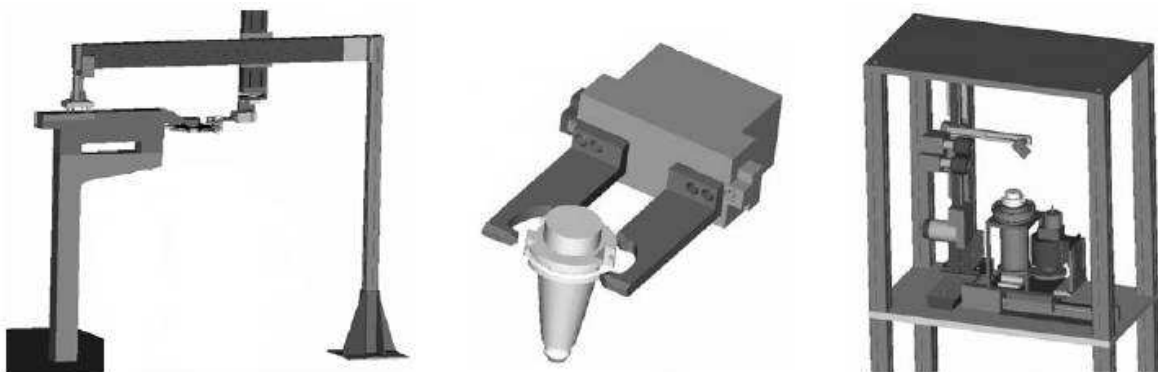
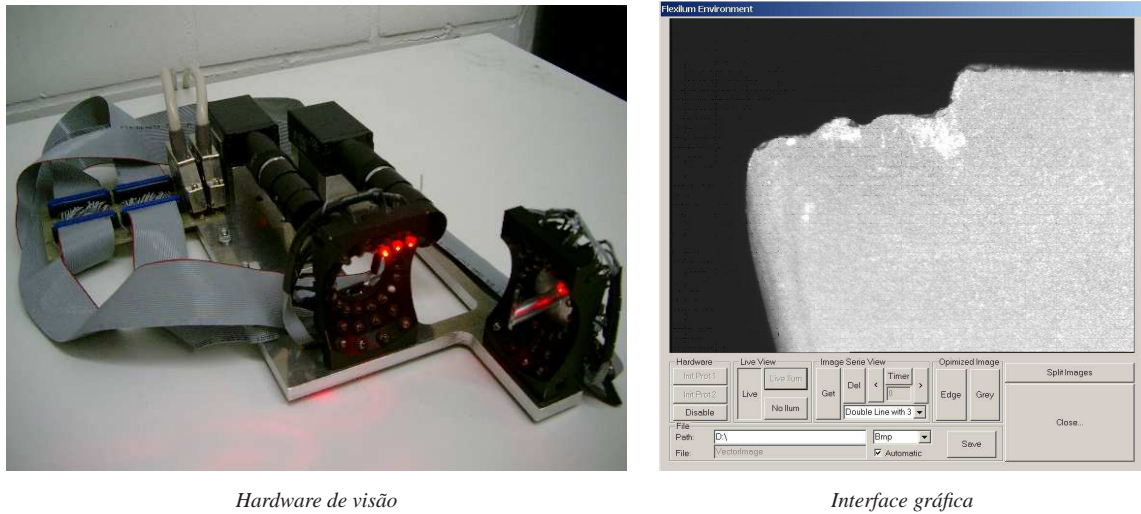


Figura 1.5: *Infraestrutura mecânica de integração da máquina-ferramenta com o sistema de visão.*

Fonte: Emydgio [26].

Pavim [1] e Emydgio [26], em seus projetos de fim de curso, finalizaram a construção e controle do novo módulo de iluminação e iniciaram a integração do protótipo do sistema à máquina-ferramenta. O *software* foi todo atualizado com a estrutura inicialmente implementada por Deschamps [25]. Pela primeira vez o sistema rodou completo de forma automática e os resultados puderam ser validados. Mas o sistema não era robusto suficiente para atender diversos tipos de ferramenta.

Na sequência, Deschamps [3], em sua dissertação, continuou o aprimoramento da estrutura de *software* do sistema TOOLSPY e retomou a construção de uma versão brasileira do protótipo para ser implantado em território nacional. Pesquisou novas técnicas de processamento de imagens, como a Transformada de *Wavelets* e as *Eigenfaces* para atacar o problema do desgaste.

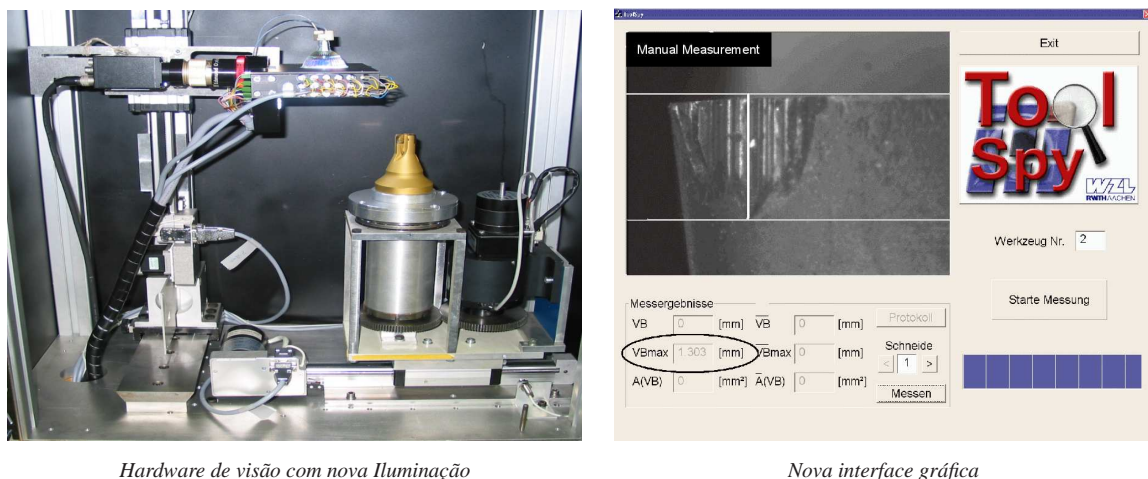


Hardware de visão

Interface gráfica

Figura 1.6: Protótipo e interface gráfica de aquisição de imagens antigo.
Fonte: Pavim [1].

De Moraes [24] desenvolveu seu projeto de fim de curso paralelamente a esta dissertação. Aprofundou-se na parte de *software* do projeto, buscando atingir melhorias para a cadeia de processamento de imagens de forma a tornar o sistema mais robusto e aplicável para diferentes tipos de ferramenta. Trabalhou com um novo módulo de iluminação necessário para generalizar a solução para uma gama maior de ferramentas [45]. Uma nova interface gráfica para o sistema TOOLSPY foi criada e a integração do sistema de visão com a máquina-ferramenta foi otimizada.



Hardware de visão com nova Iluminação

Nova interface gráfica

Figura 1.7: Nova interface gráfica do protótipo alemão do projeto TOOLSPY.
Fonte: de Moraes [24].

Por fim, próximo ao término deste documento, Adur [23] desenvolveu seu projeto de fim de curso, focando principalmente na robustez necessária aos algoritmos da cadeia de processamento de imagens encontradas no trabalho de de Moraes [24], e em aperfeiçoar o algoritmo de classificação do tipo de desgaste da ferramenta de corte, apresentado previamente por Orth [2] e Pavim [1].

1.6 Objetivos

Esta dissertação se encaixa no contexto do projeto SFB368 e teve suas tarefas realizadas parte no Brasil (Março de 2003 a Abril de 2005) e parte na Alemanha (Abril de 2005 a Junho de 2005), conforme um calendário de atividades definido pela cooperação entre o grupo S2i e o instituto WZL.

O trabalho tem por objetivos dar continuidade aos trabalhos previamente desenvolvidos na área, procurando aperfeiçoar as soluções já desenvolvidas, ampliar a referência bibliográfica e documentação do projeto e iniciar novas pesquisas, para que o objetivo principal de medição e classificação do desgaste em ferramentas de corte através de sistemas de visão seja atingido de forma robusta e satisfatória. Listam-se algumas das atividades necessárias para alcançar este objetivo:

- Aprimorar o projeto geral e a documentação do sistema, buscando aprofundar a revisão bibliográfica já disponível no âmbito do projeto acerca das diferentes soluções para o problema do monitoramento do desgaste, especialmente através de sistemas de visão.
- Reformular os sistemas óptico, de aquisição e iluminação do projeto, visando a aquisição de imagens adequadas da região do desgaste das ferramentas, tentando convergir para uma solução mais eficiente e robusta que não exija tanto esforço do sistema de processamento do conjunto.
- Manter o desenvolvimento de uma arquitetura de *software* modular orientada a objetos e independente de plataforma operacional para a criação de soluções flexíveis em sistemas de visão, utilizando o conceito de cadeias de processamento de imagens. Realizar ainda a comparação de desempenho desta arquitetura modular de *software* com métodos estruturais de programação.
- Aperfeiçoar as soluções já desenvolvidas (medição e classificação do desgaste de flanco das ferramentas), buscando extrair dos algoritmos de processamento de imagem uma solução mais genérica para ser aplicada a diversos tipos de ferramentas de corte. Tentar explorar ainda novas soluções para a detecção do desgaste de cratera das ferramentas.
- Aprimorar a interface gráfica do sistema já existente para a plataforma Windows¹¹ e criar uma para a plataforma Gnu/Linux¹², permitindo assim a validação e utilização da arquitetura de *software* do sistema pelos seus usuários.
- Continuar o desenvolvimento de um protótipo brasileiro do sistema de visão para implantação e testes em empresas do setor industrial nacional. Buscar convergir idéias em ambos os lados da cooperação, e propor melhorias para o atual protótipo alemão.

¹¹<http://www.microsoft.com/windows/>

¹²<http://www.gnu.org/>

- Realizar testes com o sistema em diferentes tipos de ferramentas de corte e validar a solução através de métodos de medição e classificação já existentes (microscopia óptica).

Por fim, incorporar os resultados obtidos neste trabalho ao protótipo do sistema desenvolvido na Alemanha, visando a apresentação dos resultados globais do projeto em um evento internacional organizado pelo instituto WZL, o *Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium – AWK*, nos dias 2 e 3 de Junho de 2005 em Aachen na Alemanha.

1.7 Principais Contribuições

O capítulo 7 apresenta os resultados deste projeto, mostrando como cada um dos objetivos acima traçados foram completamente ou parcialmente cumpridos. Aqui serão apenas listadas algumas das principais contribuições geradas ao longo deste trabalho para a otimização do projeto TOOLSPY:

- Otimizações e flexibilizações na cadeia de processamento de imagens do sistema, especialmente nos algoritmos de detecção, segmentação e classificação do desgaste, para expandir o suporte do sistema a mais de um tipo de ferramenta de corte.
- Realização de testes com três diferentes tipos de ferramentas, validando os resultados de classificação e medição do desgaste através de métodos tradicionais já empregados na indústria.
- Criação de um sistema de calibração automática do sistema de visão.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica simples para controle do sistema por usuários sem conhecimento aprofundado no assunto.
- Implementação do controle do sistema de manipulação das ferramentas de corte via rede CAN-bus e integração de um banco de dados com informações das diferentes ferramentas de corte analisadas pelo sistema.
- Reformulação do projeto de *hardware* do sistema de visão (sistemas óptico, de iluminação e aquisição).
- Ampliação da revisão bibliográfica e publicação de artigos.

1.8 Metodologia

Os passos tomados para o desenvolvimento das tarefas deste trabalho foram basicamente:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre temas relacionados à área de monitoramento de processos produtivos, como processos de fabricação metal-mecânica, desgaste em ferramentas de corte, técnicas de monitoramento, sistemas de visão e processamento de imagens.
- Prosseguir com o desenvolvimento do *software* e projeto do *hardware* necessários para a elaboração do protótipo de um sistema de visão capaz de medir e classificar o desgaste de diferentes tipos de ferramentas de corte.
- Terminar realizando os testes do sistema e incorporando os resultados obtidos ao protótipo desenvolvido na Alemanha para a divulgação dos mesmos no evento AWK e em congressos.

Para o desenvolvimento das atividades de *software* do sistema de visão, a metodologia adotada foi uma metodologia padrão utilizada tanto no instituto WZL na Alemanha quanto no grupo S2i no Brasil. Uma descrição de todas as etapas da metodologia (proposta, requisitos, análise, modelagem, implementação, testes e documentação) pode ser vista de forma detalhada no site da S2iDoc¹³.

Esta metodologia é derivada das etapas clássicas do projeto de *software* vistas em Engenharia de Software [46], sendo levemente adaptada para atender às necessidades do grupo de pesquisa, e passível de ser aplicada ao desenvolvimento de projetos em outros campos. A intenção é organizar o desenvolvimento do projeto em diversas etapas bem definidas, sendo que o início dos trabalhos de uma nova etapa está totalmente dependente da aprovação dos trabalhos finalizados na etapa anterior. Assim, foca-se a evolução das tarefas do projeto de forma metódica e bem documentada, facilitando a identificação de erros de projeto durante sua fase inicial, evitando maiores problemas de desenvolvimento em sua fase final.

1.9 Organização do Documento

No capítulo 1 deu-se ênfase na importância do problema abordado nesta dissertação, mostrando um cenário atual do setor industrial, justificando do ponto de vista econômico a necessidade da cooperação entre Brasil e Alemanha para atacar o problema da medição e classificação do desgaste em ferramentas de corte. Deu-se também um breve histórico dos projetos anteriores ligados ao tema presente desta dissertação. Por fim, apresentou-se um panorama dos objetivos a serem alcançados ao término deste trabalho e a metodologia usada para o desenvolvimento do mesmo.

Na sequência, o capítulo 2 apresenta alguns conceitos básicos sobre processos de fabricação metal-mecânica, ferramentas de corte e o desgaste de ferramentas de corte, buscando dar certo embasamento ao leitor sobre o problema que será abordado neste documento.

¹³<http://s2i.das.ufsc.br/docs/s2idoc/>

A seguir, o capítulo 3 explica um pouco sobre as Células Autônomas de Produção e principalmente sobre as técnicas de monitoramento usadas atualmente para inspecionar e melhorar os processos produtivos, dando ênfase ao monitoramento do desgaste em ferramentas de corte.

O capítulo 4 apresenta os fundamentos sobre sistemas de visão, visando dar o embasamento das diferentes tecnologias envolvidas no desenvolvimento destes sistemas, necessário para a compreensão do restante do trabalho. Resumem-se ao final do capítulo os diversos trabalhos publicados que abordam o tema de inspeção do desgaste em ferramentas através da tecnologia de visão.

No capítulo 5, apresenta-se boa parte da documentação do projeto, relatando sobre a estrutura de *hardware* e *software* do sistema TOOLSPY, e de que forma a solução procurou abordar o problema de identificação, classificação e medição do desgaste das ferramentas.

No capítulo 6 a parte de *software* que compreende mais especificamente a cadeia de processamento de imagens do sistema é explicada em mais detalhes, desde a etapa de aquisição das imagens, até as etapas de classificação e medição do desgaste.

Os resultados do projeto são apresentados no capítulo 7, onde é relatada a situação atual dos protótipos elaborados, uma validação das medições e classificações realizadas por comparação com processos de microscopia óptica e um resumo de todos os objetivos que foram alcançados.

Por fim, no capítulo 8 são feitas considerações finais sobre o trabalho e expõem-se perspectivas e possíveis soluções para objetivos não alcançados e para futuro aperfeiçoamento do projeto.

São apresentados ainda dois apêndices. O apêndice A apresenta um embasamento para o projeto dos componentes de *hardware* e *software* de um sistema de visão, abordando ainda diversas técnicas de processamento de imagens utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto, servindo de referência e base para o leitor que ainda não está familiarizado com esta área. Já o apêndice B reforça informações sobre os módulos e interfaces das bibliotecas de processamento digital de imagens usadas no projeto TOOLSPY.

Capítulo 2

Processos de Fabricação, Ferramentas de Corte e Desgaste em Ferramentas

Este capítulo discute conceitos básicos sobre a tecnologia de fabricação metal-mecânica, sua aplicabilidade em geral, os tipos de ferramentas de corte utilizados, suas características e por fim entra no problema do desgaste das ferramentas, visando apresentar ao leitor um conhecimento mínimo necessário à compreensão da solução que se pretende apresentar para o problema.

2.1 Processos de Fabricação Metal-Mecânica

Processos de fabricação existem desde épocas remotas, quando o homem descobriu que a transformação de matéria-prima da natureza poderia auxiliar em suas necessidades diárias (utensílios para sobrevivência) [47]. Com o desenvolvimento social, intelectual e econômico, a humanidade passou a exigir maior produção de bens de consumo, provocando o aparecimento de novas técnicas de fabricação, tornando esta atividade fonte potencial de renda pelo comércio de mercadorias manufaturadas.

O conceito de fabricação é definido em geral como o ato de transformar matéria-prima em produtos acabados por meio de diversos processos, seguindo uma sequência de passos previamente definidos e bem organizados [47, 48, 49]. Estes processos consistem basicamente na escolha de matéria-prima e ferramentas adequadas para a manufatura do produto acabado, além da elaboração de planos de processo apoiados em fatores técnicos e econômicos, visando alcançar o melhor desempenho do sistema de acordo com os custos, tempo e qualidade da produção.

Nota-se atualmente uma série de objetos cotidianos que ilustram a importância dos processos de fabricação na vida das pessoas. O desenvolvimento tecnológico, econômico e científico crescen-

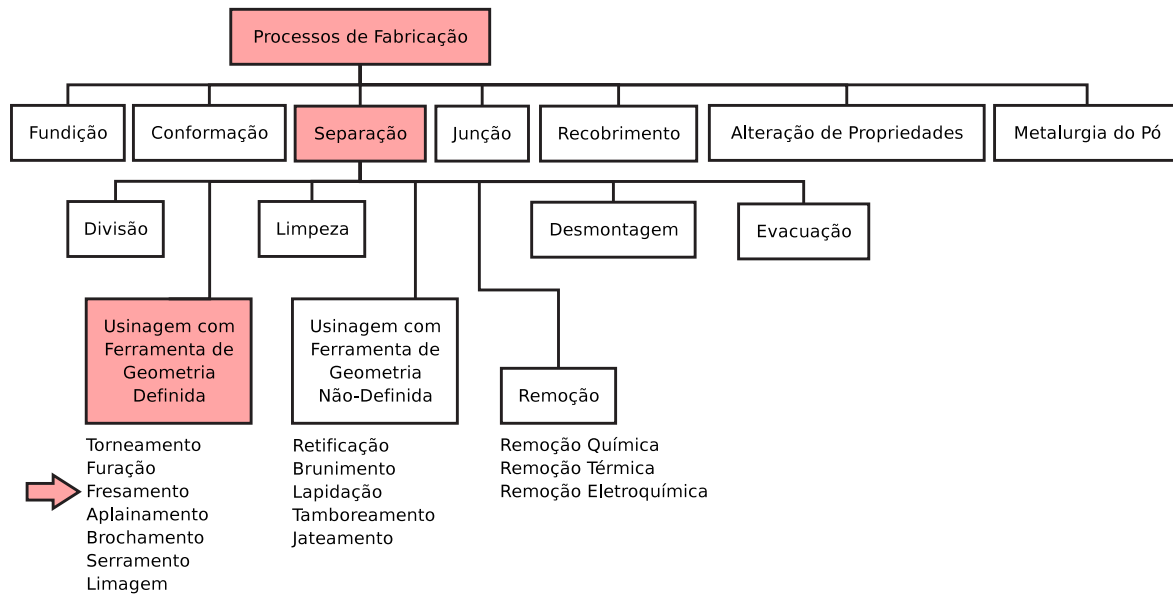


Figura 2.1: Classificação dos processos de fabricação metal-mecânica.

Fonte: Spur and Stöferle [49], atualizada a partir de Deschamps [3].

tes alavancaram e evidenciaram os processos de fabricação metal-mecânica como um dos principais fatores contribuintes para o crescimento do produto interno bruto de um país industrializado.

Devido ao crescimento acelerado da tecnologia de fabricação, existem hoje diversos tipos de processos diferentes, aplicados a áreas industriais específicas. Dá-se ênfase neste trabalho aos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, em especial o processo de fresamento, por ter sido escolhido pelo projeto SFB368 como um dos focos principais, devendo ser uma das primeiras soluções a serem incorporadas às Células Autônomas de Produção. A figura 2.1 ilustra uma possível classificação dos inúmeros processos de fabricação metal-mecânica existentes atualmente.

Os processos de usinagem caracterizam-se pela remoção de material (cavaco) de uma peça bruta (matéria-prima) até atingir a forma final para o produto com as dimensões especificadas [48]. No caso da usinagem por ferramenta de corte com geometria definida, utiliza-se uma ferramenta de geometria específica de acordo com o tipo do processo escolhido para remover o cavaco (normalmente de forma geométrica irregular). Estes processos ocorrem em ambientes agressivos, caracterizados por altas velocidades de corte e temperaturas geradas pelo contato entre peça e ferramenta.

A figura 2.2 ilustra o processo de remoção do cavaco por uma ferramenta de corte com geometria definida e as curvas de temperatura observadas durante o processo de usinagem, comprovando as altas temperaturas e o ambiente agressivo destes processos.

É importante salientar que boa parte da energia térmica gerada no contato da ferramenta com a peça é liberada junto com o cavaco retirado da mesma, pois caso contrário, o tempo de vida da

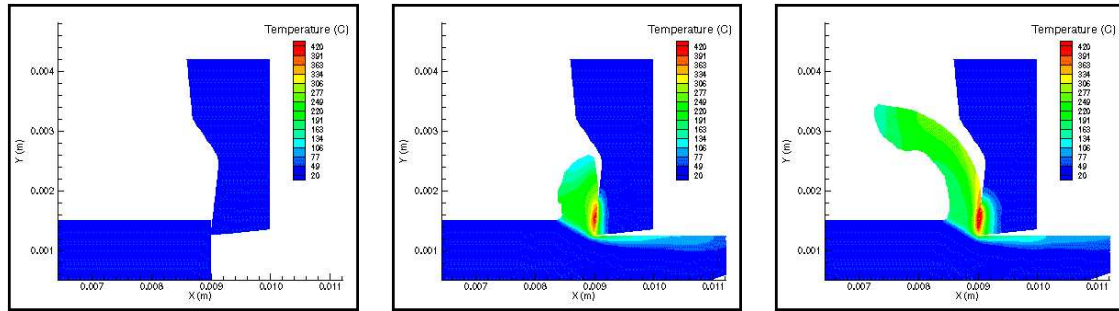


Figura 2.2: Remoção de cavaco e curvas de temperatura geradas durante usinagem.
 Fonte: Third Wave Systems, em <http://www.thirdwavesys.com/>.

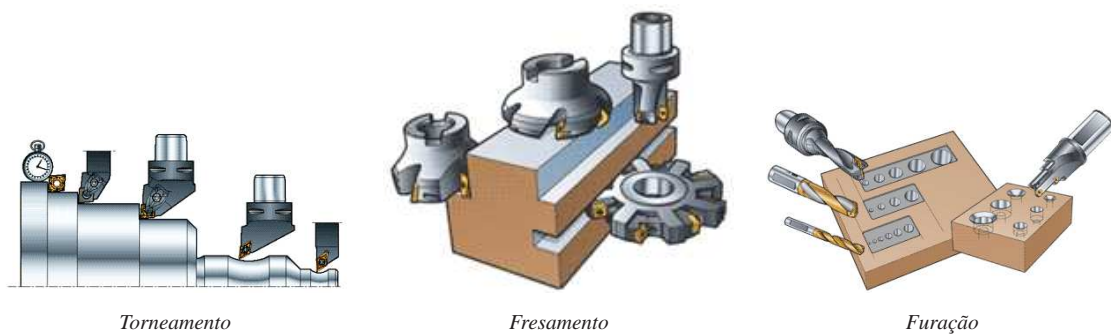


Figura 2.3: Alguns tipos de processos de usinagem com ferramenta de geometria definida.
 Fonte: Sandvik Coromant, em <http://www.coromant.sandvik.com/>.

ferramenta seria muito curto. Com frequência são usados fluidos de corte para diminuir ainda mais as temperaturas do processo de usinagem, auxiliando também a diminuir o desgaste das ferramentas.

A figura 2.3 ilustra alguns processos de usinagem com ferramenta de geometria definida. Nestes processos de fabricação, define-se uma série de parâmetros de corte para elaborar de forma precisa um plano de processo para a manufatura da peça. Dentre estes estão alguns movimentos e velocidades (de corte e avanço), assim como algumas grandezas (avanço e profundidade de corte). Mais detalhes sobre diferentes tipos de processos de fabricação podem ser vistos em [48, 49, 50, 51, 52, 53].

2.2 Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte são elementos responsáveis pela retirada de cavaco da peça bruta em processos de usinagem, através do contato de forma controlada e planejada com a mesma.

Existem diversos tipos de ferramentas de corte atualmente, para atender às características e necessidades de cada processo de usinagem. Elas diferem em sua geometria, material de composição, tipo de revestimento, podendo ainda ser mono ou multicortantes. Estas características influenciam significativamente alguns parâmetros de um processo de usinagem, como por exemplo, a formação dos cavacos, forças de corte, o desgaste das ferramentas, dentre outros [48, 54].

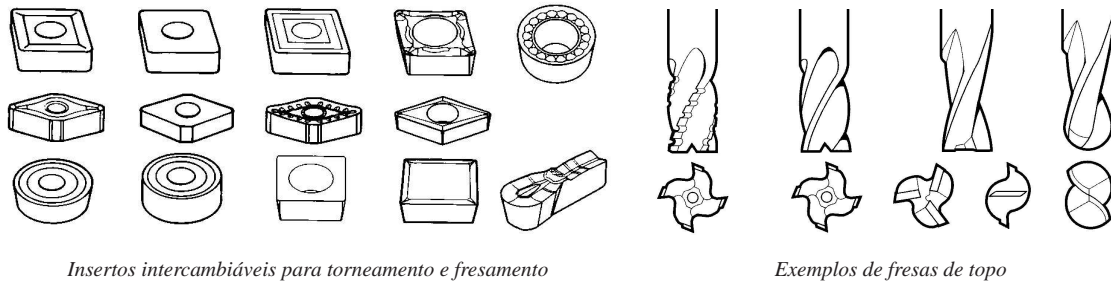


Figura 2.4: Exemplos de diferentes tipos de ferramentas de torneamento e fresamento.

Fonte: Klocke and König [48].

Para escolher o tipo correto de ferramenta para uma determinada operação de manufatura, deve-se levar em conta principalmente que tipo de matéria-prima será trabalhada, qual o melhor tipo de processo para se realizar a manufatura desta peça, e qual o grau de qualidade ou precisão superficial deseja-se alcançar para o produto final, pois a ferramenta deve em geral ser composta de um material mais resistente que a peça bruta para permitir a remoção de material.

A figura 2.4 ilustra diferentes tipos de ferramentas aplicadas em processos de torneamento e fresamento, com geometrias bem distintas. É comum a utilização de pastilhas montadas nos enxertos das hastes das ferramentas de corte, tanto as monocortantes, como também as multicortantes.

Segue uma terminologia geral para caracterizar as ferramentas geometricamente [4]:

Corpo: parte da ferramenta que segura as lâminas ou pastilhas de corte, ou na qual são produzidos os gumes (arestas cortantes).

Haste: parte pela qual a ferramenta é fixada para o processo de usinagem.

Parte Ativa: parte que compreende os elementos cortantes da ferramenta: gumes, face e flancos.

Base: superfície plana na haste da ferramenta, que orienta sua fabricação, afiação e medição.

Cunha: porção da parte ativa da ferramenta incluída entre a face e o flanco. Pode ser associada tanto ao gume principal como ao secundário.

Face: superfície sobre a qual o cavaco retirado da peça escoá.

Quebra-cavaco: ranhura integral na face destinada a controlar ou quebrar o cavaco.

Flanco: superfície da cunha voltada à correspondente superfície usinada da peça.

Gume: aresta formada pela face e flanco, destinada a efetuar o corte.

Quina: parte pequena na qual se encontram os gumes principal e secundário, normalmente curva.

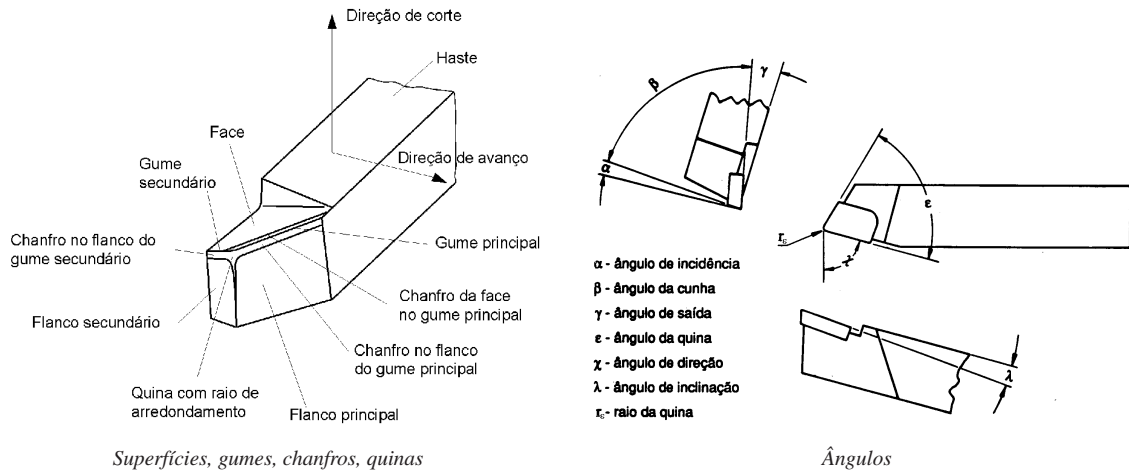


Figura 2.5: Terminologia associada a ferramentas de torneamento ou aplainamento.

Fonte: Klocke and König [48].

Na figura 2.5 tem-se uma ilustração da terminologia associada aos elementos de uma ferramenta de torneamento, onde definem-se ângulos, superfícies, gumes, chanfros e quinas, sendo o corpo (cunha de corte) delimitado pelas superfícies da ferramenta. Esta ferramenta possui 2 gumes (principal e secundário), sendo o principal aquele que movimenta-se na direção de avanço. Na interseção dos gumes forma-se a quina da ferramenta, em geral arredondada. Pela face da ferramenta deslizam os cavacos retirados da peça em contato. Os flancos principal e secundário são as superfícies que se justapõem às superfícies da peça durante o processo. Podem apresentar também chanfros na intersecção dos flancos com os gumes. No início de um processo de corte, a cunha da ferramenta penetra no material da peça, que se deforma elástica e plasticamente. Ao ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material da peça, o cavaco começa a escoar pela face da ferramenta.

Mais detalhes sobre ferramentas podem ser vistos em [4, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57].

2.3 Desgaste em Ferramentas de Corte

Como já mencionado anteriormente, os processos de usinagem ocorrem em ambientes agressivos, onde predominam altas temperaturas e tensões nos materiais devido ao contato e atrito da ferramenta com a peça, além da presença de cavacos e fluido de corte comuns ao processo. É normal, portanto, que as ferramentas sofram desgaste com o tempo. Alguns fatores são responsáveis por um processo mais ou menos acelerado de desgaste nas ferramentas, como por exemplo, o esforço pelo qual seja submetida a ferramenta conforme as condições de usinagem, o tipo de material da peça a ser manufaturada e também o próprio material da ferramenta [4].

As formas de desgaste mais frequentes e que afetam diretamente o resultado final do processo

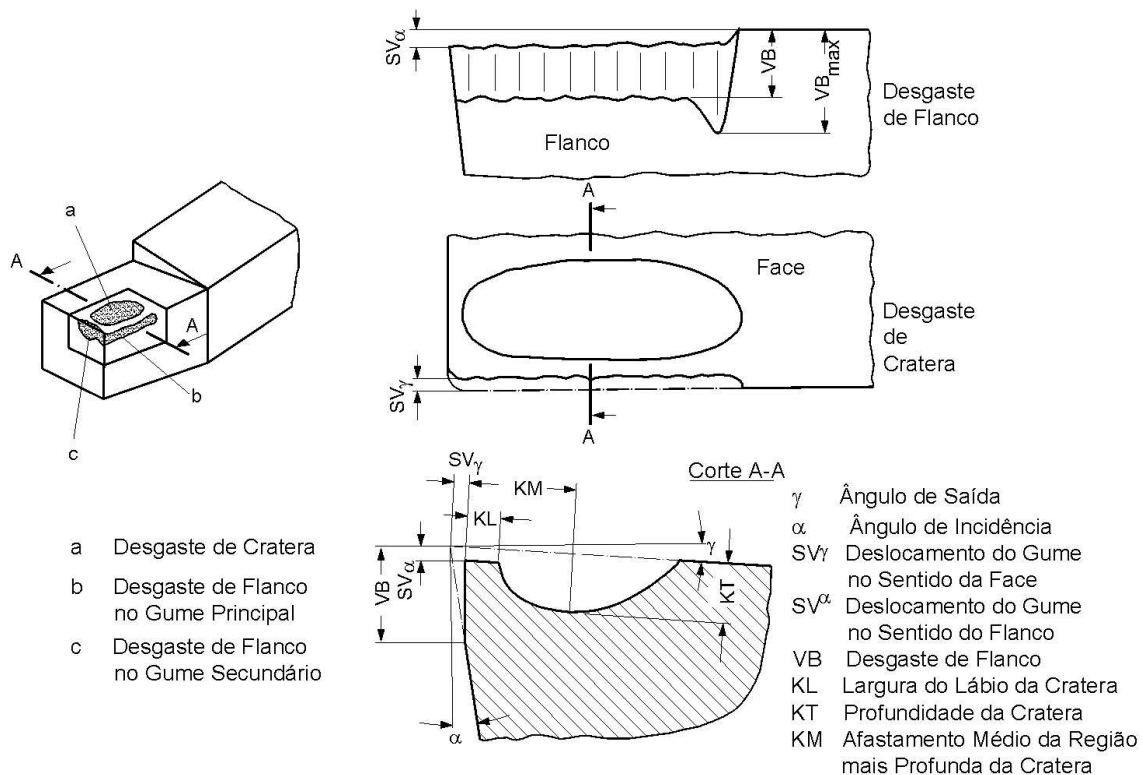


Figura 2.6: Desgaste de flanco e cratera evidenciados em uma ferramenta de torneamento.

Fonte: Klocke and König [48].

ocorrem na face e no flanco principal da ferramenta. No flanco secundário podem ocorrer desgastes por oxidação que exercem menor influência sobre as condições de uso da ferramenta [15].

O tipo de desgaste encontrado com maior incidência é o desgaste de flanco, e para processos com maiores velocidades de corte, aparece bastante também o desgaste de cratera. Ambos tipos de desgaste podem ser bem visualizados na figura 2.6, que mostra uma ferramenta de cunha de torneamento desgastada. Valores máximos para o desgaste de flanco ou de cratera são normalmente empregados como critérios para determinar a vida útil da ferramenta.

Dentre as grandezas medidas para se determinar o valor de desgaste e inferir sobre o tempo de vida útil da ferramenta, destacam-se o desgaste de flanco médio VB , o deslocamento do gume em relação ao flanco da ferramenta SV_α , o deslocamento do gume em relação à face SV_γ , a profundidade de cratera KT e o afastamento médio da cratera KM .

2.3.1 Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte

A maioria dos tipos de desgaste em ferramentas pode ser encaixada dentro de uma classificação. A figura 2.7 ilustra os tipos que são detalhados a seguir [4, 19, 48, 50, 54]:

Flanco: desgaste encontrado no flanco principal e na face da ferramenta, por onde sai o cavaco, devido ao atrito e às altas temperaturas do contato entre peça e ferramenta. Está intimamente ligado às forças de usinagem do processo.

Cratera: desgaste encontrado na face da ferramenta, de forma côncava, que ocorre devido ao atrito com o cavaco retirado da peça. Tem maior incidência quando há maiores velocidades de corte.

Deformação Plástica: desgaste encontrado no gume da ferramenta, quando o material desta amolece devido às altas temperaturas e escoamento forçado pelas forças de usinagem.

Entalhe: desgaste encontrado no flanco principal e na face da ferramenta, ao fim da área de corte, onde há maior contato do ar durante a usinagem. À medida que o entalhe cresce, a estrutura da face da ferramenta enfraquece e o acabamento superficial das peças piora.

Fissuras: desgaste encontrado nos gumes da ferramenta podendo ser transversal ou longitudinal, surgindo durante grandes solicitações sofridas em cortes interrompidos e alternantes.

Fratura: desgaste encontrado no flanco principal e na face da ferramenta, geralmente paralelo à borda superior, devido a sucessivas cargas e variações da força de corte em magnitude e direção no processo de usinagem.

Micro-Lascamento: desgaste encontrado nos gumes ou quina da ferramenta, devido a forças de corte excessivas, especialmente quando o material da ferramenta é demasiadamente frágil em relação ao material da peça usinada.

Quebra: desgaste excessivo da ferramenta. Ocorre a partir da piora de um estado de desgaste prévio da ferramenta, acarretando na perda de parte dos gumes, face e flancos da ferramenta.

Os desgastes de flanco e cratera ganham maior destaque neste trabalho, sendo que as variáveis mais importantes a serem medidas ou identificadas são o desgaste de flanco máximo VB_{max} , o desgaste de flanco médio VB , a área do desgaste de flanco A_{VB} , a largura do lábio de cratera KL e o afastamento médio da região mais profunda da cratera KM .

O tipo de material de composição das ferramentas de corte deve ser sempre levado em conta para a manufatura de uma peça, para evitar desgaste demasiado das ferramentas. Existem diversos tipos de ferramentas com composição diferente empregadas nos processos de fabricação atualmente. Alguns são mais resistentes ao desgaste e suportam maiores temperaturas e velocidades de corte. Outros possuem maior tenacidade e resistência à flexão [4, 54].

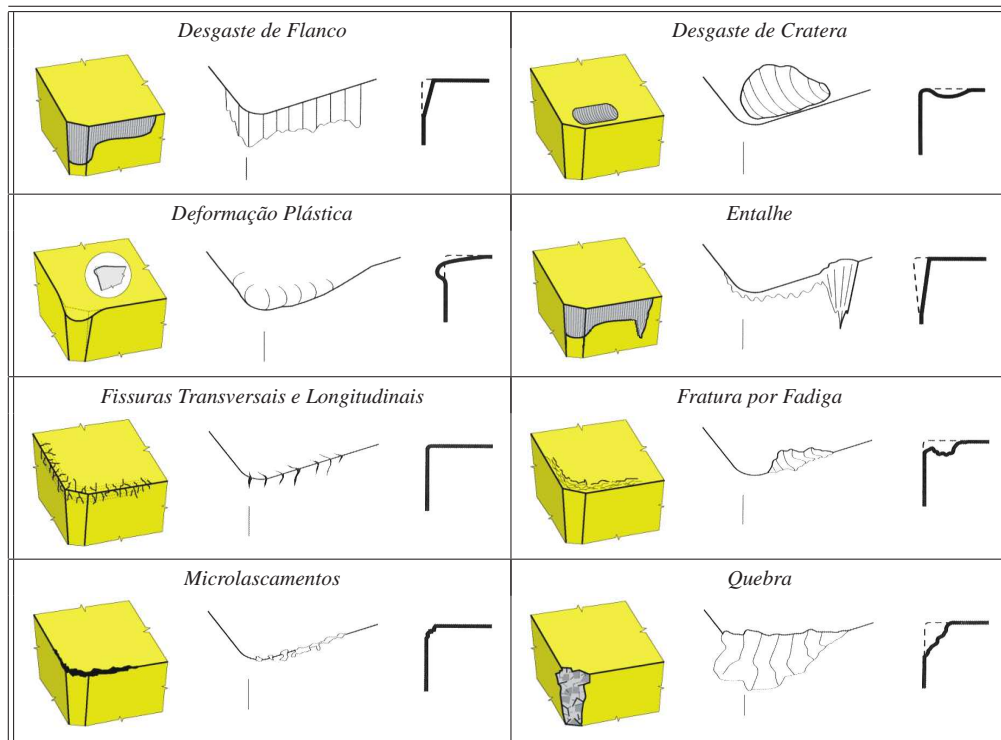


Figura 2.7: Classificação de diferentes tipos de desgaste em ferramentas de corte.

Fonte: Coromant [50] e Deutges [54].

Cronologicamente, os principais desenvolvimentos em materiais de ferramentas foram: Aço Ferramenta (1868), Aço-rápido (1900), Stellite (1910), Metal-duro (1926), Cerâmicas (1938), Nitreto de Boro Cúbico – CBN (década de 50), Diamante Mono e Policristalino (últimas décadas) [47].

A figura 2.8 mostra um quadro comparativo dos tipos de materiais de ferramentas de corte mais utilizados atualmente, de acordo com as características previamente mencionadas.

Para o projeto, há uma consideração especial pelas ferramentas de metal-duro não-revestido e revestido, por se tratarem de ferramentas de ampla utilização no mercado industrial, propiciando maiores oportunidades de aplicação da solução proposta. Tem-se certo interesse também no futuro de se focar ferramentas de CBN e diamante, por serem ferramentas extremamente caras, cujo desgaste não controlado pode trazer muitos prejuízos para o usuário.

2.3.2 Causas para o Aparecimento do Desgaste

Segue uma descrição das principais causas para o aparecimento do desgaste [4, 19, 48, 54]:

Abrasão Mecânica: fenômeno detectado pelo arrancamento de finas partículas de material da ferramenta, devido ao escorregamento sob alta pressão e temperatura entre peça e ferramenta.

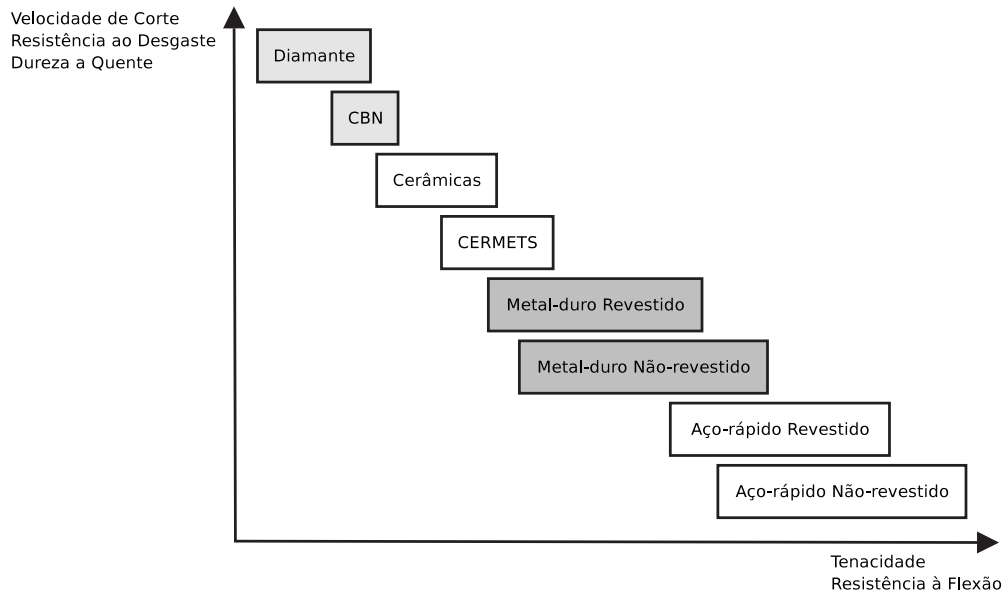


Figura 2.8: Quadro comparativo de tipos de materiais conforme a resistência ao desgaste.

Fonte: Klocke and König [48], atualizada por Deschamps [3].

Adesão: fenômeno que ocorre devido à ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte, acarretando no caldeamento de parte do cavaco retirado da peça junto à superfície da ferramenta, surgindo gumes postiços.

Difusão: fenômeno que ocorre sobre temperaturas mais elevadas na interface cavaco-ferramenta, onde as moléculas que formam a estrutura da ferramenta ganham certa mobilidade, misturando-se e formando ligas menos resistentes e mais propícias ao desgaste.

Oxidação: fenômeno detectado pelo aparecimento de cores de revenimento próximas da região de contato entre ferramenta e peça, em decorrência de elevadas temperaturas e a ação do oxigênio do ar, formando um filme de óxido ou "rugos" no local.

Correntes Elétricas Iônicas: fenômeno termo-elétrico que ocorre no contato entre peça e ferramenta, gerado do aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos (termopar).

Choques Mecânicos: resulta do contato brusco da ferramenta com a peça ou outra parte da máquina-ferramenta, acarretando em lascamentos, deformação ou até mesmo quebra da ferramenta.

Choques Térmicos: resulta da brusca variação de temperatura de uma ferramenta com temperatura elevada e a peça ou fluido de corte com temperatura bem mais baixa.

O desgaste é sentido de diversas formas durante a usinagem, como o aumento das vibrações físicas e acústicas da máquina e variação da temperatura na zona de corte. O desgaste pode ser controlado alterando-se os diferentes parâmetros do processo, como o avanço, a profundidade e velocidades

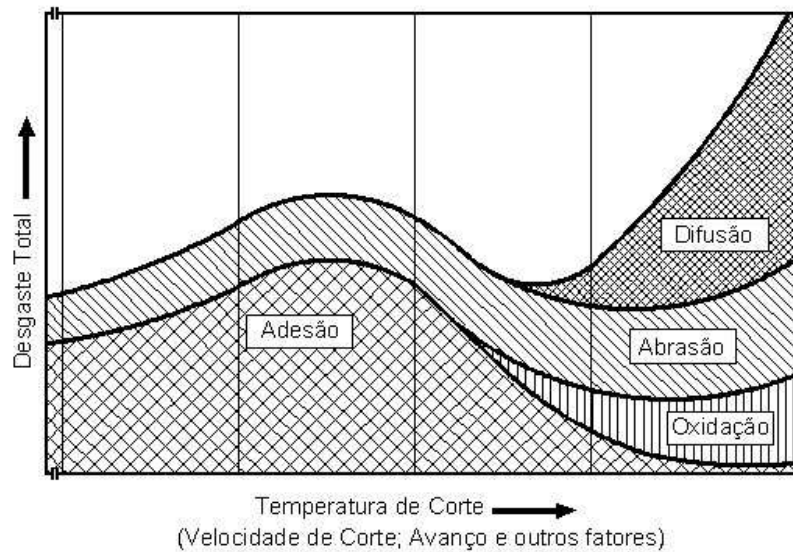


Figura 2.9: *Influência de parâmetros de processo no aparecimento do desgaste.*
 Fonte: Klocke and König [48].

de corte, e na escolha correta do material das ferramentas em relação ao das peças. A figura 2.9 ilustra como a variação de alguns destes parâmetros influencia no aparecimento do desgaste.

Mais detalhes sobre desgaste em ferramentas podem ser vistos em [4, 50, 52, 55, 56, 57].

Este capítulo tratou de questões básicas referentes aos processos de fabricação metal-mecânica e sua aplicabilidade, focando o uso de ferramentas de corte em processos de usinagem e introduzindo o problema do desgaste destas ferramentas, que afeta todo o sistema de produção. No capítulo seguinte serão apresentadas diversas técnicas para realizar o monitoramento do desgaste de forma preventiva, visando eliminar a produção defeituosa e diminuir os custos de fabricação.

Capítulo 3

Células Autônomas de Produção e Monitoramento de Processos

Devido à crescente exigência do mercado consumidor, o setor industrial tem sofrido mudanças substanciais em sua estrutura, transformando e melhorando continuamente a maneira como administra seu setor produtivo, visando atender à demanda por diversidade de produtos manufaturados a baixos custos, em curtos períodos de tempo e com um alto padrão de qualidade. Para cumprir com estes requisitos de produção, as indústrias tiveram de investir na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de monitoramento dos processos produtivos, buscando descobrir os parâmetros ótimos de produção convenientes a cada instante de tempo.

Este capítulo apresenta aspectos mais abrangentes sobre o projeto de Células Autônomas de Produção – APCs, e detalha diversos conceitos sobre as atuais tecnologias empregadas no monitoramento de processos produtivos, para assegurar um embasamento mínimo no assunto e expor a necessidade e validade da pesquisa realizada neste trabalho.

3.1 Células Autônomas de Produção

Para uma empresa se manter competitiva no mercado, ela deve atender à variedade de demanda de seus clientes, respeitando requisitos de custos, rapidez de entrega e qualidade exigidos. Atender estes requisitos significa exercer uma série de reorganizações e adaptações na linha produtiva da empresa, buscando atingir maior grau de automação, independência e autonomia dos processos, permitindo que estes operem por maiores períodos de tempo sem supervisão humana constante [1, 25].

Apesar de o setor industrial já apresentar alto grau de automação dos processos de manufatura, nota-se que sua interligação em conjunto numa célula de produção não é ideal. Ou seja, as células

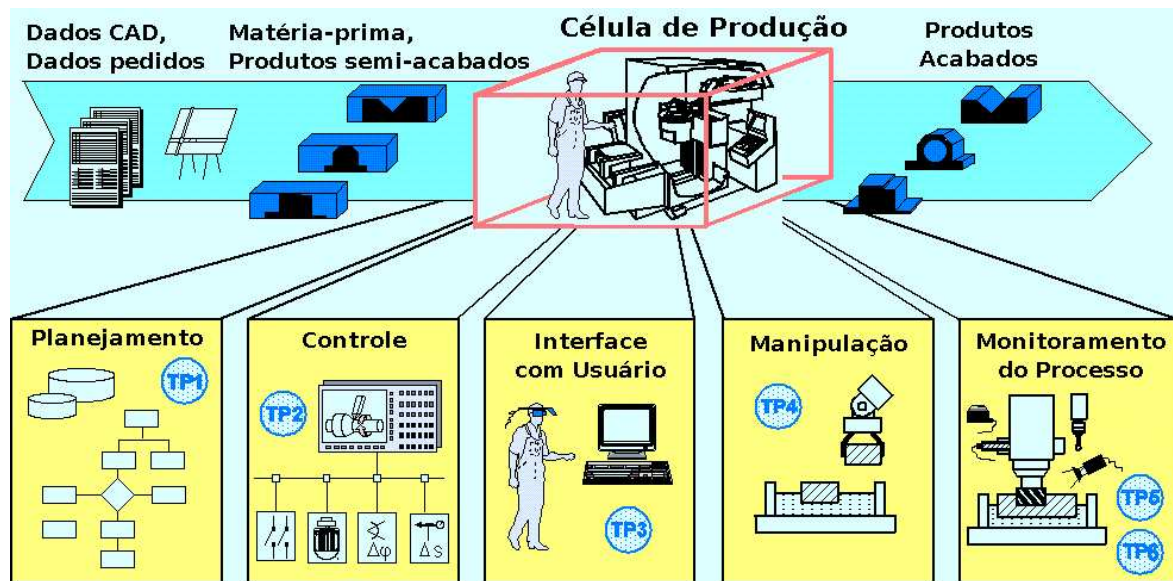


Figura 3.1: Integração de atividades necessárias à autonomia de uma célula de produção.

Fonte: Produktionszellen [21].

não possuem alto grau de independência e autonomia, que só é alcançado mediante aperfeiçoamento constante do *hardware* das máquinas-ferramentas e implementação de lógicas de controle robustas e tolerantes a faltas. Para atingir estes objetivos, institutos afiliados à RWTH-Aachen especializados em distintas áreas da engenharia se uniram dentro do escopo do projeto SFB368 para formar um Centro Colaborativo de Pesquisas na área de Células Autônomas de Produção. A pesquisa cobre desde aspectos de integração de tarefas de planejamento de processos até integração de sensores e atuadores nas máquinas-ferramentas para viabilizar um monitoramento eficiente dos processos [21].

Uma **Célula Autônoma de Produção** é um conjunto de *hardware/software* de manufatura autônomo que lida com atividades como planejamento da produção, controle de processos e máquinas, interfaceamento com usuário, manipulação de materiais e monitoramento de processos, sendo aplicadas de forma integrada, provendo alto grau de flexibilidade e independência à operação dos processos produtivos [21, 58], conforme ilustra a figura 3.1.

O conceito destas atividades e sua importância são descritos a seguir [1, 25]:

Planejamento de Processos: informações detalhadas de planos de processo e desenhos CAD são necessários para controlar as condições e sequências de operações dos processos de manufatura, para obter produtos finais em menor tempo, menores custos e com alto nível de qualidade.

Controle de Processos e Máquinas: controle sobre as operações dos processos e das máquinas-ferramentas é necessário para que estas possam operar de maneira autônoma e sincronizada por grandes períodos de tempo sem intervenção humana.

Interface com Usuário: apesar da autonomia das máquinas ser um requisito desejável às células de manufatura, é necessário prover ao usuário uma interface para operar a máquina, permitindo-o interferir no processo quando se fizer necessário.

Manipulação de Materiais: para garantir flexibilidade e variedade na linha de produção é necessário que o *hardware* das máquinas seja adequado à manipulação de diversos tipos de materiais.

Monitoramento de Processo: medir variáveis de processo e a qualidade final dos produtos manufaturados é importante para prover o sistema com informações atualizadas sobre o processo, através da realimentação destas informações às etapas de planejamento de processos.

Estas atividades devem ser desempenhadas de maneira interligada para gerar informações acerca de parâmetros importantes do processo, que serão realimentadas nas etapas de planejamento do processo, provendo um controle robusto de todas as operações seguintes e minimizando as chances de produção defeituosa. É importante que a célula reaja a falhas da forma mais independente possível durante seu funcionamento, detectando-as a partir das máquinas, das ferramentas, das peças ou do próprio ambiente e agindo para compensá-las de forma otimizada.

3.1.1 Conceito de Autonomia

Os objetivos do projeto SFB368 estão fortemente baseados no conceito de **Autonomia**, que pode ser definido em 3 aspectos, como explanado a seguir [58]:

- **Autonomia pela integração de tarefas adicionais:** Significa poder expandir as capacidades das máquinas-ferramentas, permitindo que estas passem a executar de forma autônoma e independente tarefas que antes eram desempenhadas com o auxílio de usuários humanos.
- **Autonomia em tolerância a falhas:** Trata-se da habilidade do sistema em executar operações de manufatura por completo de forma independente, levando em conta a possibilidade da ocorrência de falhas no sistema, buscando as melhores estratégias para tratá-las de forma autônoma.
- **Autonomia para o usuário:** Garante a integração e poder de decisão do usuário ao sistema. Apesar de o sistema ter de rodar de maneira autônoma e independente, ele não deve substituir todas as operações e intervenções humanas por tarefas automáticas. A interação do usuário com a célula deve ser possível a qualquer momento do processo.

3.2 Monitoramento de Processos de Fabricação

Ficou claro que para alcançar os requisitos de autonomia para uma Célula Autônoma de Produção é indispensável exercer um monitoramento constante dos processos de manufatura da célula, para realimentá-los com informações atualizadas sobre diversos parâmetros de processo e permitir o funcionamento contínuo e independente da produção.

São expostas a seguir as demais justificativas para exercer o monitoramento de processos de fabricação e detalham-se as diversas técnicas usadas atualmente para atacar este problema.

3.2.1 Justificativas para o Monitoramento

O monitoramento de processos de fabricação é geralmente empregado de forma preventiva, visando eliminar a produção defeituosa e a danificação de equipamentos de manufatura, buscando reduzir custos com refugo, aumentar a eficiência do processo e a qualidade final dos produtos [18, 19, 36, 59]. No caso das APCs o monitoramento é peça fundamental para satisfazer os requisitos de autonomia e independência do sistema.

Para monitorar é preciso espalhar sensores de medição em alguns pontos das máquinas-ferramentas, que retornem um sinal proporcional à variável sendo investigada. O valor deste sinal permite inferir sobre novos parâmetros para operação do sistema. O enfoque do monitoramento pode estar na máquina-ferramenta (análise de desempenho), na ferramenta de corte (desgaste, lubrificação e alinhamento), na peça sendo usinada (dimensões finais, características superficiais e rugosidade) ou até mesmo no ambiente do processo (tensões, temperatura, consumo de energia) [59, 60].

Muito importante é definir quais variáveis serão monitoradas, e por que meios isto será realizado. Com certeza esta tarefa não é trivial e pode variar de acordo com cada processo, devido às diferentes características e falhas inerentes a cada um. Vários tipos de sensores existem, e definir qual é mais adequado para um determinado processo, sua calibração e adaptação ao ambiente são tarefas que tornam a implementação de um sistema de monitoramento complicada [20]. O custo de mercado do sensor também é avaliado como um requisito importante, já que o valor unitário dos sensores mais comuns pode variar desde poucos dólares até milhares de dólares [16].

Em determinados casos, melhor do que experimentar e confiar em apenas um tipo de sensoramento, pode-se tentar uma fusão de alguns tipos de sensores adequados ao processo em questão, obtendo assim uma maior precisão na resposta dada pelo sistema de monitoramento [18, 19, 59, 61]. Técnicas inteligentes no processamento dos sinais retornados pelos sensores também podem ser aplicadas para aumentar a certeza sobre o estado atual do processo [18, 36, 59].

Para o caso mais específico do monitoramento de parâmetros de desgaste em ferramentas de corte, existe atualmente uma classificação das diferentes técnicas dedicadas a este tipo de medição, devido à grande diversidade de sensores existentes no mercado, conforme pode ser visto em diversos trabalhos publicados [15, 16, 17, 18, 19, 36, 37, 38, 40, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66] e é apresentado resumidamente na sub-seção seguinte.

3.2.2 Métodos de Monitoramento do Desgaste em Ferramentas

Os métodos de monitoramento ou sensoreamento de processos de fabricação são classificados basicamente em: métodos **diretos** e métodos **indiretos** de medição [15, 18, 59, 67].

Os métodos diretos buscam extrair informações da variável de interesse diretamente a partir do objeto em estudo, provendo maior exatidão e segurança nas medições, tendo em vista que a variável é extraída da fonte do sinal na unidade de medição desejada. Já os métodos indiretos avaliam algum parâmetro do ambiente no qual o objeto em estudo se encontra para inferir sobre a variável desejada. Ou seja, o sinal de alguma variável intimamente ligada ao objeto é adquirido e uma transformação deste sinal é realizada, permitindo inferir de forma indireta sobre parâmetros do objeto.

No caso específico do monitoramento do desgaste em ferramentas de corte, exemplos de medição direta do desgaste são possíveis através de microscopia óptica, ou por visão computacional, onde imagens das próprias ferramentas (objeto em estudo) são analisadas. Exemplos de medição indireta neste caso seriam possíveis pela análise de sinais acústicos da operação de usinagem, sinais de vibração mecânica da máquina-ferramenta, sinais da força aplicada no corte, sendo que a partir da análise destas variáveis auxiliares procura-se inferir sobre o nível de desgaste da ferramenta.

Pode-se ainda avaliar estes métodos diretos e indiretos como técnicas **contínuas** e **intermitentes**, de acordo com a frequência de aquisição de dados do processo, e também como técnicas **pós- e em processo**, caso a medição seja realizada após ou durante o processo de manufatura [15, 18, 59].

Existem ainda métodos de monitoramento mais avançados, como por exemplo as técnicas de sensoreamento inteligente e de multi-sensoreamento (fusão de sensores). No sensoreamento inteligente os próprios sensores já possuem capacidade de realizar em parte ou por completo o processamento do sinal adquirido e tomar decisões localmente de acordo com a interpretação deste sinal [2]. No multi-sensoreamento, faz-se uso de uma variedade de sensores paralelamente para obter maior robustez e segurança nas medições realizadas [15].

Diferentes métodos de monitoramento direto, indireto, sensoreamento inteligente e multi-sensoreamento do desgaste em ferramentas de corte são comparados e exemplificados nas sub-seções seguintes. A figura 3.2 ilustra estes métodos de acordo com sua classificação.

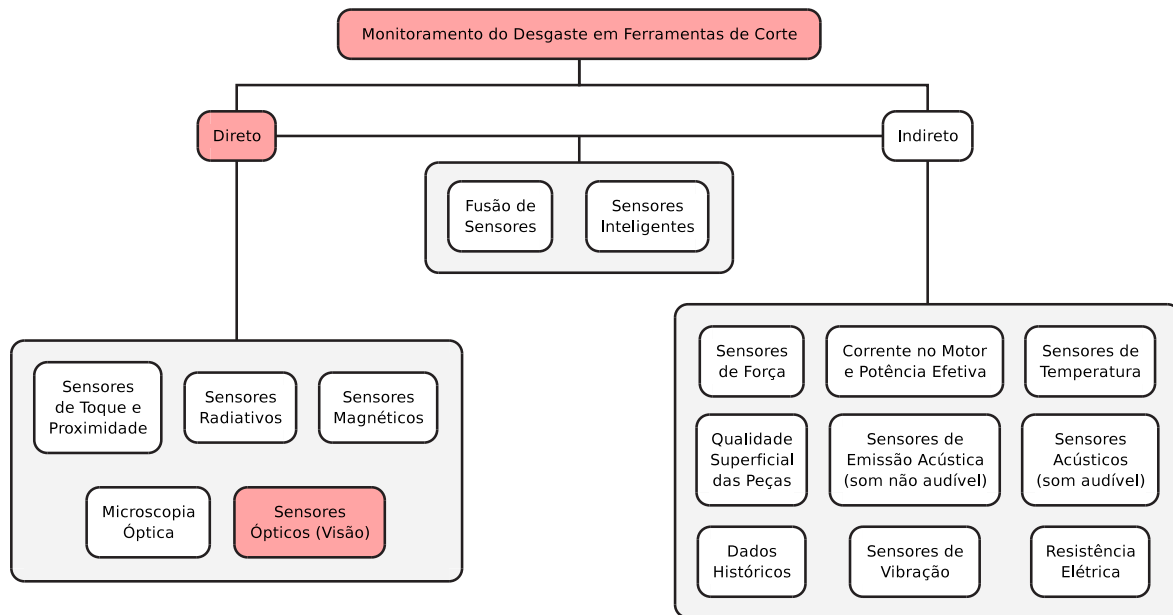


Figura 3.2: *Métodos de monitoramento de processos de manufatura.*

Fonte: Kurada and Bradley [68], atualizada a partir de Deschamps [3].

Métodos Indiretos

Os métodos indiretos de monitoramento visam analisar parâmetros do ambiente no qual o objeto em estudo (a ferramenta) se encontra para inferir indiretamente sobre a variável desejada. Desta forma, o sinal de alguma variável auxiliar ligada ao objeto em estudo é adquirido e transformado/mapeado em um novo sinal, que reflete uma aproximação da variável da qual se deseja medir [2, 15, 59]. O problema destes métodos é que a medição das variáveis auxiliares é normalmente influenciada por diversos parâmetros do processo, e não apenas pelo comportamento do objeto em estudo. Isto pode levar a mapeamentos incorretos caso a influência de outros parâmetros do processo (ruído) for forte. Em geral estes métodos são também classificados como “contínuos” e “em processo”, pois avaliam o objeto ao longo da operação de usinagem.

Seguem os principais métodos de sensoriamento indireto do desgaste em ferramentas de corte:

- **Sensores de Força:**

É um dos métodos mais usados e difundidos atualmente, onde a força de corte, ou uma derivada de suas componentes (torque, potência de acionamento, deslocamento da ferramenta) é medida para inferir indiretamente sobre o estado atual de desgaste da ferramenta, pois sabe-se que o aumento do desgaste reflete num aumento das componentes da força de corte do processo.

Há diversas formas para medir as componentes da força de corte. Dentre as mais comuns está o uso de dinamômetros montados no dispositivo de fixação da ferramenta, para monitorar uma ou

mais componentes da força em direções ortogonais, baseando-se em princípios piezelétricos.

Outra alternativa é o uso de finos discos ou anéis de medição de força com elementos piezelétricos embarcados, que medem parte da força total aplicada no processo de corte.

Ainda existem outros tipos, como sensores de deformação de elementos que movimentam eixos da máquina (baseado em resistência) e sensores de deslocamento da torre da ferramenta.

A análise do sinal proveniente destes sensores se faz necessária para determinar o momento ideal de troca da ferramenta. Porém, esta análise costuma ser complexa pelo fato de que vários outros parâmetros, além do desgaste da ferramenta, influenciam no aumento das forças de corte de um processo de usinagem, como por exemplo, a geometria da ferramenta, a existência de quebra-cavacos, as propriedades do material da ferramenta, dentre outros. Assim o mapeamento das forças de corte para o nível de desgaste da ferramenta pode ser prejudicado por estes ruídos no sinal.

Pesquisas nesta área podem ser vistas em [14, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81].

- **Sensores de Emissão Acústica:**

O processo de usinagem produz ondas de energia elástica liberadas por diferentes fontes com altíssima frequência, não-audíveis ao ouvido humano, que se propagam por toda máquina-ferramenta. As fontes mais significativas destes sinais são: o atrito da face e do flanco da ferramenta com a peça, a deformação plástica na região do corte, a formação de trincas na ferramenta, os impactos do cavaco na peça e no quebra-cavaco. Nota-se que grande parte das componentes destes sinais acústicos está intimamente ligada ao processo de desgaste das ferramentas. Ainda assim deve-se tomar o cuidado de retirar do sinal componentes provenientes de outras fontes de ruído do ambiente. Amplificadores de sinal, filtros e demais componentes eletrônicos costumam ser usados para fazer estas etapas de pré-processamento do sinal.

Uma aplicação comum para este tipo de sensor é a detecção da quebra da ferramenta, pois este fenômeno gera um sinal acústico de alta amplitude facilmente identificado por esta aplicação.

Grande parte dos sensores acústicos existentes não suportam as características agressivas do ambiente do processo de usinagem, porém, nos últimos anos alguns sensores acústicos foram desenvolvidos especialmente para este objetivo, possibilitando a instalação dos sensores na superfície da máquina-ferramenta próximo à região de corte. A pesquisa nesta área já está bem evoluída e já permite até mesmo usar esta técnica para processos de usinagem de alta precisão.

Trabalhos relevantes nesta área são [8, 34, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88].

- **Sensores Acústicos:**

Este método já se baseia em adquirir através de microfones comuns sons de baixa frequência, audíveis ao ouvido humano, normalmente correlacionados às vibrações mecânicas da máquina-ferramenta durante o processo de usinagem. O objetivo é tentar corrigir os parâmetros de processo para diminuir e eliminar as vibrações da máquina.

É um processo simples e de baixo custo. A dificuldade de implementação desta técnica é eliminar os ruídos provenientes do som emitido por outras fontes, como demais máquinas-ferramentas em operação no ambiente, motores, operadores, movimentação do *magazine*.

Outras fontes sobre este tipo de monitoramento são [16, 18, 89].

- **Sensores de Vibração:**

Devido à flutuação dos diversos parâmetros de corte ao longo do processo de usinagem, variam também as vibrações mecânicas no sistema, sendo possível realizar uma relação do estado de desgaste da ferramenta pelo nível de vibração mecânica do sistema.

A medição das vibrações consiste em instalar na superfície superior da ferramenta de corte um acelerômetro piezelétrico, o mais próximo possível do gume de corte. Desta forma, o sinal proveniente do sensor é constantemente comparado com uma referência, e o desgaste da ferramenta fica evidenciado quando o sinal do sensor ultrapassar esta referência.

Algo mais sobre esta técnica pode ser visto em [9, 90, 91].

- **Sensores de Temperatura:**

As altas temperaturas que caracterizam os processos de usinagem também podem ser monitoradas e relacionadas ao processo de desgaste em ferramentas de corte.

O calor dos objetos é transferido através de três meios distintos: convecção, condução e radiação. Existem diferentes sensores para medição de temperatura a partir de um destes meios e a escolha do mais apropriado normalmente depende das faixas de temperatura e com que resolução se deseja medir. Os sensores mais comuns usados para estas aplicações são termopares e câmeras infra-vermelho. Termopares costumam ser soluções extremamente econômicas em relação às câmeras infra-vermelho, porém, são de difícil instalação para sensoreamento contínuo próximo à ferramenta. No caso de sensores infra-vermelhos, realiza-se a captura de sinais com grandes comprimentos de onda do espectro luminoso, invisíveis ao olho humano, e que são mapeados para um conjunto de cores visíveis representando o nível de temperatura do objeto analisado. Desta forma, o processamento da imagem levaria a uma estimativa do desgaste da ferramenta pela análise das curvas de temperatura do processo.

A partir do controle da temperatura do ambiente da máquina-ferramenta, das proximidades da região de corte, da peça usinada, ou do cavaco retirado é possível corrigir os parâmetros de usinagem para evitar um crescimento acelerado do desgaste das ferramentas.

Mais detalhes sobre esta técnica podem ser vistos em [16, 18, 35, 92].

- **Medição da Corrente no Motor e da Potência Efetiva:**

A aplicação de sensores para a medição das correntes elétricas dos motores e da potência efetiva dos acionamentos da máquina-ferramenta é uma das alternativas mais simples do ponto de vista técnico, e menos custosas, do ponto de vista econômico.

Existe uma grande variedade de sensores para este tipo de monitoramento, e em geral estes são escolhidos de acordo com o tipo do motor que faz o acionamento da máquina-ferramenta. Um exemplo simples é a aplicação de uma bobina colocada ao redor dos cabos de alimentação dos motores de acionamento da máquina-ferramenta.

Há uma desvantagem no uso deste método, pois o sinal medido possui uma componente devido ao atrito e estado de lubrificação das guias da máquina-ferramenta, que exercem forte ruído à medição das componentes que realmente interessam no sinal.

Autores que trabalharam com este método foram [76, 93].

- **Medição da Resistência Elétrica entre Peça e Ferramenta:**

O monitoramento da resistência elétrica entre a peça sendo usinada e a ferramenta de corte também pode servir como parâmetro para a análise do estado de desgaste da ferramenta, pois sabe-se que conforme o desgaste aumenta, também aumenta a distância entre a superfície da peça e da ferramenta, aumentando, conseqüentemente, a resistência elétrica entre ambos.

Este método tem aplicabilidade reduzida, principalmente na presença de fluido de corte. O cavaco retirado das peças usinadas também dificulta a medição da resistência elétrica.

Outras fontes sobre este método são [16, 18].

- **Inspeção da Qualidade Superficial das Peças:**

Através da análise da rugosidade e textura de superfícies usinadas é possível avaliar se a ferramenta ainda encontra-se própria para a operação de corte ou se já deve ser descartada.

Os principais tipos de sensores usados para esta inspeção de qualidade são os sensores de feixes ultra-sônicos, feixes de laser, profilômetros e os sensores ópticos.

Em geral, este tipo de medição é pós-processo, e requer que a peça usinada esteja limpa, ou seja, sem a presença de fluido de corte ou cavacos ligados a sua superfície, que se tornariam

ruídos inconvenientes para estes tipos de medição.

Maiores informações sobre esta técnica podem ser vistas em [16, 18, 94, 95].

- **Estimativa a partir de Dados Históricos:**

Apesar desta técnica não ser exatamente uma técnica de monitoramento de processo propriamente dita, ela é ainda bastante utilizada para a realização de um controle estatístico do tempo de vida das ferramentas de corte [3].

Basicamente são realizados diversos ensaios de usinagem de algumas peças com determinados tipos de ferramentas de corte, e informações acerca do desgaste médio apresentado pelas ferramentas em diversos estágios dos ensaios são guardadas e utilizadas posteriormente de forma estatística para futuras operações de usinagem.

O grande problema desta técnica é que grande parte das ferramentas acaba sendo subutilizada, sendo em alguns casos descartadas muito tempo antes do necessário.

Métodos Diretos

Os métodos diretos de monitoramento visam extrair informações da variável de interesse do processo diretamente a partir do objeto em estudo (a ferramenta), fornecendo informações mais exatas e seguras de medição, tendo em vista que a variável é extraída da fonte do sinal na unidade de medição desejada [2, 15, 59]. Grande parte destes métodos é também classificado como “intermitente” e “pós processo”, por necessitarem que o objeto em análise não esteja sendo utilizado no processo para que seja inspecionado, acarretando na parada do processo produtivo para a realização da medição.

- **Sensores de Toque e Proximidade:**

Tratam-se de pequenas “agulhas de contato” elétricas ou pneumáticas que percorrem a superfície da peça usinada para medir com precisão suas dimensões finais. Desta forma, o mapeamento da superfície da peça realizado pelo sensor é comparado com as dimensões reais da peça encontradas em seu desenho CAD, possibilitando monitorar a variação da distância entre o gume principal da ferramenta e a peça sendo usinada para avaliar o nível de desgaste das mesmas e atualizar os parâmetros de corte do processo.

Porém, este método possui algumas limitações, pois a medição só é possível com a máquina parada, e com a peça limpa, ou seja, sem a presença de fluido de corte ou cavaco em sua superfície. Perturbações ainda são sofridas devido à expansão térmica da ferramenta e a vibração da peça e da ferramenta devido ao aumento das forças de corte do processo.

Mais informações sobre este tipo de sensoreamento em [16, 68].

- **Sensores Radioativos:**

Medem o desgaste das ferramentas ao avaliar a quantidade de material radioativo presente nas mesmas. Antes do início do processo de usinagem, uma pequena quantidade de material radioativo é implantada nas faces principal e secundária da ferramenta até uma determinada profundidade e de forma homogênea. Durante o processo de usinagem, parte deste material é removido junto com o cavaco retirado das peças usinadas.

A análise do desgaste ocorre ao verificar a quantidade de material radioativo que encontra-se presente no cavaco retirado. Devido à dificuldade de se realizar uma coleta e análise contínua do cavaco retirado durante o processo, e também da natureza perigosa dos materiais radioativos, estas técnicas limitam-se aos ambientes de experimentação em laboratório.

Demais referências sobre este método podem ser encontradas em [18, 68]

- **Sensores Magnéticos:**

De forma bem semelhante ao sensoreamento radioativo, o sensoreamento magnético consiste em magnetizar as pastilhas das ferramentas de corte e monitorar continuamente o fluxo de perda desta propriedade magnética conforme a ferramenta vai se desgastando. Este tipo de medição é aplicável do ponto de vista econômico [19, 96], mas como no sensoreamento por radioatividade, tecnicamente pode não ser tão conveniente.

- **Microscopia Óptica:**

Trata-se de uma medição manual e um tanto quanto subjetiva. A medição do desgaste é realizada pelo próprio operador da máquina-ferramenta, ou por um técnico especializado na área, sendo necessário que o processo seja parado para que a ferramenta seja levada para um laboratório, onde um microscópio pode ser usado para fazer a medição [4].

Apesar do microscópio ter uma boa resolução para a medição, o único parâmetro do desgaste que pode ser avaliado com maior precisão é o desgaste de flanco máximo (VB_{max}), mas que ainda assim depende do correto posicionamento da ferramenta sob as lentes do microscópio. Já a medição do desgaste de flanco médio depende exclusivamente da experiência do operador, que conforme sua percepção, infere onde esteja exatamente o valor médio do desgaste ao analisar a imagem ampliada do mesmo no microscópio. É fácil perceber que diferentes operadores podem inferir este parâmetro de forma levemente variada, sendo portanto, um método não muito confiável de medição, podendo levar a interpretações falsas sobre o tempo de vida útil da ferramenta. Também não há como medir a área do desgaste através deste método.

- **Sensores Ópticos (Visão):**

Esta é uma técnica bem conhecida, onde empregam-se sensores de fibra óptica [97], fotodiodos, câmeras de aquisição de imagem linear (*laser*) [98] e câmeras de aquisição de imagem matricial [12] (sensores CCD e CMOS) para a inspeção do desgaste em ferramentas de corte.

Dentre estes sensores, destacam-se atualmente as câmeras de aquisição de imagens (lineares ou matriciais), que são componentes fundamentais para a implementação da inspeção por sistemas de visão, ou visão computacional. Dentre as diversas técnicas de monitoramento de processos de fabricação já citadas, estas são algumas das técnicas mais recentes para este fim, e apresentam um dos melhores resultados de medição, principalmente por tratar-se da medição direta do desgaste a partir de uma imagem da ferramenta.

Os sistemas de visão em geral fazem uso de técnicas de processamento de imagens para realizar medições em determinadas áreas de interesse do objeto em estudo. Para a aquisição de boas imagens, faz-se necessária a escolha de um bom módulo de iluminação e um conjunto óptico adequado para o sistema, que permitam realçar as características da região de interesse do objeto em estudo e prover boa e correta magnificação do mesmo.

No caso da análise do desgaste, a escolha de um tipo adequado de iluminação auxilia a realçar a área do desgaste da ferramenta, que normalmente possui características reflexivas diferentes do restante da superfície da ferramenta. Um conjunto óptico potente deve ser utilizado para prover magnificação suficiente da área do desgaste, diminuindo os erros de medição. Nota-se que a escolha incorreta destes conjuntos ópticos e de iluminação pode inviabilizar completamente a implementação de tal sistema, pois o sucesso da aplicação está fortemente ligado às características reflexivas da região do desgaste das ferramentas.

Diversas pesquisas demonstram a aplicação destes sistemas para o monitoramento dos desgastes de flanco e cratera de ferramentas de corte. As pesquisas sobre a medição do desgaste de flanco [5, 11, 12, 29, 31, 99, 100, 101] encontram-se mais maduras, por tratar-se de uma aplicação relativamente mais simples do que a medição do desgaste de cratera. Isto se deve à necessidade de se aplicar técnicas de iluminação estruturadas ou utilização de visão estéreo (visão 3D) para a realização da medição da profundidade da cratera [39, 102, 103, 104, 105].

É importante salientar a grande vantagem deste tipo de sistema em relação aos demais, pois permite a medição de diversos parâmetros do desgaste ao mesmo tempo (VB , VB_{max} , A_{VB}), os quais não podem ser todos extraídos através das demais soluções já citadas. Pela análise da imagem e a utilização de técnicas de inteligência artificial, ainda é possível elaborar um sistema de classificação do tipo de desgaste encontrado (flanco, cratera, entalhe, trincas, quebra, dentre

outros), que pode ser usado para a decidir sobre o tipo de operação de usinagem para o qual a ferramenta ainda encontra-se em bom estado [7, 68].

Devido ao ambiente agressivo dos processos de usinagem, boa parte das aplicações realizadas por visão computacional são intermitentes e pós-processo. Em geral, uma estação de medição é elaborada para adaptar-se junto à máquina-ferramenta, permitindo uma medição mais rápida e precisa do que as medições feitas por microscopia óptica em laboratório.

Uma variante ainda ao uso de câmeras CCD ou CMOS, comuns para a aquisição das imagens das ferramentas, é a utilização de câmeras infra-vermelho, já anteriormente mencionadas. Porém, trata-se de uma técnica de medição indireta por análise de curvas de temperatura.

Mais sobre a tecnologia de sistemas de visão pode ser encontrado no capítulo 4, já que a solução final para o monitoramento do desgaste das ferramentas apresentada neste documento baseia-se nesta tecnologia. Outros trabalhos nesta área são [41, 106, 107, 108, 109, 110, 111].

Fusão de Sensores

Como foi possível notar nas descrições anteriores, é comum que um determinado tipo de sensor apresente resultados mais eficazes para o monitoramento de uma característica específica do processo, mas em geral, devido à constante presença de ruídos nas medições, pode ainda assim não refletir uma condição exata do desgaste encontrado nas ferramentas de corte.

A combinação, ou fusão de mais de um sensor para o monitoramento do desgaste, pode gerar uma solução muito mais robusta, por analisar diversas fontes de sinais provenientes de origens distintas, tendo o sistema de monitoramento amplas condições de discernir sobre a qualidade das informações apresentadas pelos diferentes sensores [18, 19, 59].

Sick [18] coloca que um sistema de monitoramento multi-sensorial do desgaste em ferramentas consiste de algumas etapas básicas, como: aquisição de dados dos sensores, pré-processamento analógico e/ou digital dos dados (amplificação, filtragem), extração das características importantes (processamento dos dados no domínio do tempo e da frequência), medição e avaliação do desgaste (simples *threshold*, inteligência artificial, sistemas especialistas, reconhecimento de padrões) e por fim, tomada de decisão (realimentação de dados no processo). Cho et al. [61], de Souza [59], Du et al. [37] e Jemielniak and Kosmol [65] também apresentam uma arquitetura semelhante para um sistema multi-sensor. Estas etapas podem ser visualizadas na figura 3.3.

Outros trabalhos publicados sobre multi-sensoreamento são [6, 10, 112, 113, 114, 115, 116].

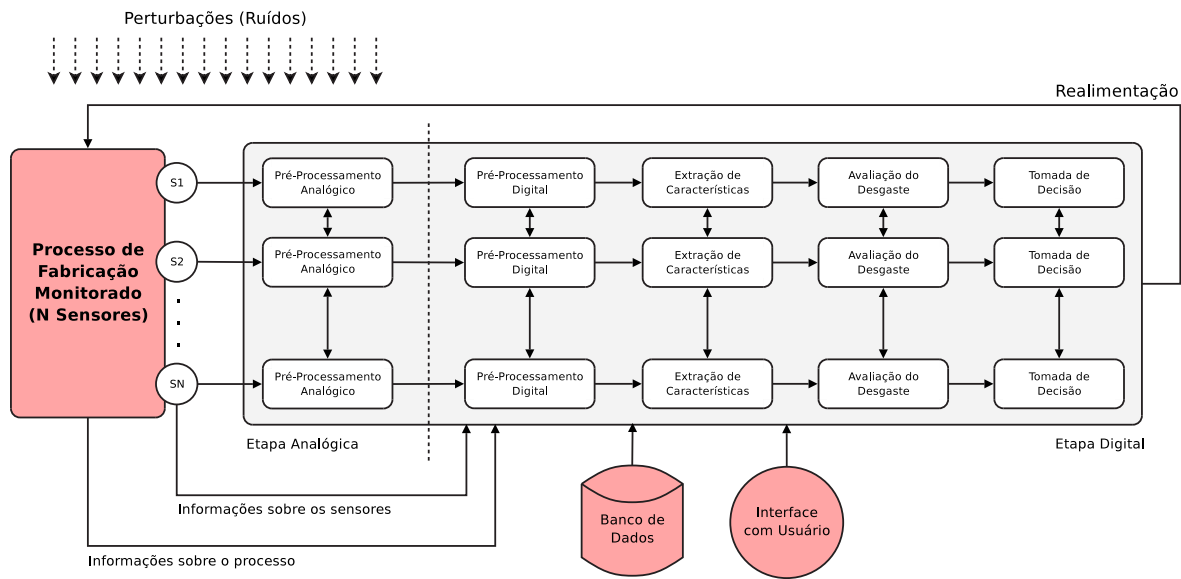


Figura 3.3: Arquitetura genérica para aplicações de multi-sensoreamento.

Fonte: Atualizada a partir de Sick [18].

Sensores Inteligentes

Existe uma classe de sensores que apresentam funcionalidades extendidas em relação aos demais sensores previamente apresentados. Os sensores inteligentes diferem dos demais devido ao fato de terem certa autonomia para tomarem decisões localmente, sem ter de se referir a um sistema de controle geral. Além disso, podem ainda aprender com suas operações e usar esta experiência e conhecimento adquirido do passado para melhorar seu desempenho [36]. Em geral técnicas de inteligência artificial são embutidas no sistema de processamento do sensor, para permitir esta característica peculiar.

Para ser considerado inteligente, o sensor deve apresentar ao menos uma destas características [36]:

- Realizar sua própria calibração automaticamente.
- Ser capaz de realizar a medição e extrair a característica da grandeza do sinal adquirido.
- Ser capaz de tomar decisões locais de maneira independente a um controle centralizado.
- Ser capaz de combinar seu sinal ao de outros sensores para prover resultados mais robustos.
- Ser capaz de aprender com operações passadas, a fim de melhorar seu desempenho atual.

Niu et al. [115] apresenta um sistema inteligente e multi-sensorial, baseado em emissão acústica e medição de força para medir o desgaste de flanco de ferramentas de torneamento. Já de Souza

[59] apresenta um sistema semelhante incluindo ainda sensores de vibração e processando estes sinais através de redes neurais para reconhecer os padrões de falha da ferramenta de corte, diagnosticar seu estado de desgaste e estimar o tempo de vida restante da ferramenta.

3.2.3 Considerações sobre o Monitoramento do Desgaste

Das tarefas possíveis de serem realizadas num sistema de monitoramento de processos de fabricação, dá-se destaque especial à detecção de colisões, à identificação de quebras e à medição e classificação do desgaste das ferramentas de corte [18].

O desgaste é uma das variáveis de processo que exercem maior influência na eficiência geral da produção, e sua constante análise permite avaliar o tempo de vida útil da ferramenta e ainda inferir sobre a operação de usinagem para qual esta ainda é adequada (desbaste ou acabamento), de acordo com seu estado atual de desgaste.

O monitoramento do desgaste tem ainda um papel preventivo, pois evita que ferramentas muito desgastadas sejam usadas nos processos, o que poderia acarretar em quebras de ferramentas ou da própria máquina-ferramenta, afetando diretamente a qualidade final da produção e aumentando os custos com retrabalho nas peças, reparo nas máquinas e tempo de trabalho desperdiçado.

Para o caso do monitoramento de processos de usinagem, a implementação de um sistema de sensoreamento deve atender a alguns requisitos específicos [19, 36, 61], como:

- A medição de variáveis do processo de usinagem deve ser feita o mais próximo possível da região de corte, visando realizar medições que representem o estado real do sistema.
- Os equipamentos de medição não devem influenciar o desempenho da máquina-ferramenta.
- Também não podem restringir o espaço de trabalho ou influenciar os parâmetros de usinagem.
- Deve ser de fácil manutenção, permitindo troca de sensores a baixos custos.
- Deve ser robusto o suficiente para suportar ao ambiente agressivo dos processos de usinagem, como por exemplo, altas temperaturas, campos magnéticos e choques mecânicos.
- Deve funcionar de maneira independente da ferramenta ou da peça sendo usinada.
- Deve retornar sinais com características metrológicas adequadas, com baixa influência de ruído.
- A transmissão do sinal medido deve ser realizada de maneira confiável.

No caso do monitoramento do desgaste em ferramentas, as principais variáveis a serem investigadas são os valores de desgaste de flanco (VB), desgaste de flanco máximo (VB_{max}), área do desgaste de flanco (A_{VB}), profundidade de cratera (KT) e afastamento médio da cratera (KM). Basta definir uma técnica adequada para a medição destas variáveis de acordo com o processo em questão.

Um problema com as pesquisas realizadas nesta área atualmente é que a maioria destes sistemas é aplicado em ambientes ideais e controlados, longe de apresentarem as reais características dos ambientes agressivos dos processos industriais [17]. Desta forma, a maioria destas soluções nem cumpriria o requisito de resistência ao ambiente agressivo do processo. Contudo, alguns produtos comerciais já têm entrado no mercado e sua robustez e eficiência vêm aumentando gradativamente.

Métodos indiretos têm sido aplicados com maior frequência, porém sofrem com a perturbação de ruídos nas medições [37] e não produzem um valor exato da medição do desgaste, mas sim, uma estimativa do estado atual da ferramenta. Porém, estes métodos têm a vantagem de permitir o monitoramento contínuo do processo e vêm aumentando sua robustez com a aplicação de técnicas de multi-sensoreamento, buscando evitar que a influência dos ruídos na medição seja muito perturbadora. Ainda, técnicas de inteligência artificial têm sido aplicadas com sucesso para o processamento dos sinais adquiridos dos sensores de medição indireta, gerando resultados mais confiáveis no mapeamento e reconhecimento do desgaste das ferramentas. Dentre as técnicas inteligentes mais aplicadas estão as redes neurais [59, 117], lógica nebulosa [118, 119], modelos Markovianos [63], algoritmos genéticos [120], árvores de decisão [37] e sistemas especialistas [37].

Pesquisas e aplicações usando métodos diretos nesta área também têm sido apresentados com certa frequência atualmente. A grande vantagem é que os resultados das medições refletem diretamente os valores atuais de desgaste da ferramenta de forma clara e precisa, e não apenas uma estimativa, como nos métodos indiretos. A desvantagem é que a aplicação destas técnicas se dá de forma intermitente e pós-processo, necessitando retirar a ferramenta da máquina-ferramenta para a medição em uma estação própria de inspeção. Para contornar este problema, soluções têm sido apresentadas onde as máquinas-ferramentas dispõem de *magazines* com diversas ferramentas, e desta forma, a inspeção de cada ferramenta só ocorreria quando esta já estivesse guardada no *magazine*, não necessitando parar a máquina-ferramenta para fazer sua análise [12].

Dos cenários acima descritos, nota-se que há uma certa tendência e um caminho propício para se realizar uma fusão de sensores de monitoramento direto e indireto paralelamente, permitindo que através do sensoreamento indireto se tenha um controle contínuo do processo e que através do sensoreamento direto se obtenha respostas mais claras e exatas sobre o nível de desgaste e tempo de vida das ferramentas de corte.

A figura 3.4 ilustra o modelo de um possível método de monitoramento, realizando a fusão de

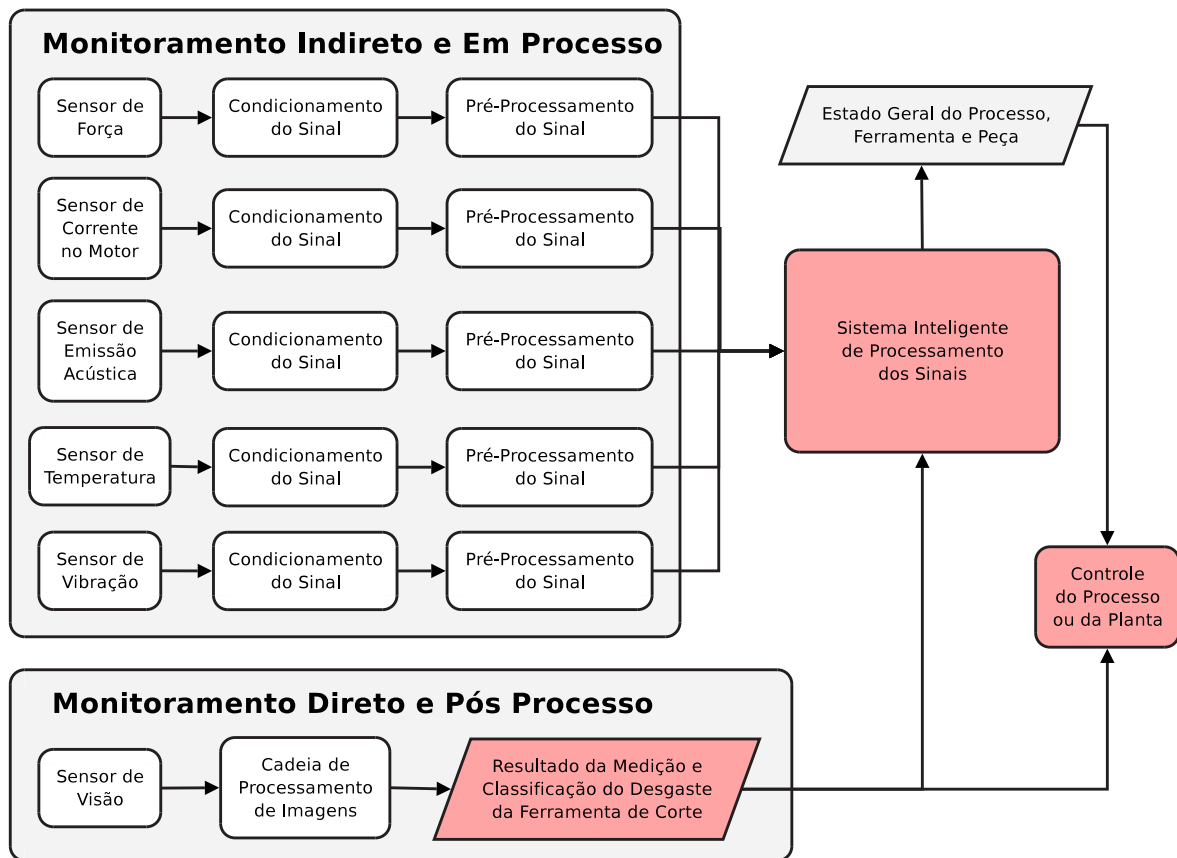


Figura 3.4: Modelo de multi-sensoreamento com processamento inteligente dos sinais.

Fonte: Atualizada a partir de Deschamps [3].

sensores diretos e indiretos para controlar de forma inteligente o estado de desgaste das ferramentas e informar/realimentar o sistema de controle da máquina-ferramenta, visando corrigir os parâmetros de processo para obter melhor rendimento da produção.

Este capítulo tratou de questões referentes à autonomia das APCs e as diversas técnicas de monitoramento e inspeção do desgaste em ferramentas de corte, importantes para se atingir alto grau de independência em relação à célula produtiva. No capítulo seguinte será abordada a tecnologia de visão com maiores detalhes e sua aplicabilidade para a inspeção do desgaste em ferramentas de corte.

Capítulo 4

Sistemas de Visão

Nem todos os animais dependem tanto da visão para sua orientação como os homens. Os seres humanos são animais que apesar de apresentarem cinco sistemas de sensoreamento – visão, audição, olfato, gustação e tato – dependem e confiam excessivamente na sua visão, por ser o sentido que fornece o maior número de informações necessárias para a interpretação do mundo exterior [121, 122]. Atualmente, uma tecnologia que emula a visão humana encontra-se em avançado desenvolvimento. Ela visa principalmente atacar problemas onde o ser humano necessite da visão para tarefas de inspeção, classificação ou monitoramento em geral, que sejam prejudiciais ou cansativos à saúde humana, ou extrapolem as condições normais da visão humana, como nas tarefas de medição óptica de precisão.

Este capítulo discute a arquitetura de sistemas de visão e sua aplicação no meio industrial. Pretende-se apresentar uma base necessária para explanação das decisões tomadas no projeto do *hardware* do sistema TOOLSPY e na implementação dos algoritmos de processamento de imagens utilizados na inspeção do desgaste em ferramentas. Dá-se inicialmente um esclarecimento sobre os diversos termos utilizados na área de visão e em seguida é apresentada a estrutura geral de componentes destes sistemas. Pela grande quantidade de informações relevantes nesta área, um apanhado geral sobre o projeto de sistemas de visão (parte de *hardware* e *software*) pode ser visto também no apêndice A, como informação complementar a este capítulo. Ao final, apresentam-se aplicações comuns e soluções para a inspeção do desgaste em ferramentas de corte por sistemas de visão.

4.1 Terminologia associada à Visão

Quando se refere ao termo visão, mais especificamente à visão de máquina (do inglês *machine vision*) ou também sistemas de visão, surge uma série de novos termos interligados, relacionados com

a área de processamento de imagens, cada qual com sua própria definição, mas que causam confusão pela afinidade de conceitos. Não há um consenso geral na literatura desta área para a definição precisa desta terminologia, porém, serão adotados aqui os conceitos apresentados por Gonzalez and Woods [123], Jain et al. [124] e Erhardt-Ferron [125], por apresentarem certa semelhança:

Processamento de Imagens: refere-se ao processamento digital de imagens através de um computador ou dispositivo eletrônico, onde as entradas e saídas do processamento são imagens. Em geral são operações de realce, restauração, transformação ou compressão de imagens. Enquadra-se este tipo de operação de processamento como de “nível baixo” ou até “médio”. Um exemplo seria a aplicação de um filtro na imagem para realçar as bordas de seus objetos.

Visão Computacional: refere-se ao processamento digital de imagens para a extração de características importantes, que auxiliem na compreensão da imagem e na tomada de decisões inteligentes. Enquadra-se este tipo de operação de processamento como de “nível alto”, sendo comum a utilização de técnicas de inteligência artificial para o processamento dos dados. Um exemplo seria o reconhecimento e a classificação de um objeto da imagem.

Análise de Imagens: refere-se ao processamento digital de imagens onde somente as entradas do processamento são imagens. As saídas costumam apresentar uma descrição ou representação diferente da imagem ou alguma característica sua. Diz-se que a análise de imagens encontra-se em nível intermediário ao processamento de imagens e à visão computacional, enquadrando-se como operações de “nível médio”, podendo até atingir operações de “nível alto”. Um exemplo seria a visualização dos dados de uma imagem a partir de seu histograma, que descreve as características de luminosidade da cena ali representada.

Computação Gráfica: refere-se ao processo de formação de imagens a partir do modelo de primitivas geométricas, como linhas e círculos, aplicado nas áreas de publicidade, jogos eletrônicos, realidade virtual, dentre outras. A computação gráfica vai no caminho inverso da visão computacional, que pretende analisar e compreender imagens do mundo real, e não criá-las. Porém, existe uma certa ligação destas áreas, principalmente no que diz respeito às pesquisas de realidade virtual ou de geração de modelos 3D a partir de imagens de tomografia médica, onde ferramentas de ambas as áreas são utilizadas para a geração e apresentação de resultados.

Reconhecimento de Padrões: refere-se a operações inteligentes na interpretação de sinais. Está intimamente ligado à visão computacional, mas não necessariamente processa apenas informações visuais para realizar o reconhecimento de características de um ambiente, por existirem outros tipos de sensores dos quais poderia fazer uso, como por exemplo um sensor acústico para re-

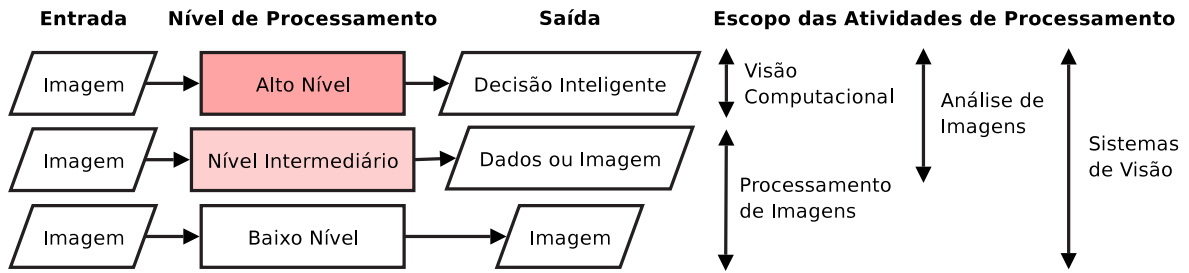


Figura 4.1: Interdependência entre os termos da área de sistemas de visão.

Fonte: Atualizada a partir de Deschamps [3].

conhecimento de voz. Em visão computacional, trata-se da interpretação e reconhecimento de objetos e características específicas em uma imagem.

Inteligência Artificial: refere-se à modelagem de sistemas inteligentes e análise de aspectos ligados à inteligência. É normalmente usada junto à visão computacional para a obtenção, reconhecimento e classificação de objetos e características nas imagens. Em geral é aplicada em três etapas: percepção, cognição e ação. A etapa de percepção traduz os sinais provenientes do ambiente em símbolos, a de cognição manipula estes símbolos e a de ação traduz o resultado destes símbolos em ações que devem ser aplicadas de volta ao ambiente. O campo de visão computacional é considerado por alguns autores como sendo uma sub-área de IA.

Sistemas de Visão: refere-se a um sistema completo, que envolve a solução de um problema de natureza visual, tentando criar um modelo do mundo real a partir de imagens deste. É composto tanto por dispositivos de *hardware* como por módulos de *software*, fazendo uso de uma ou até todas as demais operações de processamento previamente citadas. Em geral, etapas como aquisição de imagens, pré- e processamento das imagens, extração de características, tomada de decisão inteligente e atuação/realimentação estão contempladas num sistema deste tipo.

Visão de Máquina: refere-se ao termo inglês *machine vision*. É usado normalmente como um sinônimo para o termo “sistema de visão”, porém, pode ser encontrado na literatura como sendo a simulação e/ou incorporação do comportamento visual inteligente de humanos em máquinas, como robôs, usando extensivamente técnicas de visão computacional e inteligência artificial.

A figura 4.1 a seguir ilustra a íntima ligação entre os termos e áreas acima mencionados.

4.2 Componentes de um Sistema de Visão

Esclarecidos os diferentes termos ligados à área de sistemas de visão e processamento de imagens, pode-se definir estes sistemas conforme suas partes integrantes. Sistemas de visão integram

em uma única solução uma série de tecnologias diferentes, permitindo grande flexibilidade no desenvolvimento de aplicações em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, no controle de qualidade e processos, astronomia, dentre outras, como será visto adiante na seção 4.3.

A organização destes sistemas em diferentes partes/componentes é conveniente pois permite o estudo de cada tecnologia empregada no sistema em separado.

Gonzalez and Woods [123] apresentam uma estrutura de componentes interligados para a organização de sistemas de processamento de imagens. Já para a organização modular de um sistema de visão completo, Jähne et al. [126] apresenta uma estrutura de componentes visando separar metodicamente as diferentes tecnologias contidas no sistema.

Nota-se grande semelhança entre as abordagens de Gonzalez and Woods [123] e Jähne et al. [126] com relação a organização dos sistemas de visão e processamento de imagens. Neste trabalho, porém, será usada uma estrutura híbrida em relação a ambas abordagens, semelhante à organização contida em Pavim [1] e Pavim [33]. Segue a descrição dos componentes desta estrutura:

Sistema Óptico: responsável pelo correto direcionamento e dimensionamento das informações (feixes luminosos) que provêm do objeto para o sensor óptico.

Sistema de Iluminação: responsável pela projeção de iluminação sobre o objeto em estudo, pois em geral estes não emitem luz própria, necessária para a sensibilização do sensor óptico.

Sistema de Aquisição: contém o sensor óptico, responsável pela tradução do sinal luminoso do objeto em estudo para um sinal elétrico compreensível pelo sistema de processamento.

Sistema de Transmissão de Dados: responsável pela transferência dos dados provindos do sistema de aquisição para o sistema processador, assim como os sinais de comando do sistema processador para os sistemas óptico, de iluminação, aquisição e atuação.

Sistema de Processamento de Dados: responsável pelo pré- e processamento de dados recebidos dos demais componentes do sistema, bem como a tomada de decisões para atuar no ambiente do objeto em estudo. Deve ainda apresentar uma interface de comunicação com o usuário.

Sistema de Atuação: responsável por atuar no ambiente do objeto em estudo segundo os comandos passados pelo sistema de processamento de dados.

A figura 4.2 ilustra a estrutura dos componentes integrantes de um sistema de visão e demonstra sua aplicação ao controle de qualidade. O único componente que não ficou ilustrado na figura foi o sistema de atuação, que poderia neste caso ser um cilindro pneumático no fim da esteira, responsável pela retirada do produto caso fosse detectado um defeito no mesmo.

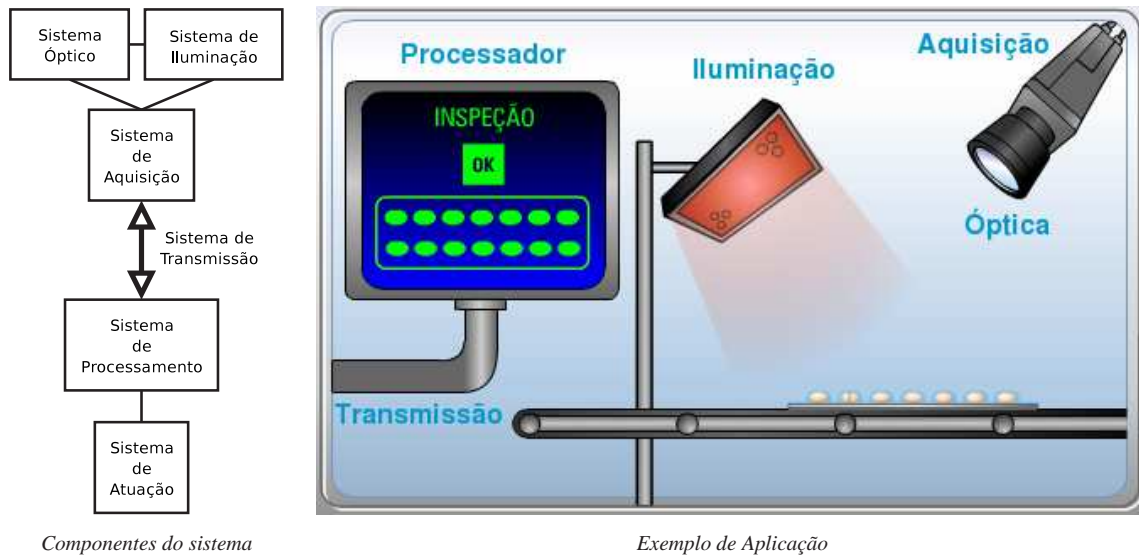


Figura 4.2: Componentes gerais de um sistema de visão.

Fonte: Atualizada a partir de Deschamps [3] e Pollux, em <http://www.pollux.com.br/>.

O apêndice A apresenta em mais detalhes cada um dos componentes de um sistema de visão quanto a sua parte de *hardware* e *software*, visando prover uma base necessária para a elaboração do projeto destes sistemas. Ao leitor que não está familiarizado com a tecnologia de visão, recomenda-se a leitura do apêndice. Na sequência, são explorados ramos de aplicação para os sistemas de visão e a atuação destes sistemas na área de inspeção do desgaste em ferramentas de corte.

4.3 Aplicações

As áreas de sistemas de visão e processamento de imagens são muito extensas e baseiam-se em diversas áreas do conhecimento, o que lhes garante grande flexibilidade de soluções e aplicações em diferentes meios. Inúmeras áreas de aplicação podem ser mencionadas [33, 121, 127, 128, 129]:

Controle de Qualidade: rígido monitoramento sobre características particulares de produtos industriais, procurando evitar o contato de produtos defeituosos com o mercado consumidor. Exemplos: verificação de números de lote, lacres, rótulos, referências e datas de validade em embalagens, inspeção de placas de circuito impresso, inspeção de ampolas e comprimidos.

Controle de Processos Industriais: manipulação de peças em linhas industriais e monitoramento de parâmetros fundamentais para o bom desempenho de processos industriais, visando realimentar o sistema corrigindo estes parâmetros quando necessário. Exemplos: alinhamento de peças em linhas automotivas, orientação de robôs de solda, pintura ou manipuladores, monitoramento de parâmetros de corte em processos de usinagem.

Rastreabilidade: localização e reconhecimento de informações codificadas sobre a superfície de produtos. Exemplos: leitura de códigos de barras, localização e leitura de códigos bidimensionais em linhas de montagem, identificação de toras na indústria madeireira.

Segurança: certificação de permissões e monitoramento de ambientes. Exemplos: inspeção de bagagens por raios-X, reconhecimento de íris e impressões digitais, leitura de placas de automóveis, monitoramento inteligente de ambientes por detecção de movimento.

Geografia e Meteorologia: análise de imagens de satélite. Exemplos: previsões meteorológicas e fenômenos naturais, inspeção de áreas de preservação ambiental, medições de áreas territoriais.

Astronomia: análise de imagens espaciais. Exemplos: análise da composição física de estrelas, cometas e planetas, criação do modelo de constelações e galáxias.

Militar: inspeção de ambientes em condições desfavoráveis ao olho humano. Exemplos: módulos ópticos de visualização noturna baseados em imagens de calor.

Controle de Tráfego: análise e controle de tráfego rodoviário para manter um fluxo normal de automóveis. Exemplos: controle de redes de semáforos e criação de desvios inteligentes e informações de alerta em autovias através da análise do fluxo automotivo.

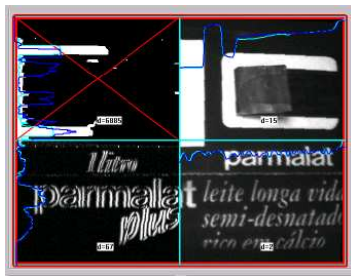
Análise de Imagens Médicas: auxílio na identificação de diagnósticos e doenças. Exemplos: tomografia cerebral, inspeção da estrutura óssea por raios-X, controle do crescimento e saúde de bebês, sondas para análise interna de órgãos do corpo humano.

Escritório e Lazer: dispositivos e sistemas para ampliar a comunicação e armazenamento de informações. Exemplos: videoconferências, escaneamento de imagens e textos (OCR/OCV), controle de sistemas computacionais para deficientes físicos.

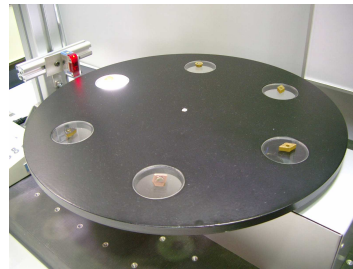
A figura 4.3 ilustra exemplos de aplicação em cada uma das áreas previamente citadas.

4.4 Monitoramento do Desgaste em Ferramentas de Corte por Visão

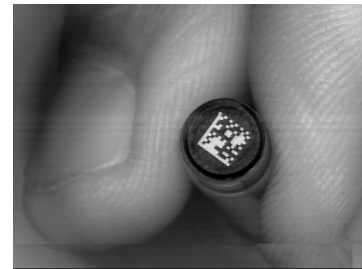
O monitoramento do desgaste em ferramentas de corte através da tecnologia de visão, tema do presente trabalho, é mais uma das aplicações possíveis destes sistemas voltada ao controle de processos industriais. Vários trabalhos a respeito do monitoramento do desgaste de flanco e de cratera através de técnicas de visão já foram publicados nos últimos anos, o que dá certo respaldo e mostra o crescimento e aplicabilidade da tecnologia nesta área.



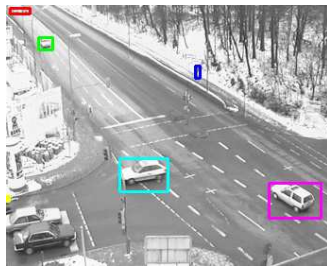
Controle de Qualidade



Controle de Processo Industrial



Rastreabilidade



Controle de Tráfego



Inspeção de Áreas Geográficas



Astronomia



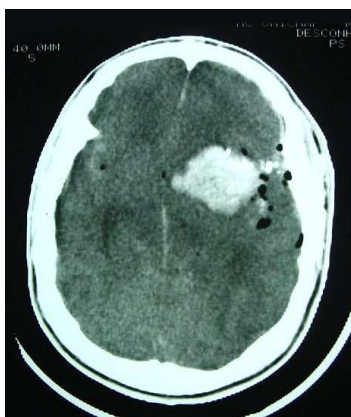
Militar: Visão Noturna



Segurança de Ambientes



Escritório e Lazer



Imagens Médicas



Reconhecimento de Digitais



Previsões Meteorológicas

Figura 4.3: Diversas áreas de aplicação das tecnologias de visão e processamento de imagens.

A intenção aqui é descrever o estado da arte deste tipo de aplicação, levantando um histórico das diversas abordagens já publicadas, e apresentar considerações sobre a possibilidade do emprego

desta tecnologia para o problema tratado neste trabalho.

4.4.1 Histórico de Abordagens

Uma das primeiras abordagens sobre a estimação do desgaste de flanco em ferramentas de corte através de visão foi introduzida por Matshushima et al. [130], onde a cada troca de ferramenta, esta era inspecionada por uma câmera de TV com imagens de tons de cinza. As imagens adquiridas eram binarizadas por simples aplicação de um valor de limiar determinado a partir do histograma da imagem. O desgaste de flanco era estimado diretamente da imagem binarizada por contagem do número de *pixels* na direção do desgaste. Porém, devido às irregularidades superficiais da área do desgaste, esta não encontrava-se iluminada uniformemente, e a técnica de limiarização global não se apresentava como uma solução robusta neste caso.

Esta abordagem foi aperfeiçoada posteriormente por Cuppini et al. [131], que também utilizou uma câmera de TV, um conjunto óptico adequado e um sistema de iluminação por fibras ópticas direcionáveis para realizar a inspeção de ferramentas dentro da máquina-ferramenta, durante os ciclos de processo de usinagem. Três tipos de técnicas de segmentação foram testadas, mas a calibração do sistema não foi realizada, não sendo possível validar os resultados.

Uma nova abordagem usando uma câmera do tipo *vidicon* foi introduzida por Lee et al. [132]. Aqui a câmera era acoplada junto a um microscópio e as ferramentas posicionadas sobre a base do microscópio. O processamento das imagens consistia em uma etapa de realce (ajuste de contraste) seguida de uma etapa de segmentação interativa para separar o desgaste da ferramenta do resto da imagem. Porém, esta abordagem de segmentação interativa limita o uso da solução ao nível laboratorial, além de que o controle da iluminação foi identificado como sendo de suma importância para obter-se bons resultados com o sistema.

Giusti et al. [39] analisaram os desgastes de flanco e de cratera de ferramentas de corte com um sistema equipado de uma câmera de TV, um sistema de iluminação por fibras ópticas direcionáveis e um difusor para a análise do desgaste de flanco e outro por *laser* para analisar o desgaste de cratera. Para segmentar a área do desgaste de flanco, utilizou-se uma estratégia de segmentação local, onde valores de limiar foram aplicados em várias pequenas tiras de 10 *pixels* compreendendo a região do desgaste. O sistema foi utilizado com relativo sucesso em diversas máquinas sob diferentes condições de corte. Porém, por capturar uma imagem em perspectiva da ferramenta e não em um plano paralelo ao eixo óptico do sensor, o sistema fornece resultados não ajustados para o valor do desgaste.

Maeda et al. [133] implementaram um sistema para determinação do desgaste de flanco analisando imagens inclinadas da face da ferramenta, inferindo sobre o desgaste a partir de dados da

deformação e geometria da mesma. Entretanto, a precisão do método dependia fortemente do correto posicionamento e orientação da ferramenta em relação à câmera.

Já Jeon and Kim [134] desenvolveram um sistema de monitoramento composto por iluminação *laser* e uma câmera posicionada perpendicularmente à região do desgaste da ferramenta. Uma série de passos de processamento de imagens era realizada para a remoção de ruídos e para produzir um contorno da região do desgaste. A aplicação demonstrou uma precisão de medições comparável às feitas por microscopia óptica, porém, a pequena região de iluminação do *laser* limitava a quantidade de informação a ser extraída da região do desgaste. Outro trabalho utilizando iluminação *laser* foi o de Ryabov and Mori [98]. A partir da aquisição dos dados da imagem era possível a reconstrução 3D da topografia da ferramenta, permitindo a análise do desgaste por meio desta.

O uso da tecnologia de visão junto a uma máquina-ferramenta durante o processo de usinagem foi avaliado por Pedersen [107]. Uma câmera foi montada junto a uma fonte de iluminação do tipo halogênea em um torno CNC. A região do desgaste era segmentada por simples valores de limiar retirado de um histograma suavizado. Após uma avaliação prolongada do sistema, verificou-se que este operava em conformidade com um modelo de desgaste em três estágios: estágio inicial, estágio estável, e estágio terminal. Porém, o processo de segmentação simplificado, e a incapacidade do conjunto óptico do sistema em realçar contrastes nas imagens limitava a precisão do sistema.

Foi apresentado por Park and Ulsoy [135] um modelo de estimativa de parâmetros do desgaste em ferramentas pela observação das forças de corte da máquina-ferramenta. Em conjunto, um sistema de visão era utilizado para inferir sobre estes parâmetros, sendo que as imagens passavam por uma operação de limiarização antes de terem estes parâmetros extraídos. Porém, como a resolução da câmera não era muito alta, apenas uma parte da região do desgaste era adquirida, mas o sistema se comportou bem para condições de corte constantes.

A integração da tecnologia de visão com a inteligência artificial foi apresentada primeiramente por Teshima et al. [109]. Aqui uma rede neural era utilizada para prever o tempo de vida restante das ferramentas. A rede recebia como entrada parâmetros estimados da análise das imagens coloridas dos desgastes de flanco e cratera, além das condições de corte e operação da máquina-ferramenta para classificar o tipo de desgaste encontrado e o tempo de vida remanescente.

Du et al. [136] utilizaram um sensor óptico desenvolvido pela empresa SAMI para monitorar desgaste de flanco. Tanto o sensor quanto o módulo de iluminação possuíam um encapsulamento próprio ao ambiente industrial. O estado de desgaste das ferramentas era avaliado pela comparação das imagens de uma ferramenta boa (nova ferramenta) com imagens de ferramentas desgastadas (a cada processo de usinagem). Apesar de levantar bons resultados, ficou claro que esta técnica depende muito do posicionamento e orientação das duas imagens, que devem ser perfeitamente casadas, o que

limita bastante a aplicação da técnica para determinados tipos de ferramentas.

Weis [110, 111] em seus trabalhos apresenta um sistema de visão que utiliza câmeras CCD, uma fonte de iluminação infra-vermelha e um conjunto óptico adequado com um filtro próprio para adquirir apenas radiação infra-vermelha, alegando ser a única maneira de eliminar os ruídos provenientes da iluminação ambiente em sua solução. As imagens adquiridas passam por um processo de segmentação do desgaste por limiarização. Porém, Weis reconhece que a técnica não pode ser aplicada de forma flexível e introduz técnicas de inteligência artificial para o processamento das imagens através de redes neurais, devido a sua capacidade de aprendizado. Uma topologia de rede *feedforward* com algoritmo de treinamento *backpropagation* foi utilizada para inferir sobre o desgaste de flanco das ferramentas estudadas.

Oguamanam et al. [106] apresentaram um sistema de visão para monitorar o desgaste e detectar quebras em ferramentas de corte, a partir da extração de características das imagens: tamanho, área e perímetro do desgaste, e ainda a distância da quina da ferramenta desgastada para a quina de uma ferramenta original. O sistema classificava as ferramentas em boas, desgastadas ou quebradas conforme a avaliação destes parâmetros. O processamento das imagens baseava-se em operações de limiarização e avaliação da textura das imagens para identificar suas três regiões distintas: desgastada, não-desgastada e fundo. Utilizou-se ainda a transformada de Hough, que em geral é utilizada para identificação de pontos, linhas, retas e arcos na imagem, para encontrar a quina da ferramenta.

Um algoritmo de detecção de contornos e outro de auto-ajuste de foco de uma câmera CCD foi introduzido por Yang [104, 105] em seus trabalhos para medir as dimensões do desgaste de flanco e cratera de ferramentas sem quebra-cavaco, auxiliado por uma rede neural *feedforward* com algoritmo de treinamento *backpropagation* para realizar classificações do tipo de desgaste encontrado. Karthik et al. [102] também apresentaram uma solução para a estimação da profundidade média e área superficial do desgaste de cratera em ferramentas de corte, porém, baseada na composição do volume da cratera por imagens estéreo, podendo ser aplicada durante o processo de usinagem. Prasad and Ramamoorthy [103] estendem o trabalho anterior acrescentando uma etapa de processamento inteligente através de uma rede neural *feedforward* com algoritmo de treinamento *backpropagation* recebendo parâmetros como velocidade e profundidade de corte, avanço, dentre outros, como entrada na rede e entregando os valores de desgaste de flanco e cratera na saída.

Kurada and Bradley [41] propuseram um sistema composto por iluminação de fibra óptica e uma câmera CCD junto a um microscópio de alta resolução. Operadores de suavização e segmentação da imagem por textura e gradiente foram utilizados para estimar a área do desgaste, baseando-se nas diferenças de textura entre as regiões desgastada e não desgastada da imagem.

Pfeifer [11, 108] em seus trabalhos expôs a importância do sistema de iluminação na aquisição

de imagens com maior qualidade para a medição do desgaste de flanco das ferramentas. A idéia consiste na elaboração de uma fonte luminosa que permita a variação dos ângulos de incidência dos raios luminosos projetados sobre a superfície (normalmente metálica e reflexiva) das ferramentas, para que uma sequência de imagens sob configurações distintas de iluminação sejam adquiridas e posteriormente formar uma “imagem otimizada” a partir da extração das melhores características de cada imagem. Isto resulta em imagens de ferramentas com uma iluminação mais homogênea, destacando todas as partes do desgaste por igual. Porém, a fonte luminosa deve ser potente para poder funcionar em configurações diferentes e ainda assim prover boa intensidade luminosa.

Mannan et al. [100] apresentaram uma solução híbrida, através de uma câmera CCD e um microfone, realizando uma fusão de sensores para correlacionar os padrões acústicos adquiridos de processos de usinagem com o padrão de textura encontrado na superfície da área usinada das peças manufaturadas. A partir das informações analisadas de ambos os sensores, infere-se sobre o nível de desgaste das ferramentas utilizadas. Abordagem semelhante é apresentada por Kassim et al. [95] que analisam a textura da superfície de peças manufaturadas através de algoritmos baseados em fractais, inferindo sobre o nível de desgaste das ferramentas apoiando em modelos escondidos de Markov.

Bradley and Wong [5] estenderam o trabalho de Kurada and Bradley [41] e taxaram a textura de superfícies usinadas e da superfície do desgaste das ferramentas de corte como sendo as “impressões digitais” das mesmas, considerando que a partir destes parâmetros pode-se inferir com precisão sobre o nível de desgaste das ferramentas. Análise de histogramas, processamento no domínio frequencial e espacial foram utilizadas para realizar a análise da textura das superfícies neste sistema.

Lanzetta [7] apresentou um estudo das principais morfologias de desgaste e quebra de ferramentas de corte, além de uma abordagem para identificá-las. Ainda apresentou uma arquitetura para realizar a medição automática do desgaste de flanco e cratera destas ferramentas, propondo uma série de algoritmos genéricos de processamento de imagens que podem ser aplicados com sucesso para alcançar bons resultados nestes tipos de aplicação.

Ji et al. [99] utilizou cálculos de parâmetros conhecidos como distâncias de Mahalanobis da imagem das ferramentas para inferir sobre seu desgaste. A idéia é ligar/mapear a mudança destes parâmetros com o nível e tipo de desgaste encontrado na ferramenta.

Otto and Kurik [101] utilizaram também um sistema de visão para medir a área, o perímetro e as dimensões mínima e máxima do desgaste de flanco. Filtragem para a eliminação de ruídos e segmentação por limiarização foram utilizados no processamento de regiões específicas das imagens (ROIs), para melhorar o desempenho computacional.

Alguns trabalhos como o de Al-Habaibeh and Parkin [92] e o de Borelli et al. [35] utilizaram ainda sensores infra-vermelhos para estimar o desgaste nas ferramentas de corte a partir das curvas

de calor adquiridas das mesmas.

4.4.2 Aplicabilidade da Tecnologia de Visão para Monitorar Desgaste

Percebe-se que grande parte das pesquisas anteriores apresentadas baseavam seu processamento em técnicas muito simples de limiarização, normalmente separando as imagens em duas componentes: a região desgastada e a região não desgastada (desgaste e fundo da imagem). Este procedimento simples funciona razoavelmente em ambientes artificiais de laboratório, gerando no entanto inúmeros problemas para aplicação dos sistemas de visão na inspeção do desgaste em ambientes industriais, por não apresentarem boas características de repetibilidade. Este problema foi sendo contornado conforme novas técnicas de segmentação foram experimentadas, baseando-se também nos pontos de descontinuidade das imagens, na textura e morfologia do desgaste das ferramentas.

Abordagens mais recentes provam quão importante é a configuração de um sistema de iluminação adequado para o tipo de medição que se deseja realizar. Com iluminação incidente adequada, o processo de segmentação da imagem é extremamente facilitado, pois há bom contraste nas imagens, e por vezes, até uma simples limiarização poderia ser eficiente o suficiente para cumprir esta tarefa.

Kurada and Bradley [68] citam alguns pontos importantes a serem levados em conta quanto ao uso de sistemas de visão aplicados ao desgaste em ferramentas de corte:

- Recomenda-se o uso de imagens de tons de cinza, pois estas apresentam maior quantidade de informação e proporcionam um monitoramento mais eficaz do desgaste das ferramentas sem custo adicional. Por exemplo, análise de textura da superfície da ferramenta ou ainda técnicas de reconhecimento de padrões podem ser aplicadas mais facilmente a imagens de tons de cinza.
- A informação de textura obtida da análise da superfície da peça usinada pela ferramenta deve ser incorporada no modelo de monitoramento do desgaste da ferramenta, pois tal informação pode ser vital na seleção das condições de usinagem.
- A utilização de algoritmos de segmentação mais eficientes que uma simples limiarização global devem ser exploradas, por serem menos suscetíveis a erros.
- A validade das técnicas de monitoramento do desgaste em ferramentas de corte por visão deve basear-se nas técnicas tradicionais já existentes.

Lanzetta [7] ainda ressalta algumas considerações desejáveis para um sistema de visão aplicado ao monitoramento do desgaste de ferramentas de corte:

- Deve tomar decisões e processar as informações de forma automática.
- Deve ser flexível para reconhecer um grande número de formas diferentes de desgaste.
- Deve ainda ser expansível para guardar informação de novos tipos de defeitos e de desgaste.

Para garantir maior robustez da solução, pode-se ainda realizar uma fusão de sensores, como já levantado no capítulo 3. Desta maneira, o sistema de visão poderia muito bem ser aplicado para a inspeção do desgaste das ferramentas quando fosse extremamente necessário, ou seja, quando algum outro método de monitoramento indireto e em processo tenha indicado esta necessidade devido a uma variação brusca nos parâmetros de usinagem do processo.

Este capítulo discutiu sobre a tecnologia de visão e sua aplicabilidade ao problema do desgaste em ferramentas de corte. Procurou-se ilustrar a arquitetura dos sistemas de visão e como diversos autores abordaram o problema de medição do desgaste usando esta tecnologia. O próximo capítulo apresenta as características do sistema de visão utilizado neste trabalho para realizar a medição e classificação do desgaste em ferramentas de fresamento.

Capítulo 5

O Sistema TOOLSPY

O Sistema TOOLSPY é um sistema de visão que foi desenvolvido no contexto do projeto de cooperação entre o grupo S2i e o instituto WZL, com o objetivo de medir e classificar de forma automática o desgaste em ferramentas de corte (figura 5.1). Os capítulos anteriores visaram dar ao leitor embasamento sobre o cenário industrial atual, a importância dos processos de fabricação, a influência do desgaste das ferramentas no desempenho destes processos e as técnicas utilizadas para monitorar o desgaste, em especial os sistemas de visão. Este capítulo explica o funcionamento do sistema TOOLSPY, ilustrando e descrevendo seus componentes de *hardware* e apresentando as etapas de desenvolvimento do *software* segundo a metodologia adotada para a implementação do projeto.

5.1 Requisitos Gerais do Sistema TOOLSPY

Dois requisitos são primordiais para a elaboração da solução [1, 2, 3, 24, 54]:

- **O sistema deve apresentar uma resposta rápida e robusta para justificar a troca dos meios convencionais de medição aplicados atualmente:**

Os métodos mais comuns empregam microscopia óptica para inspeção do desgaste, necessitando de um operador experiente para realizar a tarefa. Este método implica o deslocamento manual da ferramenta até um microscópio (num laboratório), resultando em longos tempos de parada de máquina. Para redução do tempo de *setup*, é necessário que a inspeção seja realizada de forma mais rápida e de preferência sem a necessidade de um operador experiente.

- **O sistema deve ser instalado no chão de fábrica junto à máquina-ferramenta e apresentar interfaceamento ergonômico e simples com o usuário, dispensando conhecimento aprofundado do sistema para sua operação:**



Figura 5.1: Sistema completo de interfaceamento do TOOLSPY.

Este requisito é derivado do anterior, pois implica menor tempo de *setup* da máquina-ferramenta, considerando o grande tempo de deslocamento da ferramenta até um laboratório. Estando o sistema instalado junto à máquina-ferramenta, este tempo de deslocamento é praticamente desconsiderado e auxilia significativamente no desempenho do processo produtivo.

O sistema não deve exigir conhecimentos profundos das áreas de processos de fabricação, desgaste de ferramentas, nem de sistemas de visão para sua operação. A interface com o usuário deve ser intuitiva para que qualquer funcionário do setor produtivo possa operar de maneira satisfatória o sistema (sem configuração de parâmetros ou padronizações específicas).

O cumprimento destes requisitos é relatado ao longo da explanação dos componentes de *hardware* e *software* do sistema TOOLSPY neste capítulo. A partir de sua definição é possível apresentar um esquema da integração do protótipo do sistema com a máquina-ferramenta e a arquitetura do sistema seguindo o modelo de um sistema de visão tradicional, como pode ser visto nas figuras 5.2 e 5.3 respectivamente. Os diferentes componentes do sistema são explanados a seguir.

5.2 Componentes de *Hardware* do Sistema de Visão

O sistema TOOLSPY é composto pelos seguintes componentes de *hardware*: sistema óptico, sistema de iluminação, sistema de aquisição, sistema de transmissão de dados, sistema de processa-

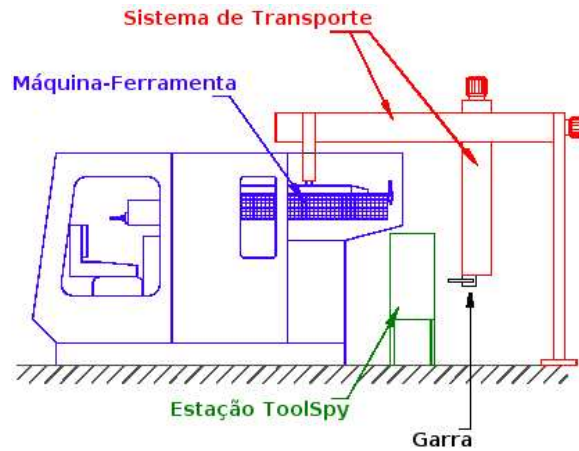


Figura 5.2: Integração do protótipo do sistema ToolSPY com a máquina-ferramenta.

Fonte: Pavim [1].

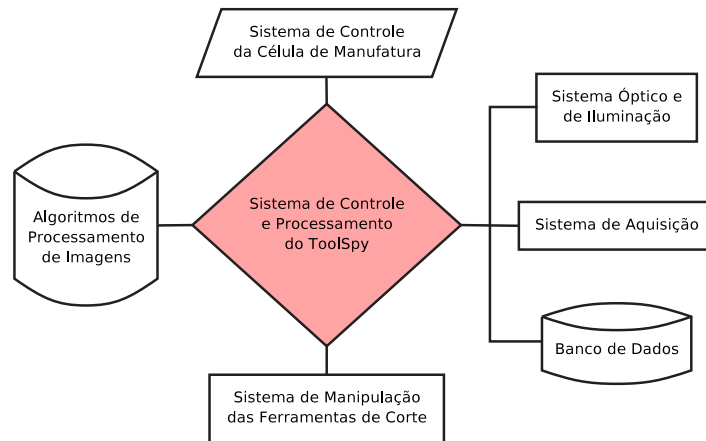


Figura 5.3: Esquema do sistema ToolSPY.

Fonte: Atualizada a partir de Deschamps [3].

mento e sistema de manipulação das ferramentas de corte. A figura 5.4 ilustra o sistema completo, evidenciando cada componente do sistema de visão. Segue uma descrição do *hardware* utilizado em cada componente do sistema.

5.2.1 Sistema Óptico

O sistema óptico do protótipo é responsável por atingir a correta magnificação dos gumes das ferramentas, permitindo uma análise detalhada do flanco principal e da quina das ferramentas. A magnificação e qualidade das imagens projetadas pelo sistema óptico devem ser superiores às das imagens adquiridas através dos métodos de microscopia óptica. A figura 5.5 dá uma idéia da qualidade das imagens adquiridas através do método de microscopia óptica.

Em geral a região do desgaste nas ferramentas compreende uma área de dimensões mínimas,

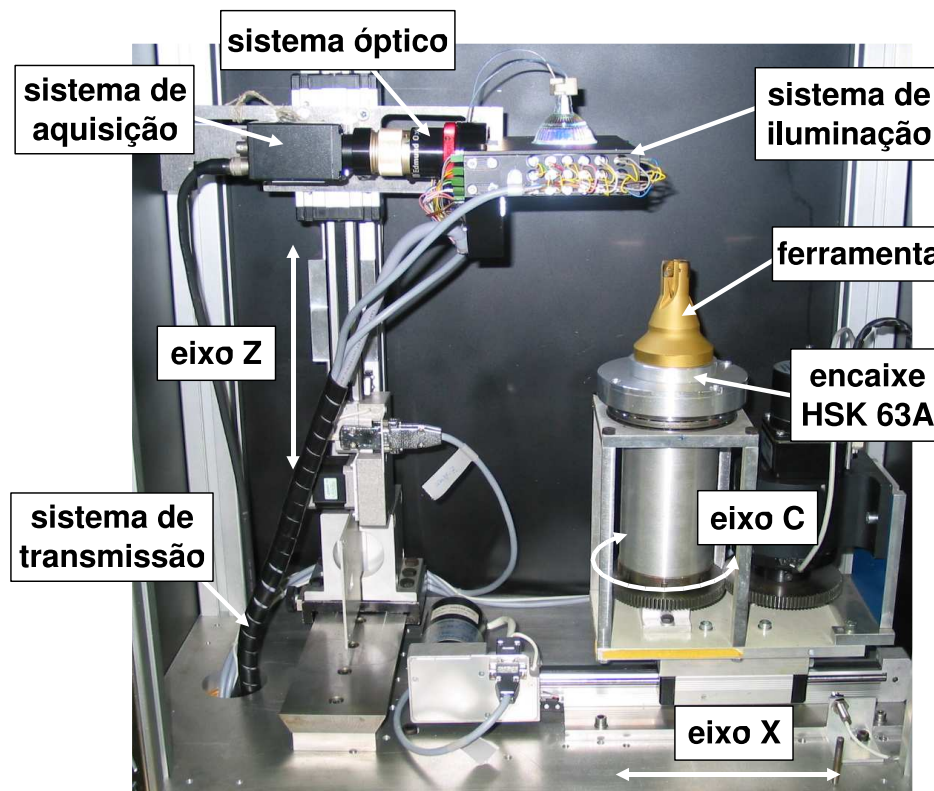


Figura 5.4: Protótipo do sistema TOOLSPY.

Fonte: Atualizada a partir de de Moraes [24].

variando de 0,5 a 3 milímetros de comprimento, e a medição deve ser feita na casa dos micrometros. Desta forma, é necessário que o campo de visão providenciado pela lente do sistema abranja uma área levemente maior do que o tamanho máximo do desgaste que se deseja medir. Em geral desgastes que compreendam uma área maior do que $3mm^2$ tratam-se de uma quebra, e não precisam necessariamente ser medidos.

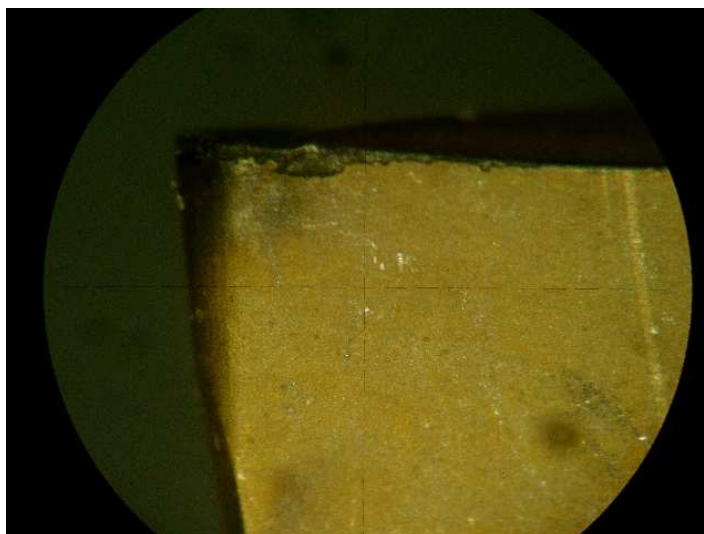
A partir das equações A.1, A.3 e A.4 levantadas na seção A.1.1, pode-se organizar uma tabela para averiguar a melhor configuração para o sistema óptico, de acordo com os parâmetros (FOV, SS e WD) e requisitos definidos para o mesmo (figura 5.6).

De acordo com o requisito anteriormente levantado e com os dados fornecidos pela tabela, uma lente da Edmund Optics tipo MVO MMS de 4 milímetros de campo de visão (FOV horizontal) é utilizada, provendo uma magnificação primária (PMAG) de aproximadamente 1,6 vezes o tamanho original da imagem e operando com uma distância de trabalho (WD) de 67 milímetros da ferramenta. A magnificação total do sistema (SMAG) é de aproximadamente 7,5 vezes o tamanho original da área do desgaste (em relação à imagem impressa em papel).

A iris da lente é sempre mantida o mais fechada possível (de acordo com a intensidade luminosa em questão) para permitir a aquisição de imagens com maior profundidade de campo possível, pois a



Microscópio



Flanco principal ferramenta

Figura 5.5: Magnificação do flanco principal da ferramenta alcançada através de um microscópio.

Fonte: Pavim [1].

quina das ferramentas tem em geral uma geometria curvilínea, que deve ser necessariamente mantida em foco para possibilitar a etapa de processamento das imagens. A configuração atual do sistema óptico ainda dá margens a pequenos erros de medição devido aos fenômenos de aberração produzidos pelas lentes comuns (conforme sub-seção A.1.1). Apesar de ser possível realizar um controle dos erros e distorções proporcionados pelas lentes através de *software*, a melhor solução ainda seria a troca do conjunto óptico por lentes telecêntricas, que não sofrem com o problema de aberração.

5.2.2 Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação costuma ser a parte mais crítica de um sistema de visão, pois ele determina a viabilidade de uma aplicação. Em outras palavras, caso não seja possível encontrar uma boa configuração de iluminação para realçar as características do objeto em estudo, a aplicação não pode ser desenvolvida usando a tecnologia de visão.

Para o sistema TOOLSPY em especial esta parte é crítica, pois pretende-se inspecionar diferentes tipos de ferramentas de corte através da mesma solução. As ferramentas diferem em geometria, cor de revestimento, material de composição, textura de superfície, dentre outros fatores. Isto requer uma configuração de iluminação um tanto quanto flexível para atender de forma satisfatória a diferentes tipos de ferramentas. Por isso, o sistema de iluminação foi projetado de forma modular, permitindo a reprodução de variadas técnicas de iluminação (direcional, anel, campo escuro) através de distintos painéis de LEDs brancos de alta potência luminosa, como pode ser visto na figura 5.7.

Ao total o sistema de iluminação é composto por 1 painel de iluminação frontal, 2 painéis

Distância de Trabalho – WD (mm)		Campo de Visão – FOV (mm)								
		Hor	Ver	Hor	Ver	Hor	Ver	Hor	Ver	
Mínimo	50	2.8	2.1	3.2	2.4	3.6	2.7	4	3	
Máximo	100									
Tamanho do Sensor – SS (mm)	¼ polegada	PMAG		PMAG		PMAG		PMAG		
		1.14	1	0.89	0.8					
	Hor	3.2	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax
	Ver	2.4	26.67	53.33	25	50	23.53	47.06	22.22	44.44
	1/3 polegada	PMAG		PMAG		PMAG		PMAG		
		1.71	1.5	1.33	1.2					
	Hor	4.8	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax
	Ver	3.6	31.58	63.16	30	60	28.57	57.14	27.27	54.55
	1/2 polegada	PMAG		PMAG		PMAG		PMAG		
		2.29	2	1.78	1.6					
Hor	6.4	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	
Ver	4.8	34.78	69.57	33.33	66.67	32	64	30.77	61.54	
2/3 polegada	PMAG		PMAG		PMAG		PMAG			
	3.14	2.75	2.44	2.2						
Hor	8.8	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	
Ver	6.6	37.93	75.86	36.67	73.33	35.48	70.97	34.38	68.75	
1 polegada	PMAG		PMAG		PMAG		PMAG			
	4.57	4	3.56	3.2						
Hor	12.8	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	fmin	fmax	
Ver	9.6	41.03	82.05	40	80	39.02	78.05	38.1	76.19	

Figura 5.6: Tabela para escolha do melhor conjunto óptico.

Fonte: <http://s2i.das.ufsc.br/wiki/tiki-index.php?page=OpticalSetEvaluationGuide>

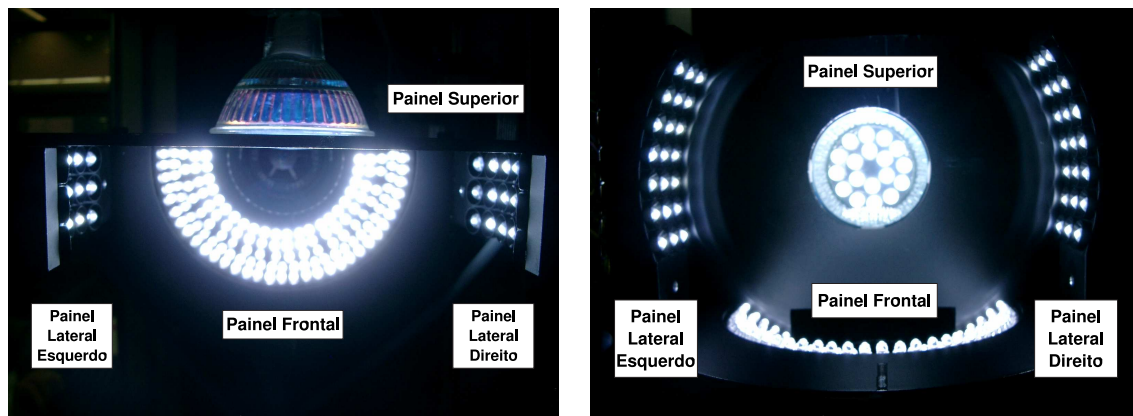


Figura 5.7: Painéis flexíveis de iluminação.

laterais e 1 painel superior. O painel frontal apresenta seus LEDs arranjados em forma semi-circular, emitindo feixes luminosos com diferentes ângulos de incidência sobre a face frontal da ferramenta, realçando as características de textura das superfícies iluminadas. Os painéis laterais possuem uma geometria curva e realçam principalmente arestas e descontinuidades na superfície da ferramenta. Já o painel superior é composto por um arranjo de LEDs em forma circular, para auxiliar no realce de características na região da quina da ferramenta.

Pelos painéis serem compostos de LEDs e comandados por uma placa de E/S, é possível controlar a intensidade luminosa dos painéis e encontrar a intensidade ideal para uma determinada ferramenta. O painel frontal oferece ainda uma configuração mais avançada, permitindo que conjuntos ou segmentos de LEDs sejam acesos de forma diferenciada para melhor realçar as características de uma

determinada ferramenta. A placa de E/S que realiza o controle de intensidade e configuração luminosa é uma PO64T da empresa Contec que possui 64 canais TTL de saída (figura 5.8). Um *driver* para controle dos painéis de iluminação por interface paralela do computador foi também desenvolvido para permitir a portabilidade do uso do sistema de iluminação em diferentes sistemas operacionais.



Figura 5.8: Placa de E/S PO64T da empresa Contec.
Fonte: <http://www.contec.com/>

5.2.3 Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição é responsável por captar os feixes luminosos provenientes da face da ferramenta e digitalizar os valores de intensidade luminosa registrados em cada *pixel* do sensor óptico. A câmera do sistema é uma Sony modelo CCD XC-75CE analógica, portando um sensor de 1/2 polegada (6.4 X 4.8mm) com uma matriz de 752 X 582 *pixels* de resolução para captura de imagens com até 256 diferentes tons de cinza (figura 5.9). Com a atual resolução do sensor e as configurações do sistema óptico, é possível realizar a calibração do sistema (conforme detalhado na seção 6.1.7), que resulta atualmente em 4,7 micrometros para cada *pixel*.

A resolução do sensor óptico é escolhida de acordo com incerteza de medição aceitável para o sistema. A experiência com a medição do desgaste das ferramentas demonstra que o valor do desgaste flanco varia de 100 a 600 micrometros. A atual resolução do sensor de 752 X 582 *pixels* mantém uma incerteza de $\pm 4.7\mu\text{m}$ por medição, correspondendo a um erro de medição de 4,7% sobre o valor mínimo do desgaste (100 μm), que é considerado um valor aceitável. Para garantir um erro de aproximadamente 1% sobre este valor, a incerteza de medição do sistema deveria ser de $\pm 1\mu\text{m}$, o que representaria uma resolução mínima horizontal de quase 3600 *pixels*, que é de certa forma impraticável devido aos custos atuais de tal sensor óptico. Porém, um sensor óptico padrão de 1600



Figura 5.9: Camera analógica Sony CCD XC-75CE com sensor CCD de 1/2 polegada.
Fonte: Pavim [1].

X 1200 já garantiria um erro de medição menor e bem mais aceitável, de 2,21% com uma incerteza de $\pm 2,21\mu\text{m}$ por medição.

Por tratar-se de uma câmera analógica, os dados adquiridos pelo sensor devem ser enviados a uma placa de aquisição de imagens, junto ao sistema processador, para que estes possam ser digitalizados antes do início do processamento.

5.2.4 Sistema de Manipulação das Ferramentas de Corte

O sistema de manipulação é responsável pela retirada da ferramenta do interior da máquina-ferramenta (do *magazine*), por colocá-la corretamente dentro da estação de medição do TOOLSPY e por fim posicionar a ferramenta em frente ao conjunto óptico do sistema, de acordo com suas características geométricas, para que uma imagem com boa iluminação e foco seja adquirida. O caminho inverso, desde a estação de medição até o *magazine* da máquina-ferramenta também deve ser realizado após cumprida a análise do desgaste da ferramenta.

Para transportar a ferramenta do *magazine* da máquina-ferramenta até a estação do TOOLSPY foi desenvolvido um sistema de manipulação composto por uma garra pneumática e três eixos mecânicos lineares movimentados por motores de passo da empresa Nanotec¹, acionados por módulos de controle CANopen da empresa Maccon², como já ilustrado no esquema da figura 1.5 da seção 1.5. Para a manipulação da ferramenta dentro da estação de medição, são utilizados dois eixos mecânicos lineares e um rotacional, responsáveis pelo posicionamento correto do gume da ferramenta diante do sistema óptico, de acordo com sua geometria. A movimentação destes eixos é realizada da mesma forma como mencionado no parágrafo anterior, conforme visto na figura 5.10.

¹<http://www.nanotec.com/>

²<http://www.maccon.de/>

*Eixos de movimentação**Módulos controladores CANopen***Figura 5.10:** Sistema de manipulação da ferramenta dentro da estação de medição.

Para estabelecer a comunicação do sistema de processamento com a rede CANbus e os controladores digitais da Maccon, é utilizada uma placa CAN-PCI/200 da empresa ESD³ que já fornece uma API de comunicação para desenvolvimento de aplicações (figura 5.11).

**Figura 5.11:** Placa CAN-PCI/200 da empresa ESD para controle da rede CANbus.

Fonte: <http://www.esd-electronics.com/>.

Este sistema de manipulação da ferramenta ainda funciona de maneira semi-automática, pois o controle dos eixos e da garra pneumática para transporte da ferramenta do *magazine* da máquina-ferramenta até a estação ainda não foi finalizado. Desta forma, somente os três eixos internos da estação de medição funcionam de forma automática, e a ferramenta de corte ainda é introduzida de forma manual na estação.

As ferramentas de corte possuem todas um dispositivo de fixação padrão, do tipo HSK 63A, que possui um encaixe específico respeitado tanto pelo *magazine* da máquina-ferramenta, quanto pelo

³<http://www.esd-electronics.com/>

sistema de manipulação do TOOLSPY.

5.2.5 Sistema de Processamento

O sistema de processamento é responsável pelo controle do sistema como um todo e do processamento das imagens adquiridas pelo sensor óptico. Conta atualmente com um processador Intel Celeron 2.4GHz com 512 MB de memória RAM.

As imagens adquiridas pelo sensor óptico são primeiramente digitalizadas através de uma placa de aquisição de imagens. A placa utilizada é uma PXC200A analógica colorida da empresa Imagenation Technology⁴, que além de suportar a conexão de até quatro câmeras, provê ainda oito canais de E/S para *trigger*, estrobo e demais operações de comunicação externa (figura 5.12).



Figura 5.12: Placa de aquisição PXC200A da empresa Imagenation Technology.
Fonte: Pavim [1].

5.2.6 Sistema de Transmissão de Dados

Em relação à transmissão de dados no sistema, pode-se citar:

Câmera/Placa de Aquisição: A placa de aquisição suporta diferentes tipos de protocolos de comunicação analógicos de vídeo, como NTSC, PAL, SECAM e S-Video, tanto para imagens monocromáticas, quanto para coloridas. A câmera transfere dados para a placa através de cabeamento BNC e protocolo PAL e recebe alimentação da própria placa de aquisição.

Módulo de Iluminação/Placa E/S: O módulo de iluminação recebe alimentação e sinais de controle para seus painéis de LEDs através de uma placa E/S com 64 saídas digitais TTL.

⁴<http://www.imagenation.com/>

Motores de Passo/Módulos CANopen: Os motores de passo são controlados através de comunicação por uma rede CANbus, obedecendo o protocolo de comunicação CANopen e os sinais provindos da placa controladora da rede e dos módulos CANopen.

5.3 Componentes de *Software* do Sistema de Visão

A parte de *software* do sistema engloba toda a parte de algoritmos de processamento das imagens, as estruturas de dados para armazenar informações e resultados deste processamento e também as estruturas para criação da interface gráfica de comunicação com o usuário. A solução de medição e classificação do desgaste em ferramentas de corte por visão requer o levantamento de uma série de algoritmos de processamento de imagens, que quando executados numa determinada ordem permitem separar características especiais das imagens, viabilizando a solução. Denomina-se “cadeia de processamento de imagens” este conjunto de algoritmos executados em ordem específica para a obtenção de informações e resultados a partir das imagens adquiridas do objeto em estudo.

Ao longo do desenvolvimento do projeto desde o ano de 2000, diversas estruturas de dados e interfaces foram criadas, visando tornar o projeto do *software* cada vez mais modular. Uma estrutura especial para criação e gerenciamento de cadeias de processamento de imagens foi implementada – a biblioteca IPFramework. O principal objetivo desta biblioteca era criar uma API para facilitar a programação, o gerenciamento e a reutilização dos diversos algoritmos, organizando-os em uma cadeia lógica de processamento com uma interface padronizada. Os conceitos e a modelagem desta biblioteca foram bem expostos no trabalho de Deschamps [3] e não serão aprofundados neste trabalho.

Um dos objetivos deste trabalho era avaliar a influência das abordagens de programação orientadas a objeto e das estruturadas sobre o desempenho da cadeia de processamento de imagens, para levantar dados para a otimização do *software* do sistema. Apesar da biblioteca IPFramework tornar o gerenciamento do projeto mais modular e fácil de ser gerenciado, ela acarreta uma perda de desempenho em relação ao tempo de execução dos algoritmos, por incluir um *overhead* de processamento desnecessário para atingir seus objetivos. Por isso, nenhuma otimização foi feita nesta biblioteca durante este trabalho. Foi dada maior prioridade à escolha dos melhores algoritmos de processamento de imagem para a solução e em atingir maior desempenho e robustez nas respostas devolvidas pelo sistema, o que levou a continuar a programação da cadeia de processamento de imagens de forma estruturada, “congelando” temporariamente a utilização da biblioteca IPFramework.

5.3.1 Desenvolvimento de *Software* segundo a Metodologia do S2i/WZL

O desenvolvimento do *software* do sistema TOOLSPY baseia-se principalmente nas linguagens de programação C e C++ [137, 138, 139, 140, 141, 142], pelo fato destas serem próprias para a implementação de *drivers* de comunicação com o *hardware* de visão e apresentarem um desempenho aceitável para as restrições de tempo real (tempo de resposta) do sistema. Quanto ao sistema de processamento de imagens em si, três bibliotecas são extensivamente utilizadas: a OPENCV, a S2ILIB e a MTQLIB.

A OPENCV teve seu desenvolvimento inicial realizado pela Intel⁵ e foi posteriormente aberta ao domínio público, sendo hoje administrada pela comunidade de *software* livre. A S2ILIB é uma biblioteca livre de processamento de imagens desenvolvida pelo grupo S2i dentro da Universidade Federal de Santa Catarina. Ela baseia-se fortemente em outras bibliotecas livres de processamento e aquisição de imagens, como a OPENCV, a VxL, a V4L e a SANE. Mais informações sobre a S2ILIB podem ser vistas no apêndice B. A MTQLIB é uma biblioteca proprietária desenvolvida no instituto WZL, que faz uso extenso de funcionalidades das bibliotecas S2ILIB e OPENCV.

A seguir são apresentadas as etapas de proposta, requisitos, análise e modelagem do *software* do sistema TOOLSPY, que fornecem o embasamento necessário para a implementação da solução. Na seqüência os testes e a documentação final do sistema são apresentados.

Proposta

A proposta para o atual estágio do sistema TOOLSPY é alcançar uma solução automática e robusta para a medição e classificação do desgaste em ferramentas por visão. Com a mudança de componentes de *hardware*, novos *drivers* e lógicas de controle tiveram de ser implementados/atualizados para prover sua integração ao sistema. A cadeia de processamento de imagens foi atualizada para se adaptar a estas mudanças, desde a aquisição de imagens (devido à troca de componentes ópticos e iluminação), até a segmentação, medição e classificação do desgaste (devido ao suporte a diversos tipos de ferramentas de corte).

Ao fim deste trabalho esperava-se alcançar uma solução robusta de *hardware* e *software* para a medição e classificação do desgaste em ferramentas e que fosse possível de construir uma réplica do sistema no lado brasileiro para poder ser transportado e testado para as necessidades das empresas nacionais interessadas no projeto. Este objetivo foi atingido em parte e está detalhado no capítulo 7.

⁵<http://www.intel.com/>

Requisitos/Análise

Segue a lista dos requisitos mais importantes para o projeto, juntamente de sua análise:

1. **Criação de uma interface gráfica simples e ergonômica para operação do sistema.**

A interface gráfica deve ser simplificada, não exigindo qualquer conhecimento avançado para poder operá-la. Não deve ser exigida nenhuma configuração ou entrada de dados ao usuário, a não ser a identificação da ferramenta a ser inspecionada, pois permite ao sistema carregar as informações geométricas da ferramenta de um banco de dados e escolher as melhores etapas de processamento de imagens para realizar a inspeção.

A interface inclui uma região para visualização da imagem registrada pela câmera do sistema, um botão para iniciar uma nova inspeção, juntamente com um campo para que o usuário entre com o número de identificação da ferramenta a ser inspecionada. Nesta mesma janela, campos para visualização dos resultados alcançados são sempre atualizados ao final de cada inspeção. Ainda são disponibilizados dois outros botões: um para disparar a medição manual do desgaste e outro para imprimir um relatório com os resultados da última inspeção realizada.

2. **Expansão da interface gráfica para usuários administradores, onde seja possível realizar configurações manuais de mais baixo nível no sistema.**

Apesar de simples, a interface deve permitir algum meio de acesso a configurações do sistema por parte de usuários avançados (ou administradores). Desta maneira, foram criadas janelas de configuração que permitem configurar manualmente os seguintes dispositivos/parâmetros:

Iluminação: Permitir que o usuário defina o tipo de iluminação a ser aplicado (ligar/desligar conjuntos de LEDs ou um painel completo) e regular sua intensidade luminosa.

Manipulação das Ferramentas: Permitir que o usuário defina manualmente valores para a manipulação dos três eixos de movimentação interna da estação de medição.

Cadeia de Processamento: Permitir que o usuário defina valores padrão para alguns algoritmos de processamento de imagem do sistema.

Estes recursos são disponibilizados por meio de teclas de atalho, que abrem automaticamente janelas de configuração, permitindo a edição avançada dos parâmetros do sistema.

3. **Os resultados de medição e classificação automática do desgaste das ferramentas de corte devem ser visualizados claramente na interface gráfica do sistema após uma inspeção.**

Todas as informações importantes do processo de medição e classificação devem ser disponibilizadas/atualizadas na interface gráfica em um campo próprio para visualização. Dentre este conjunto de informações estarão disponíveis o valor máximo do desgaste de flanco (VB_{max}), o valor médio do desgaste (VB), a área do desgaste (A_{VB}) e o tipo de desgaste encontrado. Os valores de medição já são convertidos e apresentados nas unidades apropriadas (milímetros).

4. O processo de medição e classificação do sistema deve ser robusto o suficiente para abranger mais de um tipo de ferramenta de corte na mesma solução.

Esta é uma das tarefas mais difíceis de ser cumprida, já que cada ferramenta apresenta características próprias e bem divergentes quanto à geometria, superfície, revestimento e textura. Isto implica uma configuração extremamente flexível da cadeia de processamento de imagens, para se adaptar a diferentes características das ferramentas e ainda assim prover uma medição e classificação precisa e confiável do desgaste.

É necessário rever as etapas de pré-processamento e segmentação do desgaste das ferramentas, buscando uma forma de detectar, separar e realçar as características do desgaste nas diferentes ferramentas. Um bom começo está em adquirir uma imagem com uma configuração de iluminação que realce bem as características do desgaste. A partir daí, algoritmos adaptativos podem ser empregados para descobrir os melhores parâmetros de realce e isolamento da área do desgaste. Dentre estes algoritmos pode-se citar o de equalização de histogramas, o filtro estatístico e o de limiarização. Procurando por informações estatísticas nas imagens é possível estimar bons parâmetros para o realce de características do desgaste em diferentes ferramentas.

5. Criação de um relatório de inspeção, onde sejam armazenadas todas as informações referentes à última inspeção realizada, permitindo o usuário imprimir os dados resultantes.

Ao final de cada inspeção é gerado um relatório de uma página no formato HTML onde todos os dados resultantes do processo de inspeção são agregados, juntamente com uma imagem da ferramenta inspecionada e com o contorno do desgaste saliente, para ilustrar visualmente o processo. O formato HTML foi escolhido para a geração do relatório por ser um padrão simples para a elaboração de documentos formatados e compatível com qualquer navegador em qualquer plataforma operacional, além de já contar com algumas estruturas de dados prontas na biblioteca S2ILIB para a inclusão destas funcionalidades no sistema.

6. Salvar resultados intermediários das principais etapas de processamento de imagens no disco rígido, para permitir rastreamento sobre o funcionamento do sistema.

Para permitir uma maior rastreabilidade do funcionamento completo do sistema, é imprescindível que algumas etapas chave da cadeia de processamento de imagens salvem seus resultados.

Na maior parte dos casos, imagens contendo os resultados de processamento podem ser armazenadas de forma organizada em um diretório específico do disco rígido. Alguns arquivos de configuração ou de desempenho dos algoritmos também podem ser úteis e devem ser levados em consideração. Para ferramentas com vários gumes, basta organizar as informações de cada gume em um diretório diferente, sob o escopo da mesma ferramenta.

7. Permitir que o sistema funcione em modo manual (como um microscópio), caso o usuário necessite confirmar os dados da inspeção automática.

É possível que o usuário queira refazer o cálculo da medição do desgaste manualmente para verificar se o cálculo automático retornado pelo sistema é coerente ou caso note-se algum erro de medição visível que foi retornado pelo sistema. Desta forma, é importante prover ao usuário uma ferramenta manual, que o assista no processo de medição do desgaste. A maneira mais simples de se realizar esta tarefa é requisitando ao usuário que clique com o ponteiro do *mouse* sobre a imagem da ferramenta, indicando os pontos extremos do desgaste. A ferramenta se encarrega de demarcar as coordenadas do *mouse* e realizar a medição.

8. Prover atualização constante do estado do sistema ao usuário durante o processo de aquisição de imagens, processamento, medição e classificação.

É importante atualizar o estado da interface gráfica do sistema para que o usuário acompanhe a evolução das inspeções e tenha certeza de que o sistema continua operando corretamente. Duas são as opções de atualização da interface:

- Manter a imagem adquirida pelo sistema sendo atualizada em modo “ao vivo” desde o início até o final da inspeção, pois demonstra que o sistema não está travado.
- Incluir e atualizar com frequência uma barra de *status* em alguma região da interface gráfica, provendo uma informação da porcentagem de conclusão de cada inspeção.

9. Realizar a integração do banco de dados de informações das ferramentas com a cadeia de processamento de imagens.

Através de um banco de dados com as informações próprias de cada tipo de ferramenta é possível carregar as configurações corretas para as inspeções do desgaste. Informações sobre a geometria da ferramenta, coordenadas do sistema de manipulação e parâmetros para algoritmos de processamento de imagens são os dados mais comuns a serem armazenados.

Para realizar a integração de um banco de dados MS Access com o sistema TOOLSPY foi utilizada uma API própria para esta comunicação, conhecida como DAO (*Data Access Objects*), que provê uma abordagem orientada a objetos para realizar os acessos ao banco de dados.

10. **Realizar a integração do novo *hardware* do sistema com a cadeia de processamento de imagens: sistema de manipulação da ferramenta, sistema de iluminação.**

Todas as etapas de processamento devem estar bem sincronizadas, especialmente aquelas que fazem uso de comunicação com *hardware*, como é o caso do posicionamento das ferramentas e da aquisição das imagens. Desta forma, a lógica de controle do sistema de iluminação foi atualizada para tratar dos novos painéis de iluminação que foram adicionados ao sistema, sendo apenas uma questão de mudança no controle lógico do acionamento dos LEDs. A comunicação com o sistema de manipulação das ferramentas (motores de passo) através da rede CANbus também foi implementada. Uma API para comunicação através do protocolo CANopen é fornecida pela Maccon junto aos módulos de controle da rede, sendo necessário encapsular a chamada para as principais rotinas em uma classe e integrá-la ao *software* do sistema.

11. **Criar uma solução para calibração automática do sistema.**

Não há como prover resultados de medição coerentes sem antes efetuar uma calibração do sistema de visão, que definirá as dimensões reais para cada *pixel* das imagem do sistema. Até o momento a tarefa de calibração do protótipo era feita manualmente, usando rotinas de calibração externas ao sistema. Porém, a qualquer mudança dos parâmetros ópticos ou de aquisição, uma nova calibração deve ser realizada por um operador experiente.

Esta tarefa pode ser automatizada utilizando técnicas tradicionais para calibração de sistemas 2D através de imagens de gabaritos com a forma de um tabuleiro de xadrez. Uma ferramenta especial incluindo uma miniatura de um tabuleiro de xadrez com dimensões conhecidas pode ser inserida ao sistema. Através de uma sequência de aquisições de imagens com diferentes posições de foco desta ferramenta, é possível inferir a respeito da imagem de melhor foco e procurar trabalhar sobre esta para atingir um valor exato para o valor de um *pixel* na imagem.

12. **O sistema deve ser compatível com as plataformas Windows XP e 2000.**

O Instituto WZL adota como padrão as plataformas Windows XP e 2000 tanto para ambiente de trabalho como para ambiente de desenvolvimento de aplicações, sendo por isso uma exigência que toda solução de *software* desenvolvida seja mantida compatível com estas duas plataformas.

Modelagem

Tendo em mãos todos os requisitos importantes para o bom funcionamento do sistema e tendo-os analisado segundo seus critérios de implementação, pode-se agora levantar a estrutura modular de todo o sistema. Esta etapa de modelagem utiliza extensivamente a linguagem UML [46, 143, 144], por tratar-se de uma linguagem visual padrão de documentação de projetos de *software*.

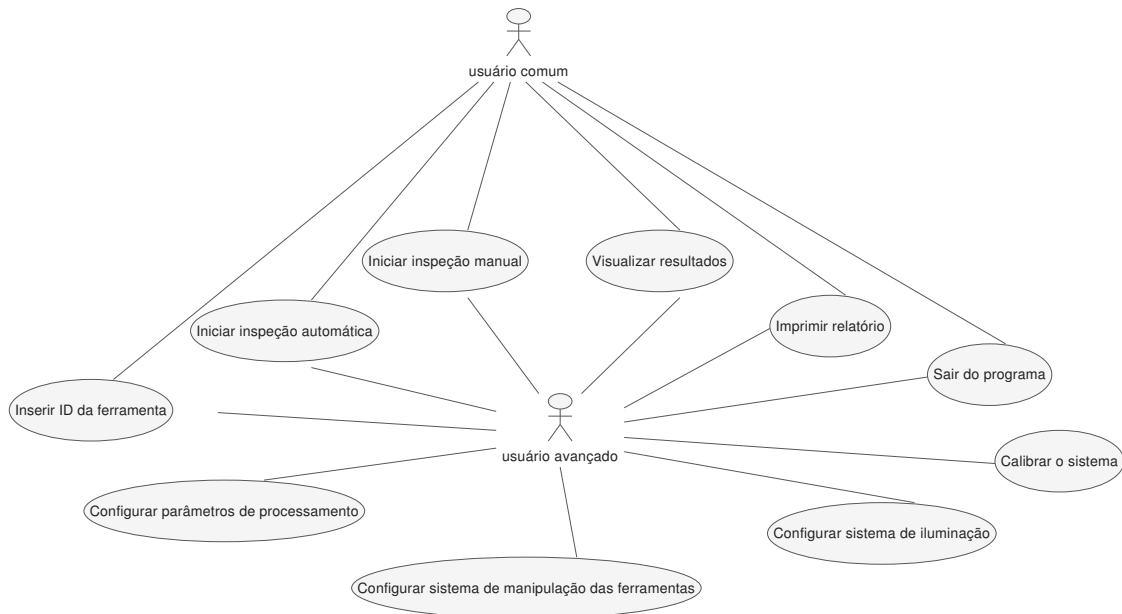


Figura 5.13: Diagrama de caso de uso para utilização do sistema TOOLSPY.

De início pode-se definir um diagrama de caso de uso para a utilização/comunicação da interface do sistema TOOLSPY com o usuário operador. Neste caso de uso, definem-se dois atores (um usuário comum e outro avançado) e todas as ações que podem ser desenvolvidas pelos usuários, conforme pode ser visto na figura 5.13. Nota-se pelo diagrama que o usuário comum está limitado a certas operações do sistema, enquanto o usuário avançado (administrador) tem livre acesso para configurar o sistema. Segue uma descrição de cada operação:

Inserir ID da ferramenta: É a primeira ação a ser tomada pelo usuário do sistema antes de realizar uma inspeção. A identificação da ferramenta auxilia o sistema a carregar suas informações a partir do banco de dados para permitir o correto processamento das imagens adquiridas.

Iniciar inspeção automática: Após inserir a identificação da ferramenta, o usuário pode iniciar sua inspeção automática.

Iniciar inspeção manual: A inspeção manual auxilia a validar os resultados de uma inspeção automática. Por isso, pode apenas ser disparada após a medição automática já ter sido realizada.

Visualizar resultados: Além de receber os resultados de medição e classificação do desgaste da ferramenta na interface, o usuário pode navegar dentre os diversos insertos de uma mesma ferramenta, para acompanhar a progressão do desgaste em cada uma delas.

Imprimir relatório: Ao final de uma inspeção é possível requisitar uma impressão dos resultados

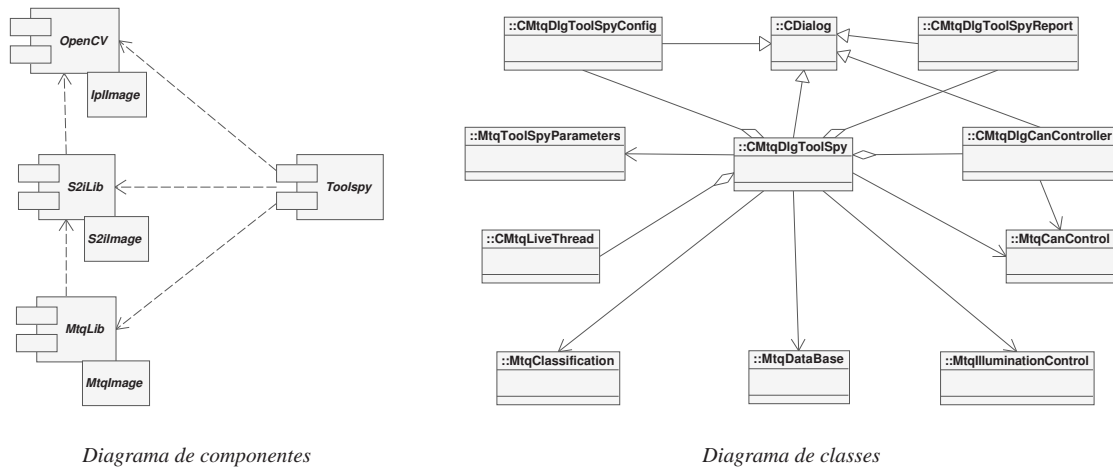


Figura 5.14: Diagrama de componentes e de classes do sistema TOOLSPY.

Fonte: Atualizada a partir de de Moraes [24].

de medição e classificação de cada gume inspecionado.

Sair do programa: Fecha o programa em qualquer momento.

Calibrar o sistema: Ação direcionada para usuários avançados. Permite realizar uma calibração automática do sistema através do uso de uma ferramenta especial, que porta um gabarito em forma de tabuleiro de xadrez com dimensões conhecidas impresso em sua face.

Configurar parâmetros de processamento: Ação direcionada para usuários avançados. Permite configurar alguns parâmetros padrões de processamento de imagem, como por exemplo, o tamanho das regiões de interesse (ROI) na imagem e limiares de filtragem e segmentação.

Configurar sistema de iluminação: Ação direcionada para usuários avançados. Permite escolher a intensidade luminosa dos painéis de iluminação, assim como configurar um conjunto específico de LEDs para serem acionados.

Configurar sistema de manipulação das ferramentas: Ação direcionada para usuários avançados. Permite configurar manualmente a posição dos motores de passo através da interface CANbus.

Para exercer o controle completo sobre o sistema, diversas classes são criadas e todas são coordenadas por uma classe gerenciadora que administra a interface gráfica de comunicação com o usuário (CMtqDlgToolSpy). Como já mencionado, o sistema TOOLSPY utiliza diversas funcionalidades de três bibliotecas de processamento de imagem: a OPENCV, a S2ILIB e a MTQLIB. A figura 5.14 ilustra o relacionamento do TOOLSPY com as bibliotecas de processamento de imagens e a estrutura de classes que será empregada para controle geral do sistema. Segue uma descrição de cada classe:

CMtqDlgToolSpy: Esta é a principal classe e janela do sistema. É derivada de uma classe CDialog e serve de interface de comunicação com o usuário e com todos os dispositivos do sistema. Todas as demais janelas do sistema são chamadas/criadas a partir dela e até mesmo a cadeia de processamento de imagens é disparada a partir de seus comandos. O usuário comum tem acesso apenas à interface provida pela janela desta classe.

CMtqDlgToolSpyConfig: Derivada de uma CDialog, esta é a classe responsável por apresentar uma janela gráfica para configuração dos parâmetros de processamento de imagem padrões e também dos painéis de iluminação. Apenas usuários avançados têm acesso a ela.

CMtqDlgToolSpyCanController: Derivada de uma CDialog, esta é a classe responsável por apresentar uma janela gráfica para configuração do sistema de manipulação da ferramenta, permitindo ao usuário avançado movimentar manualmente os motores de passo para uma desejada posição. A partir desta janela de configuração pode-se ainda disparar o processo de calibração automática do sistema e carregar configurações de iluminação pré-ajustadas.

CMtqDlgToolSpyReport: Derivada de uma CDialog e implementando uma visão de documentos HTML (CHtmlView), esta é a classe responsável por apresentar uma janela gráfica sintetizando todas as informações úteis da inspeção de um determinado inserto de uma ferramenta sob o formato HTML. A criação do documento HTML é realizado através de requisições feitas à biblioteca S2ILIB por parte da janela principal do sistema, que entrega todas as informações formatadas para serem apresentadas na janela CMtqDlgToolSpyReport. A partir dela pode-se também requisitar uma impressão destas informações.

CMtqLiveThread: Esta classe é responsável por manter uma *thread* autônoma rodando para manter atualizadas as imagens adquiridas pelo sensor óptico do sistema, simulando um modo de aquisição “ao vivo” na janela principal do sistema (CMtqDlgToolSpy).

MtqToolSpyParameters: Esta classe é responsável por armazenar os parâmetros de configuração padrões de alguns algoritmos de processamento de imagem. Ela é acessada pela classe CMtqDlgToolSpyConfig através da interface da classe principal CMtqDlgToolSpy toda vez que for necessária a leitura ou escrita de algum parâmetro do sistema.

MtqDataBase: Esta classe serve como uma interface de comunicação entre o *software* do TOOLSPY e o banco de dados que armazena as informações específicas de cada tipo de ferramenta inspecionada pelo sistema. A cada requisição de nova inspeção a partir da interface principal do sistema, ela utiliza a API da biblioteca DAO através da classe CDaoDatabase para se comunicar

com um banco de dados MS Access e resgatar as informações necessárias para a realização do posicionamento da ferramenta e medição do desgaste.

MtqIlluminationControl: Esta é a classe responsável por armazenar os parâmetros de configuração do sistema de iluminação, em especial, a configuração dos conjuntos de LEDs que devem ser acionados e a intensidade de cada painel. Ela é acessada pela classe CMtqDlgToolSpy-Config através da interface da classe principal CMtqDlgToolSpy toda vez que for requisitado o carregamento ou salvamento das configurações de iluminação.

MtqCanControl: Esta classe serve como interface de comunicação entre o *software* do TOOLSPY e o sistema de manipulação da ferramenta. Ela utiliza a API de comunicação provida pela Maccon para comunicar com os módulos DSM CANopen, que por sua vez acionam os motores de passo através da rede CANbus. Os recursos desta classe podem ser chamados automaticamente a partir da interface principal (CMtqDlgToolSpy) toda vez que uma nova inspeção for requisitada, ou manualmente através da janela de configuração do sistema de manipulação (CMtqDlgToolSpyCanControl) por pedido de um usuário avançado.

MtqClassification: Esta é a classe responsável pelas tarefas de classificação do desgaste das ferramentas, cujas funcionalidades são disparadas a partir da cadeia de processamento de imagens.

Implementação

Neste ponto já temos em mãos toda a descrição fundamental do projeto, os requisitos analisados e uma arquitetura de *software* levantada pela modelagem. O primeiro passo agora é traduzir estas informações em linhas de código de uma linguagem de programação desejada. No caso do TOOLSPY, as linguagens C e C++ foram utilizadas, devido à facilidade de comunicação com o *hardware* do sistema, organização e estruturação do código através destas linguagens.

De início deve-se criar um esqueleto ou casca do sistema, traduzindo toda a arquitetura gerada na etapa de modelagem para “classes vazias” (funcionalidades abstraídas), apenas para criar o corpo ou interface do sistema e evitar erros de compilação futuros, nos momentos em que o *software* vai ganhando proporções muito grandes. Nesta etapa deve-se aplicar as normas de nomenclatura e documentação do *software*, para facilitar a compreensão do código por demais membros do grupo. A nomenclatura segue um padrão adotado nos grupos S2i e WZL e a documentação obedece às normas da ferramenta Doxygen⁶, utilizada especialmente para gerar uma documentação profissional dos projetos de *software* gerados.

⁶<http://www.doxygen.org/>

Quando se tem todo o esqueleto do sistema programado e documentado, inicia-se a etapa de inclusão de funcionalidades, obedecendo ao que foi descrito e combinado nas etapas de requisitos e análise. Para a programação do sistema TOOLSPY, os *drivers* de comunicação com o *hardware* de visão e a cadeia de processamento de imagens, foram utilizadas algumas ferramentas de desenvolvimento para as linguagens C e C++. Na plataforma Windows foi utilizada a ferramenta Visual C++ 6.0⁷. Já na plataforma GNU/Linux foi utilizada a ferramenta Anjuta⁸. Ambas ferramentas (figura 5.15) são excelentes IDEs para a programação e compilação do código fonte e da interface gráfica do sistema, apresentando diversos recursos integrados, como por exemplo, editor de texto com realce de sintaxe de programação (*syntax highlight*), assistente para edição de interfaces gráficas, depurador de erros, organização dos arquivos do projeto em árvore de visualização, dentre outros. Alguns componentes específicos para a plataforma Windows, como a interface gráfica do sistema TOOLSPY, foram apenas programados usando a ferramenta Visual C++, tendo em vista que um dos requisitos do projeto era tornar o sistema compatível com as plataformas Windows XP e 2000. Demais componentes foram programados de forma genérica para serem suportados em mais de uma plataforma, e puderam ser desenvolvidos com a ferramenta Anjuta na plataforma GNU/Linux (especialmente a cadeia de processamento de imagens).

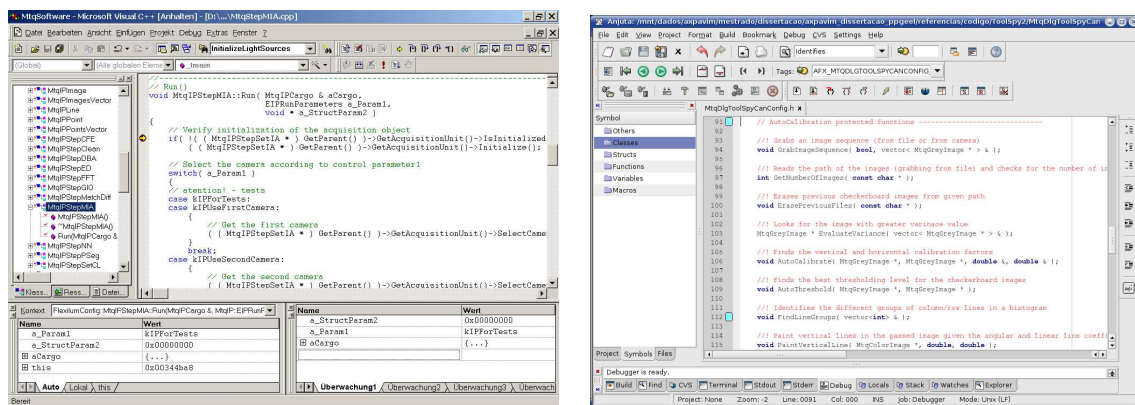


Figura 5.15: Ambientes de desenvolvimento Visual C++ e Anjuta, respectivamente.

Como o desenvolvimento do sistema TOOLSPY completo contou com a participação de diversos integrantes, foi preciso adotar um sistema de gerenciamento de versões do código fonte, que permitisse mais de uma pessoa trabalhar sobre um mesmo arquivo, sem que suas alterações sobrescrevessem ou desorganizassem o trabalho de outros. A ferramenta adotada foi o CVS⁹. A figura 5.16 ilustra a interface gráfica usada para gerenciar o código fonte através do sistema CVS. Esta é uma ferramenta multiplataforma e funciona tanto na plataforma Windows quanto em GNU/Linux.

⁷<http://msdn.microsoft.com/visualc/>

⁸<http://www.anjuta.org>

⁹<http://www.cvshome.org/>



Figura 5.17: Ferramentas inspecionadas durante os testes do sistema TOOLSPY.

xadrez, com dimensões conhecidas e impresso em alta resolução. Estas ferramentas podem ser vistas na figura 5.17.

Seguem alguns pontos que permanecem ainda pendentes após o período de testes do sistema e fim deste trabalho:

Interface gráfica: Alguns recursos das janelas de configuração passaram a ser desconsiderados a partir do momento que a cadeia de processamento de imagens foi otimizada e alterada.

Alguns problemas com a *thread* de atualização das imagens do sensor óptico do sistema foram notados, especialmente quando a tela de interface do sistema perde foco para outro aplicativo.

Comunicação: Apesar da lógica de controle do sistema de manipulação estar funcionando corretamente, a rede CANbus apresenta um atraso muito grande de resposta, o que afeta profundamente o desempenho do sistema, sem afetar a qualidade da resposta, mas sim o tempo total para a entrega da resposta pelo sistema. Até mesmo o sistema de calibração automática do sistema foi afetado significativamente com estes atrasos de comunicação.

Processamento de imagem: A configuração fechada da íris do sistema óptico continua gerando imagens com iluminação lateral escuras, exigindo demais do *software* para realce do desgaste.

O algoritmo *snakes* apresentou um comportamento inesperado para algumas situações de desgaste de flanco de pequenas proporções, retornando um contorno do desgaste distorcido em relação ao esperado. Porém o erro apresentou-se de forma aleatória, acontecendo em determinadas ocasiões, e não se repetindo em outras quando aplicado sobre a mesma imagem.

Documentação

A documentação acontece ao longo de todas as etapas de desenvolvimento do projeto. Qualquer documentação extra que seja relevante constar no projeto pode ser anexada, para referência posterior por parte de novos integrantes da equipe. Segue uma documentação das janelas que compõem a interface gráfica do sistema:

Janela principal: Oferece todas as funcionalidades básicas do sistema aos usuários comuns, permitindo inspeções automáticas e manuais das ferramentas, impressão de relatórios e visualização de resultados. Permite acesso às demais janelas de configuração ao clicar sobre o logo do projeto junto com teclas de atalho (Shift e Ctrl).

A medição manual pode ser disparada após uma inspeção automática do sistema. O usuário utiliza o *mouse* para traçar linhas de referência, como em um microscópio. Os dois primeiros cliques definem dois pontos (P1 e P2) para traçar a linha base que acompanha a borda superior da ferramenta. O terceiro clique define o ponto (P3) correspondente à maior distância do desgaste em relação ao topo da ferramenta e assim o sistema traça uma segunda reta paralela à primeira, calculando a distância entre elas e retornando a informação para o usuário.

Janela de configuração de parâmetros de processamento e iluminação: Oferece opções para carregar, salvar e configurar os parâmetros do sistema de iluminação, além de outros parâmetros de algoritmos de processamento de imagens. Muitos destes parâmetros já encontram-se obsoletos devido às diversas mudanças realizadas na cadeia de processamento do sistema.

Janela de configuração do sistema de manipulação da ferramenta: Oferece opções para a movimentação manual do sistema de manipulação, a partir da entrada do número de passos de cada motor de passo do sistema. Oferece ainda a opção de calibração automática do sistema. A parte de equalização manual do histograma das imagens tornou-se obsoleta e substituída por uma equalização automática.

Janela de relatório: Oferece um conjunto de informações resultantes do processo de inspeção de uma ferramenta formatadas em um documento HTML.

Este capítulo apresentou as características de *hardware* e *software* do sistema TOOLSPY, explicando as decisões tomadas no projeto destes componentes. O capítulo seguinte explica em detalhes os passos realizados na cadeia de processamento de imagens do sistema, para realizar a medição e classificação do desgaste das ferramentas. Informações complementares que auxiliam a compreensão deste e do próximo capítulo podem ser vistas no apêndice A.

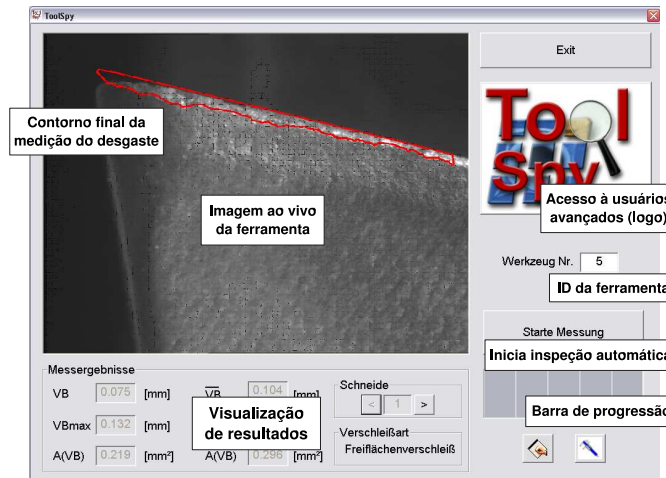


Figura 5.18: Janela principal da interface gráfica do TOOLSPY.

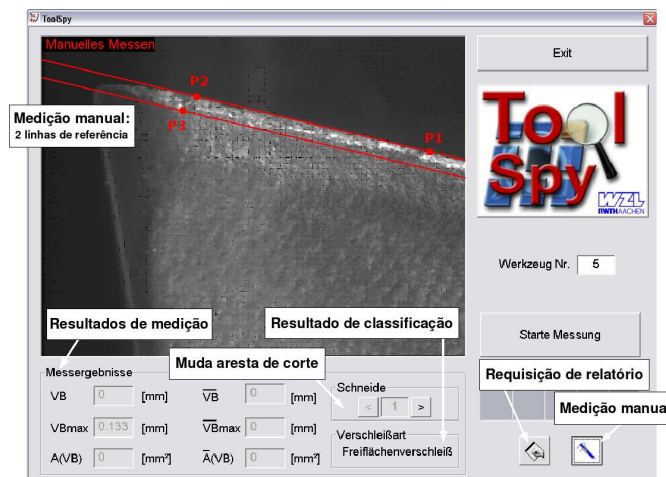


Figura 5.19: Janela principal da interface gráfica executando medição manual do TOOLSPY.

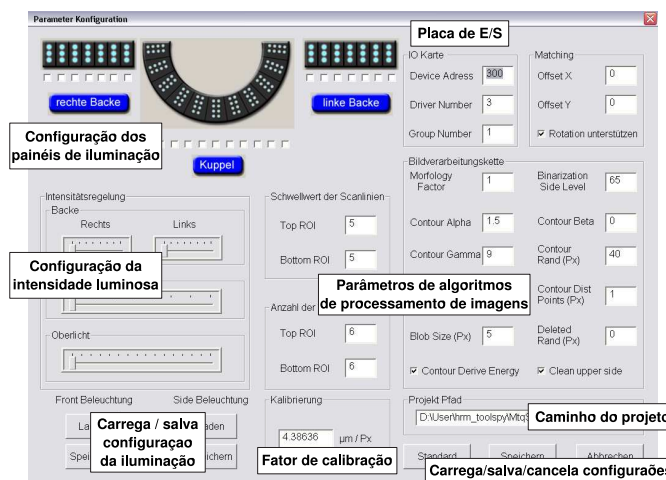


Figura 5.20: Janela de configuração de parâmetros do TOOLSPY.

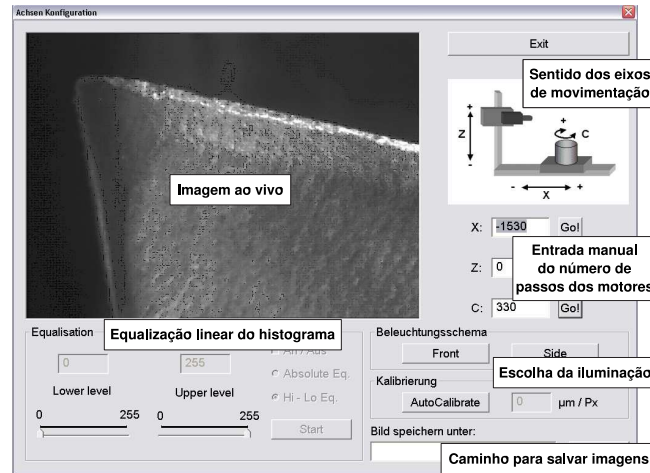


Figura 5.21: Janela de configuração do sistema de manipulação do TOOLSPY.

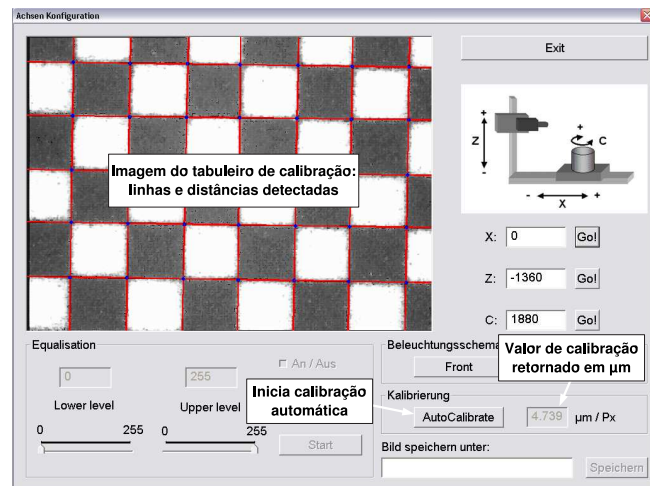


Figura 5.22: Janela de configuração do sistema de manipulação executando a calibração.

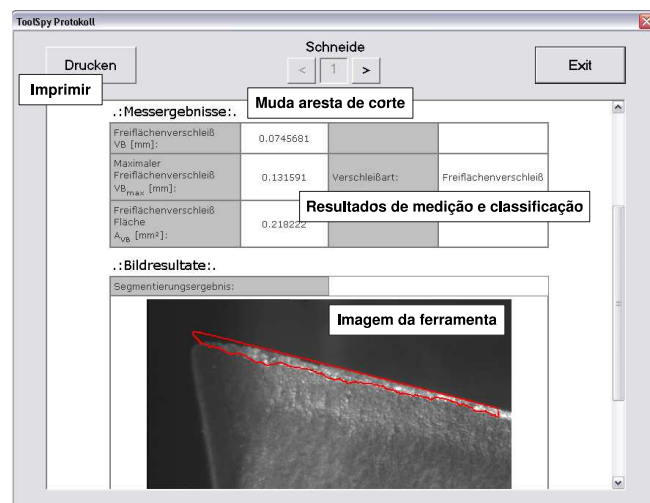


Figura 5.23: Janela de relatório do TOOLSPY.

Capítulo 6

Detecção, Medição e Classificação do Desgaste das Ferramentas de Corte

Este capítulo detalha os algoritmos da cadeia de processamento de imagens do sistema. Ela conta atualmente com as etapas de: aquisição de imagens, detecção de bordas, pré-processamento, extração de características, classificação e medição, como ilustrado na figura 6.1. O sistema conta ainda com uma etapa de calibração automática, importante para prover a taxa de conversão do processo de medição do desgaste para uma unidade métrica padrão.

Boa parte da documentação contida neste capítulo foi baseada nos documentos [54], [24], [23], [12] e [13], tendo sido atualizada com as mudanças e novos passos que foram implementados em cada etapa da cadeia de processamento de imagens. A compreensão deste capítulo é facilitada após a leitura da seção A.2 que encontra-se no apêndice A e explica detalhadamente diversas das técnicas de processamento de imagens vistas aqui. Segue uma explicação técnica detalhada de todas as etapas de processamento de imagens do sistema.

6.1 Cadeia de Processamento de Imagens

A cadeia de processamento de imagens estabelece uma interconexão entre diversos algoritmos, recebendo como entrada as imagens adquiridas pelo sensor óptico e retornando como saída a classificação e os valores de medição do desgaste (VB_{max} , VB e AVB).

A primeira abordagem da cadeia de processamento de imagens do TOOLSPY foi elaborada por Orth [2], baseando-se principalmente nas abordagens de Cuppini et al. [131] (iluminação com fibras ópticas direcionáveis), Du et al. [136] (subtração de imagens) e Teshima et al. [109] (classificação do

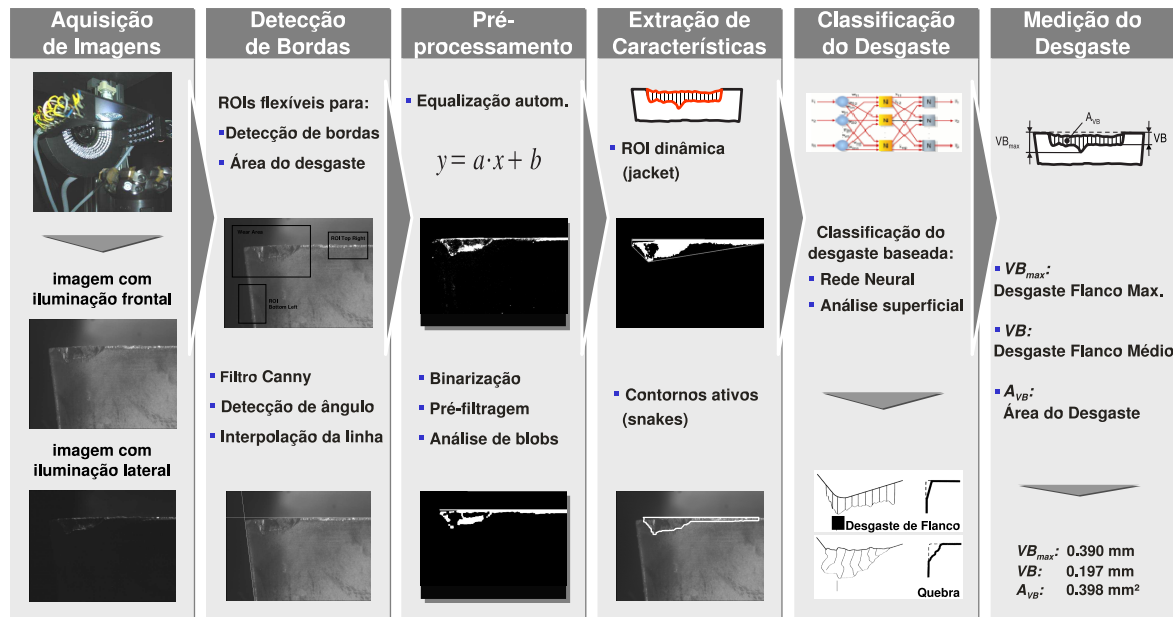


Figura 6.1: Cadeia de processamento de imagens do sistema ToolSpy.

desgaste por redes neurais). Porém esta solução só era aplicável em ambiente laboratorial e restrita a um tipo de ferramenta. Grande parte das demais abordagens apresentadas na seção 4.4.1 tratavam o problema de detecção e medição do desgaste de forma muito simplória, fazendo uso apenas de técnicas de limiarização para segmentar a região do desgaste do restante da imagem. Estas abordagens se mostraram insuficientes para tratar com robustez e repetibilidade o problema de medição do desgaste.

Para garantir a aplicabilidade da solução para diferentes tipos de ferramentas de corte, o sistema ganhou um novo módulo de iluminação, baseando-se nas sugestões levantadas por Pfeifer and Wieggers [11]. Nas demais etapas de processamento, para realizar a identificação e segmentação do desgaste das ferramentas, algumas sugestões de Kurada and Bradley [68] e Otto and Kurik [101] foram utilizadas na otimização destas tarefas, para garantir a robustez e repetibilidade do sistema.

Segue uma descrição completa das etapas da cadeia de processamento de imagens.

6.1.1 Aquisição de Imagens

Esta etapa é responsável pela aquisição automática de duas imagens do mesmo gume da ferramenta, porém, utilizando configurações de iluminação diferentes (figura 6.2). A primeira imagem adquirida utiliza quase todo o poder dos painéis de iluminação frontal, laterais e superior, resultando em uma imagem de 752 X 582 pixels com iluminação forte do tipo multi-direcional e homogênea em todas as partes da ferramenta. Ela é denominada “imagem com iluminação frontal”. Com esta imagem procura-se realçar as características superficiais da ferramenta uniformemente. Já a segunda

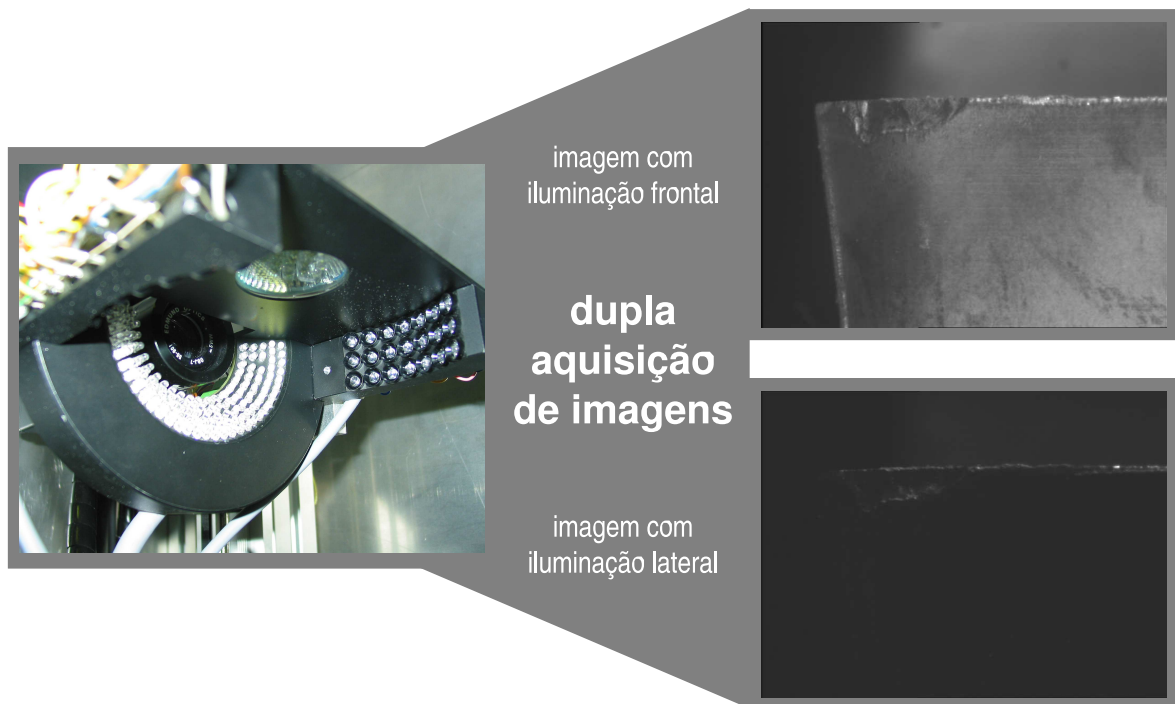


Figura 6.2: Aquisição de duas imagens com configuração de iluminação diferentes.

imagem utiliza apenas um painel lateral do módulo de iluminação, resultando em uma imagem de mesma dimensão com iluminação do tipo campo escuro e visualmente muito escura. Ela é denominada “imagem com iluminação lateral”. Apesar de escura, é nesta imagem que se realiza a maior parte do processamento, pois apenas as regiões do desgaste da ferramenta são realçadas utilizando-se esta configuração de iluminação.

Os principais motivos que levam a imagem com iluminação lateral ser tão escura são:

- Uma configuração do sistema óptico com íris bem fechada para aumentar a profundidade de campo das lentes e garantir foco na região curvilínea do gume da ferramenta.
- Pequena potência de iluminação dos painéis laterais em comparação ao painel frontal.

A intensidade dos painéis de iluminação e a configuração dos conjuntos de LEDs a serem acionados em ambas aquisições dependem da geometria da ferramenta de corte. Por isso, as configurações de cada tipo de ferramenta podem ser carregadas do banco de dados do sistema no momento de uma nova inspeção. Da mesma forma, os parâmetros de posicionamento da ferramenta diante da câmera também são carregados do banco de dados.

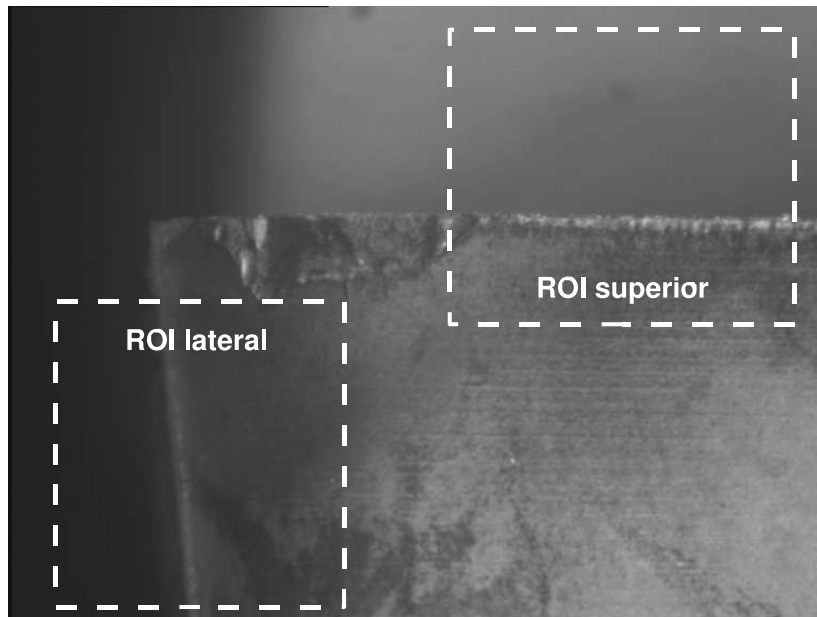


Figura 6.3: Regiões de interesse (ROIs) para detecção das bordas da imagem.

6.1.2 Detecção de Bordas

A etapa de detecção de bordas é a única que trabalha com a imagem com iluminação frontal, pois necessita de todas as características da ferramenta realçadas para procurar por suas bordas superior e lateral. Isto permite separar a área interna da ferramenta do fundo da imagem, que contém muita informação desnecessária e que atrapalha o processamento normal das informações do desgaste (em especial um pedaço da haste de fixação das arestas de corte).

Para encontrá-las, esta etapa recebe informações do banco de dados referente à orientação e localização das bordas em relação à imagem: duas ROIs de dimensões conhecidas (figura 6.3). São então aplicados filtros espaciais de detecção de linhas sobre as duas ROIs da imagem, que realçam as características de alta frequência (mudanças abruptas no nível de intensidade luminosa) da ferramenta. Três tipos diferentes de filtros foram testados: *Sobel*, *Prewitt* e *Canny* [123, 145, 146, 147], tendo este último apresentado os melhores resultados para a detecção das bordas (figura 6.4).

Para finalizar a identificação das bordas da ferramenta, um algoritmo de interpolação de linhas (mínimos quadrados) é aplicado sobre as ROIs filtradas, para inferir sobre as melhores retas que representam as bordas da ferramenta. Os coeficientes linear e angular de cada reta são armazenados para permitir a utilização das bordas da ferramenta em etapas de processamento futuras.

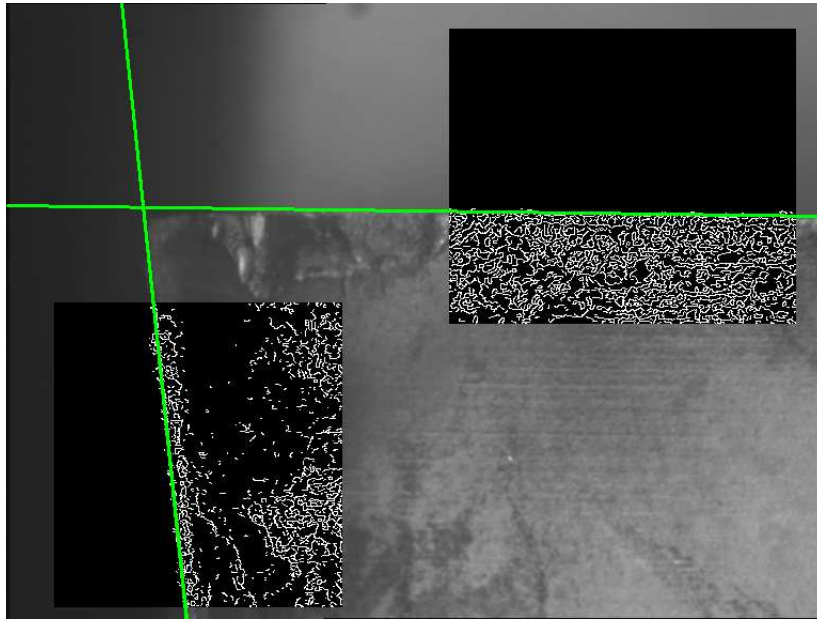


Figura 6.4: Detecção de bordas empregadas com filtro Canny nas ROIs da imagem.

6.1.3 Pré-processamento

Com a informação das bordas em mãos, apenas a imagem com iluminação lateral passa a ser utilizada. Apesar de ser bem mais escura e aparentemente não apresentar nada de interessante, é nesta imagem de iluminação tipo campo escuro que a área do desgaste está melhor representada, pois apenas as regiões da superfície da ferramenta que apresentam irregularidades (desgaste) é que refletem a projeção lateral dos raios luminosos.

Nesta etapa deseja-se realçar e separar (segmentar) as características do desgaste do restante da ferramenta na imagem, para poder realizar algum tipo de medição sobre sua área. O primeiro passo a ser tomado é separar a própria área interna da ferramenta de corte do restante da imagem, utilizando a informação das bordas da ferramenta extraída anteriormente da imagem com iluminação frontal, para apagar todo conteúdo externo aos limites da ferramenta de corte na imagem com iluminação lateral, conforme ilustrado na figura 6.5.

O passo seguinte visa realçar as características do desgaste visualmente, distribuindo de forma mais homogênea as intensidades luminosas que permaneceram na imagem, dando maior contraste para identificar a região do desgaste. Para isto utiliza-se um algoritmo de equalização linear do histograma da imagem. Este algoritmo recebe como entrada dois valores de limiar (*threshold* máximo e mínimo) que definem os limites de distribuição dos valores de intensidade luminosa da imagem. Supondo que os valores de intensidade máximo e mínimo de limiar para a equalização sejam 80 e 20 (valores quaisquer dentro de uma faixa de 0 a 255), isto implicaria tornar todos os níveis superiores ao

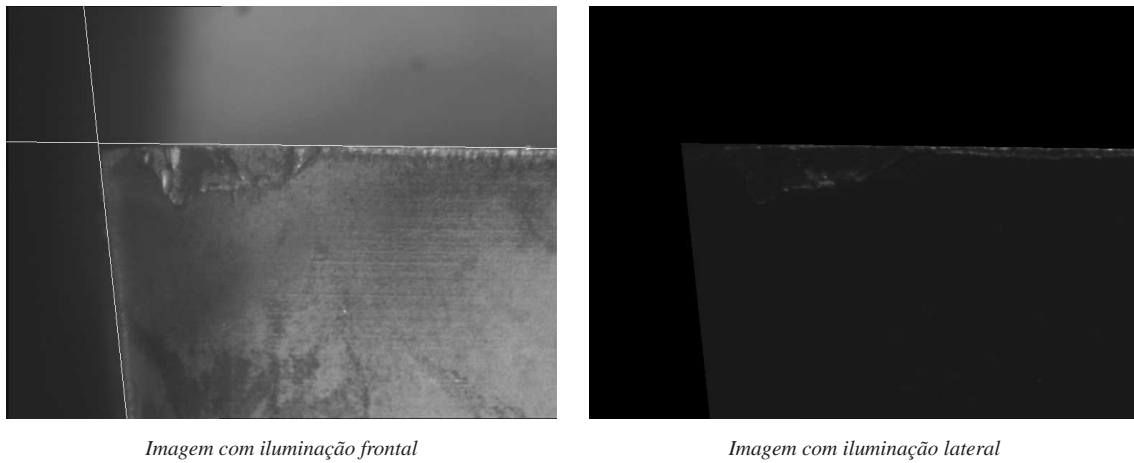


Figura 6.5: Utilizando informações da borda da ferramenta para isolá-la do fundo da imagem.

valor de intensidade 80 iguais ao máximo valor de saturação (em geral 255) e os níveis abaixo de 20 saturarem em 0. Os demais valores que restam (na faixa entre 20 e 80) são redistribuídos linearmente para ocupar a faixa completa do histograma (de 0 a 255, por exemplo). Esta redistribuição dos valores obedece a equação linear:

$$y = \alpha \cdot x + \beta$$

Os valores de α e β podem ser calculados substituindo os valores de x e y na equação, considerando que para $y = 0$ tem-se um valor correspondente de $x = \text{limiar mínimo}$; e para $y = 255$ temos $x = \text{limiar máximo}$; isto resulta na seguinte expressão para α e β :

$$\begin{cases} \alpha = 255 / (\text{máximo} - \text{mínimo}) \\ \beta = -1 \cdot \text{mínimo} \cdot \alpha \end{cases}$$

Porém, cada gume da ferramenta requer valores de limiar diferentes para a equalização de seu histograma, de acordo com a iluminação aplicada, o tipo e o tamanho do desgaste encontrado momentaneamente. Devido à dificuldade de encontrar valores genéricos para os limiares do algoritmo é que um algoritmo de equalização automática do histograma das imagens foi implementado.

Este algoritmo leva em consideração alguns parâmetros estatísticos da imagem para identificar os melhores limiares de equalização, como por exemplo, valores de intensidade máxima, mínima, média e desvio padrão, contagem do número de *pixels* brancos e pretos, além de realizar um estudo do número de ruídos (análise de pequenos *blobs* [148, 149]) remanescentes na imagem. Ele funciona em três passos iterativos, em que o primeiro passo procura definir um valor aceitável para o valor mínimo de limiar do algoritmo através do aumento progressivo deste valor e um controle da porcentagem de *pixels* pretos que surgem na imagem. O segundo passo é semelhante para definir um valor aceitável

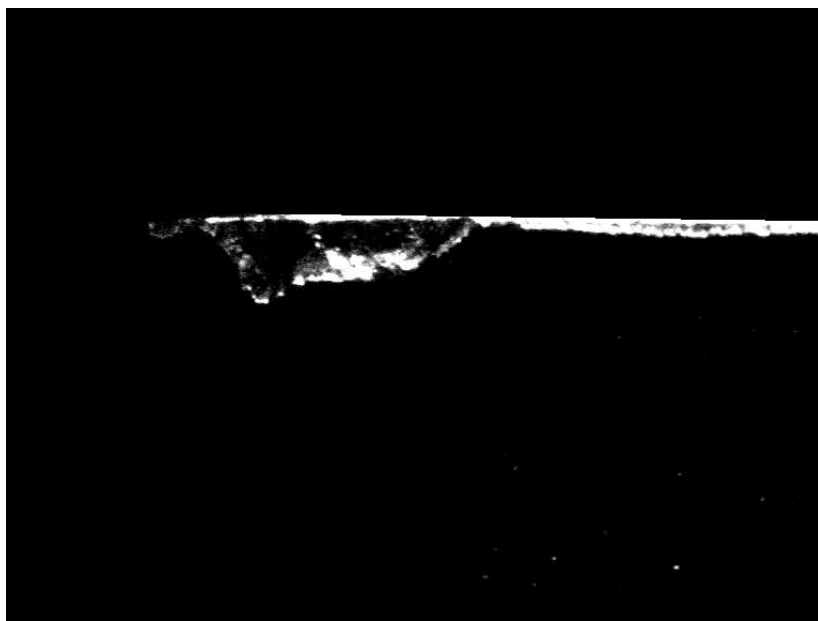


Figura 6.6: Equalização automática do histograma da imagem.

para o limiar máximo, onde este valor é reduzido progressivamente e a porcentagem de *pixels* brancos também é inspecionada. O terceiro passo apenas realiza um ajuste fino de ambos os valores de limiar, para reduzir o número de *blobs* (aglomerados de pontos na imagem) de ruído através da inspeção do número de contornos remanescentes. O resultado deste processo é o realce otimizado da área do desgaste, sendo que alguns pequenos ruídos às vezes permanecem perturbando a imagem, como visto na figura 6.6.

Parte do ruído remanescente na imagem é retirado no passo seguinte, onde a imagem equalizada é binarizada através de um algoritmo de limiarização. O restante do ruído é retirado por um algoritmo de filtragem estatística (chamado de pré-filtro) em três aplicações consecutivas, levando em consideração o tamanho dos ruídos (análise de *blobs*) e a distância destes ruídos em relação à região do desgaste em cada aplicação. Todos os *blobs* maiores que um determinado valor pré-definido (MRA) são considerados confiáveis e fazem parte da área do desgaste. Os demais *blobs* remanescentes serão eliminados caso a distância dos mesmos em relação aos *blobs* confiáveis seja maior do que outro valor pré-definido (MRD). Em cada uma das três aplicações, o algoritmo pré-filtro é configurado com os valores MRA e MRD distintos, para abranger diferentes áreas e distâncias na imagem. O resultado da limpeza é o isolamento completo da região do desgaste do resto da imagem (figura 6.7).

6.1.4 Extração de Características

Agora que a região do desgaste da ferramenta foi isolada do restante da imagem, inicia-se o processo de extração das características, onde deseja-se circunscrever a área do desgaste com um

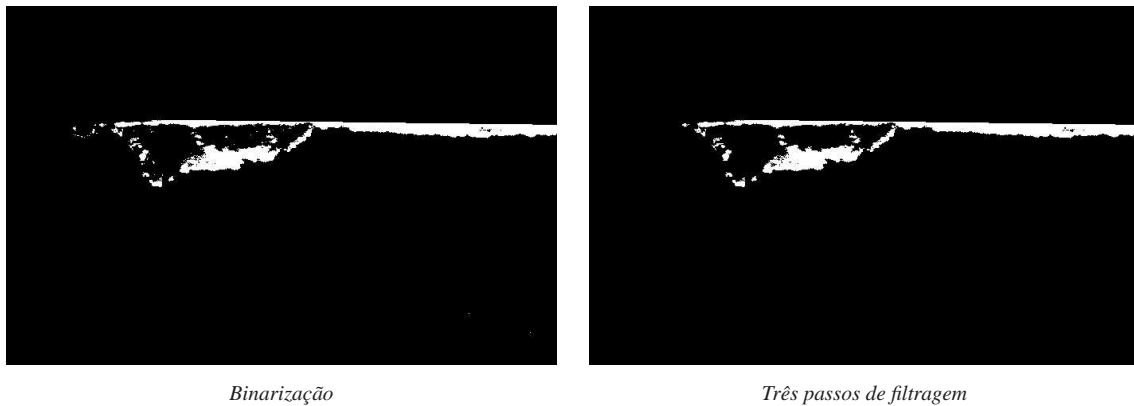


Figura 6.7: Etapa final de limpeza da imagem: binarização e filtragem estatística.



Figura 6.8: Conjunto de pontos iniciais definido pelo algoritmo *jacket*.

contorno representativo para permitir o cálculo das medidas e da área do mesmo, tendo em vista que não é possível medir o desgaste apenas pelas regiões de reflexão da ferramenta.

De início, utiliza-se um algoritmo denominado *jacket* [23, 24] para realizar a procura por um conjunto de pontos que delimitem a área real do desgaste da ferramenta, eliminando ainda algum ruído que possa ter sobrevivido às ações de filtragem da etapa de pré-processamento. Este algoritmo trabalha sobre a negativa da imagem repassada anteriormente, varrendo a imagem de suas bordas em direção ao centro à procura da região do desgaste e desconsiderando pequenos ruídos que não pertençam à área do desgaste segundo critérios de aglomerados de *pixels* (a vizinhança do *pixel* deve ser representativa, ou seja, também fazer parte do desgaste). Ao longo desta procura, ele define alguns pontos que delimitam a região do desgaste do restante da imagem (figura 6.8). Estes pontos são repassados como pontos iniciais de entrada do próximo algoritmo de detecção de contornos ativos, o algoritmo *snakes* [2, 148, 149], que define o melhor posicionamento para um conjunto de pontos representando o contorno do desgaste da ferramenta.

O *snakes* considera os pontos iniciais recebidos como se fossem elos de uma corrente metálica (vários nódulos interconectados, cada nódulo representado por um ponto) a ser disposta ao redor da região que se deseja circunscrever (o desgaste). Considera-se ainda que a região do desgaste possui propriedades magnéticas para atrair os nódulos da corrente metálica para junto de si. Após posicionar todos os nódulos da corrente em suas posições iniciais ao redor da área desejada (trabalho realizado pelo *jacket*), a corrente passa a receber forças interiores provindas da região magnética do desgaste



Figura 6.9: Conjunto de pontos que representam o contorno do desgaste retornado pelo snakes.

e tende a estreitar seus laços em direção a ele. Este movimento de retração obedece a certas leis físicas, como a de ação e reação e algumas propriedades elásticas. Desta forma, o processo pode ser modelado como um sistema instável que busca pelo seu ponto de equilíbrio através do movimento de estreitamento da distância entre os nódulos da corrente e a área do desgaste, até que a energia do sistema seja mínima. Neste momento a região do desgaste encontra-se perfeitamente circunscrita pelo contorno e já permite a realização dos cálculos de medição do sistema (figura 6.9).

Um contratempo foi encontrado na execução do algoritmo *snakes*: um contorno perfeito para as regiões inferiores e laterais do desgaste da ferramenta era retornado com frequência, porém, o contorno da borda superior comportava-se de maneira adversa, ligando-se a um conjunto de pontos distanciados da borda superior do desgaste, mostrando que o sistema não convergiu corretamente para um ponto de mínimo local de energia. Este problema foi contornado ao redefinir o posicionamento dos pontos superiores do contorno para ficarem sobre a reta que representa a borda da ferramenta, finalizando o processo de detecção do contorno do desgaste, como visto na figura 6.10.

6.1.5 Classificação do Desgaste

Com o contorno final do desgaste em mãos é possível realizar a medição dos três parâmetros do desgaste de flanco da ferramenta. Porém, antes de realizar a medição, procura-se descobrir o tipo de desgaste que se encontra na ferramenta, pois somente o desgaste de flanco deve necessariamente ser medido. No caso de uma quebra, a etapa de medição pode ser descartada.

Mas a classificação do desgaste tem ainda o objetivo de informar ao usuário da máquina-ferramenta a respeito de quais tarefas de usinagem a ferramenta ainda está apta a cumprir, como por exemplo, usinagem de alta precisão (operações de acabamento) ou usinagem de baixa precisão (operações de desbaste). Atualmente a classificação foca apenas o desgaste de flanco e o caso de quebra. Mas a intenção é em futuros trabalhos expandir a diversidade de tipos de desgaste para representar com maior precisão o estado de conservação da ferramenta.

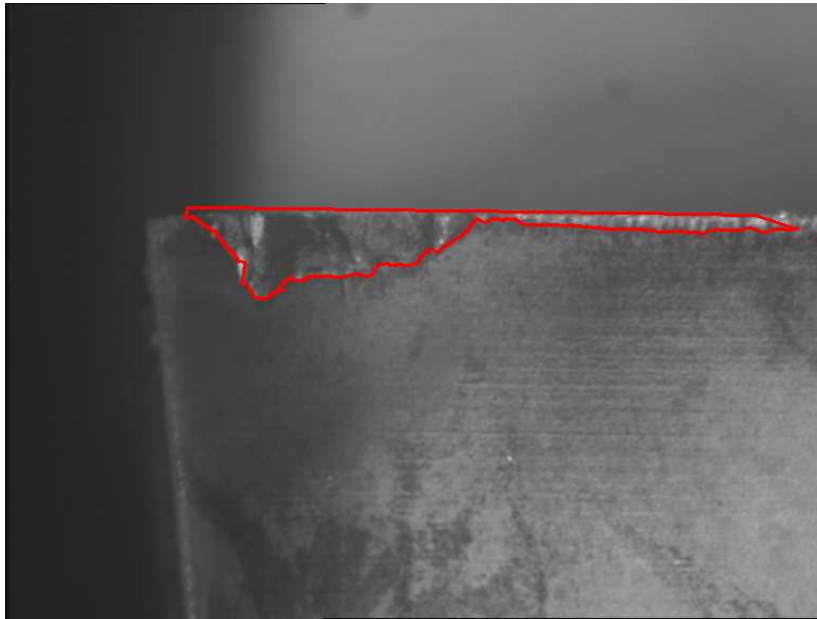


Figura 6.10: *Contorno do desgaste aplicado sobre a imagem com iluminação frontal.*

Para realizar a tarefa de classificação do desgaste, duas abordagens foram testadas: uma através de redes neurais e outra por análise direta das características geométricas da superfície da ferramenta. Ambas as técnicas fazem uso de características superficiais da ferramenta para classificar o desgaste, porém a rede neural deve ser treinada para ajustar os pesos de seus neurônios e generalizar uma solução que atenda aos diferentes tipos de ferramentas utilizadas, enquanto que a análise direta destas características trata o problema de forma mais simples e rápida, porém de forma mais limitada.

Um dos principais motivos que torna a inspeção das características geométricas e superficiais da ferramenta importante é o seu comportamento diferenciado nas condições de desgaste de flanco e quebra. O desgaste de flanco apresenta-se em geral com uma textura mais rica em detalhes (linhas verticais consecutivas de tamanhos quase constantes) e mais nítido por refletir melhor os raios luminosos incidentes. Já a quebra apresenta uma textura mais escura, suave e homogênea, abrangendo geralmente áreas de dimensões aleatórias e maiores do que as do desgaste de flanco. Pode acontecer de ambos os casos ocorrerem na mesma ferramenta, como mostra a figura 6.11.

Classificação por Redes Neurais

A escolha de uma rede neural para analisar o tipo de desgaste está na sua habilidade de generalização e solução de problemas não-lineares, em especial problemas de classificação [121, 150]. Das características levantadas a respeito do comportamento de textura do desgaste de flanco e da quebra, é possível extrair uma série de informações importantes para serem utilizadas como entrada em uma rede neural [23], como por exemplo, a representação frequencial do contorno do desgaste (descritores

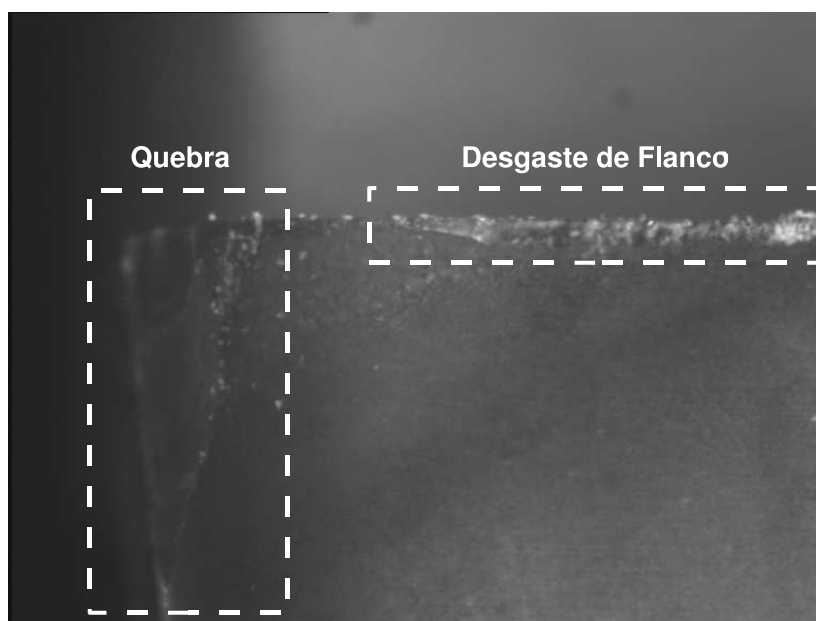


Figura 6.11: *Diferentes características superficiais de um desgaste de flanco e uma quebra.*

de fourier) [1, 2], o histograma da imagem, uma análise da variação da textura nas direções X e Y do desgaste, valores estatísticos da imagem (mínimo, máximo, médio, variância), análise da textura por alta frequência (filtro *canny*), o posicionamento e a área do contorno do desgaste.

Nem todas estas informações de entrada geram resultados muito satisfatórios na saída da rede neural, e o ideal é procurar pela melhor combinação de informações que possam gerar um mapeamento genérico e ao mesmo tempo robusto para a rede. Uma das melhores arquiteturas alcançadas para a rede utiliza a topologia *feedforward* com neurônios do tipo sigmoidal dispostos em três camadas (figura 6.12): uma de entrada (com 36 entradas provindas da análise de textura por *canny* e informações do histograma da imagem em conjunto), outra escondida ou intermediária (com 10 neurônios) e por fim a de saída (com apenas 2 neurônios, um para cada tipo de desgaste). A rede é treinada através de um algoritmo de *backpropagation* e apresenta resultados satisfatórios, com cerca de 90% de acerto na tarefa de classificação. Porém, há certos casos de quebras em regiões laterais das ferramentas que a rede não consegue detectar perfeitamente, retornando resultados incertos [23].

Devido a esta pequena instabilidade da rede neural e pela dificuldade de realizar o treinamento da mesma toda vez que algum parâmetro do sistema óptico ou de iluminação mudasse, buscou-se por uma nova solução através da análise direta das características geométricas da ferramenta.

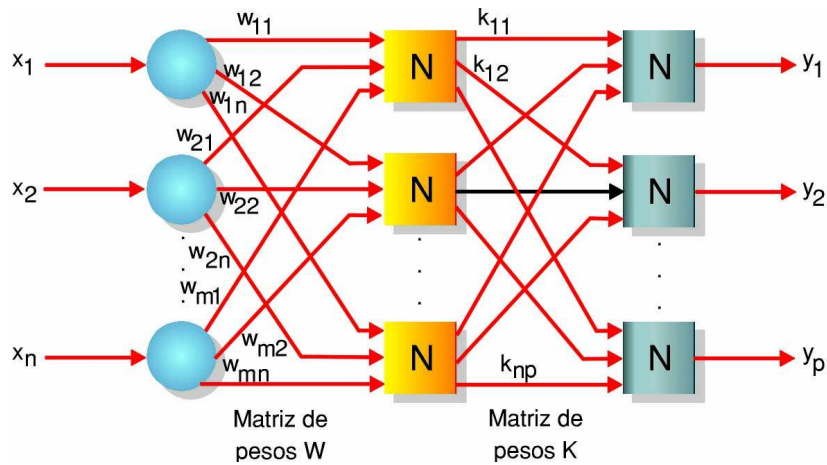


Figura 6.12: Arquitetura de rede feedforward com três camadas.

Classificação por Análise Direta das Características Geométricas da Ferramenta

Esta abordagem trata o problema da classificação de forma mais simplificada, buscando realizar inspeções nas áreas da borda lateral e superior da ferramenta.

A primeira inspeção, realizada na borda lateral da ferramenta, realiza uma operação semelhante à tarefa de detecção de bordas da ferramenta. A imagem com iluminação frontal é utilizada para realizar a detecção da borda lateral da ferramenta, através da aplicação do filtro de alta frequência *canny*. Da mesma forma é utilizado um algoritmo de interpolação de linhas para tentar encontrar a melhor reta que represente a borda da ferramenta. Em seguida, procura-se medir a variância dos pontos em relação à reta, para inferir a respeito da validade da borda encontrada. Em casos de quebra lateral, a própria detecção da borda não é bem feita, gerando resultados ruins para a detecção do canto da ferramenta, o que é evidenciado pela variância dos pontos realçados pelo filtro *canny* em relação à reta. No caso de não existir quebra lateral, a borda é facilmente identificada e a variância dos pontos é mínima, como ilustra a figura 6.13.

Já a segunda inspeção foca a região do desgaste da ferramenta perto da borda superior, e leva em conta que o desgaste de flanco costuma apresentar um comprimento constante ao longo de toda a borda da ferramenta, enquanto que a quebra varia bastante seu comprimento. Desta forma, a partir do contorno do desgaste calcula-se uma linha que represente o valor médio do desgaste (o próprio *VB*) e em seguida mede-se a variância dos pontos restantes do contorno em relação a esta linha média para inferir sobre a presença de uma quebra na borda superior da ferramenta. Ou seja, no caso de uma quebra, esta variância será alta, devido ao comportamento inconsistente do comprimento da quebra em relação à borda superior da ferramenta. Já no caso do desgaste de flanco, a variância será baixa, pois seu comprimento é praticamente constante. Esta situação é ilustrada na figura 6.14.

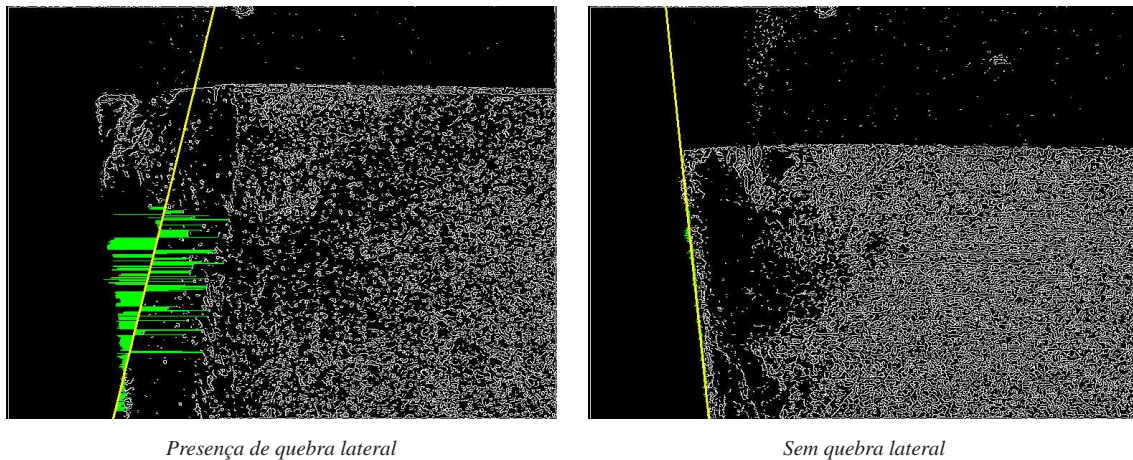


Figura 6.13: Identificação de quebra lateral por inspeção do canto da ferramenta.

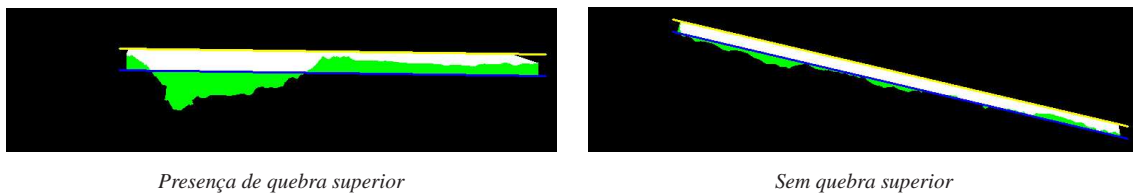


Figura 6.14: Identificação de quebra superior por inspeção do contorno do desgaste da ferramenta.

Este método de análise direta proporcionou resultados mais robustos para a classificação do desgaste das ferramentas do que a abordagem realizada com redes neurais, que foi desativada temporariamente. Porém a abordagem com redes neurais deverá ser necessária para expandir a classificação do sistema para mais de dois tipos de desgaste em futuros trabalhos.

6.1.6 Medição do Desgaste

A etapa de medição do desgaste da ferramenta tem por objetivo retornar os três valores definidos pela norma ISO3685 [151]: o desgaste de flanco VB , o desgaste de flanco máximo VB_{max} e a área do desgaste A_{VB} . A partir do contorno final pode-se realizar todos os cálculos necessários para retornar estes três parâmetros. Segundo a ISO3685, a medição dos valores de VB e VB_{max} devem ser feitos perpendicularmente à borda superior da ferramenta. Desta forma, a área interna ao contorno do desgaste é preenchida por *pixels* brancos para que se possa iniciar a busca pelos três parâmetros.

Inicia-se varrendo a borda superior da ferramenta e procurando todas as linhas perpendiculares à reta que representa o topo da ferramenta (figura 6.15). Em seguida, estas pequenas linhas perpendiculares são percorridas para encontrar qual apresenta a maior distância em relação ao topo da ferramenta (em número de *pixels*). Desta forma encontra-se o valor de VB_{max} . Já um valor médio de VB (ou VB_{mdio}) é contabilizado tirando-se a média entre as dimensões de todas as retas perpendicu-

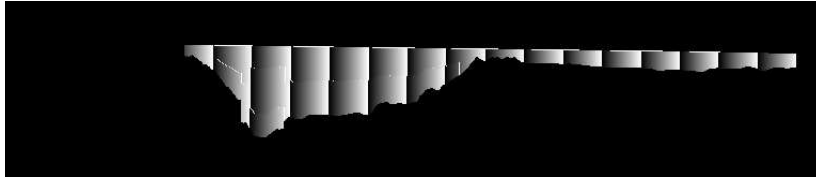


Figura 6.15: Linhas perpendiculares ao topo da ferramenta projetadas sobre área do desgaste.

lares ao topo da ferramenta. O valor de A_{VB} é o mais simples de ser calculado, pois basta contar o número de *pixels* dentro do contorno do desgaste para se ter a área do mesmo.

Nota-se que todos os valores de medição foram realizados em termos de contagem de *pixels*. Para retornar os valores de medição em termos de uma unidade métrica padrão ao usuário, é necessário que antes o sistema tenha sido calibrado, pois é este processo que informa precisamente quanto vale cada *pixel* da imagem em relação às dimensões dos objetos reais inspecionados.

6.1.7 Calibração Automática do Sistema

A calibração do sistema é uma etapa a parte da cadeia de processamento de imagens. Ela pode e deve ser disparada anteriormente à primeira utilização do sistema, para que se possa retornar valores de medição coerentes com as unidades do mundo real. Um algoritmo de calibração automática do sistema foi implementado para permitir que a partir de um simples clique na interface gráfica, um usuário avançado (administrador) tivesse condições de efetuar toda a calibração do sistema.

Este processo baseia-se no uso de imagens de gabaritos em forma de tabuleiro de xadrez com dimensões bem conhecidas. Para isto, um tabuleiro de xadrez miniatura foi impresso com alta qualidade (1200 dpi) em um papel especial translúcido para ser ajustado à uma ferramenta especial, de forma que o sistema pudesse manipular esta ferramenta da mesma forma como é feita com as demais ferramentas de corte e viabilizar a calibração automática do sistema.

O algoritmo funciona de acordo com os seguintes passos:

1. Primeiramente a ferramenta especial portando um tabuleiro de xadrez miniatura deve ser inserida na estação de medição do ToolSpy (ferramenta ilustrada na figura 5.17).
2. Em seguida, o sistema move automaticamente seus eixos de manipulação em sincronia com o sistema de aquisição para adquirir uma sequência de imagens em diferentes posições focais da ferramenta de calibração e com uma configuração de iluminação específica e otimizada para esta tarefa, gerando um vetor de imagens (figura 6.16).

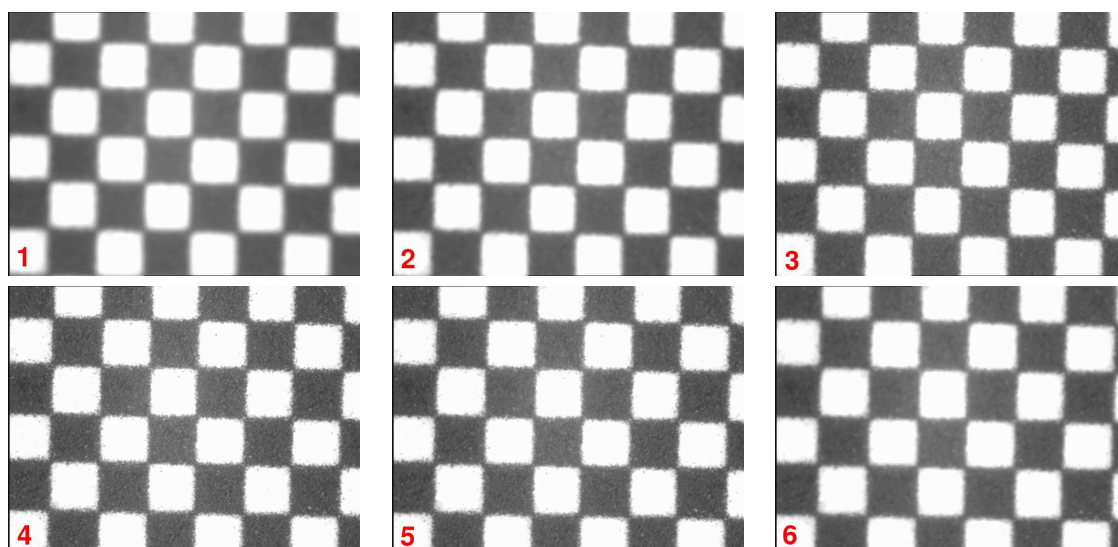


Figura 6.16: Vetor de imagens da ferramenta de calibração em diferentes posições focais.

3. Deste vetor de imagens deve ser retirada aquela que corresponde à melhor posição de foco possível, para viabilizar o processamento e reconhecimento das dimensões do tabuleiro de xadrez com precisão. Para isto inspeciona-se a variância encontrada no histograma de cada imagem do vetor em busca da imagem de maior variância possível.

Este princípio de análise da variância da imagem se apoia justamente na forma do tabuleiro de xadrez, que é composto por uma série de quadrados brancos e pretos de mesmas dimensões, todas conhecidas previamente. Devido a esta característica, a imagem de um tabuleiro de xadrez deveria retornar um histograma bem característico: um grande pico na região baixa do histograma (representando todos os *pixels* de valor nulo dos quadrados pretos) e outro grande pico na região alta (*pixels* de valor máximo dos quadrados brancos). Com isto, a variância dos pontos da imagem em relação ao seu valor médio (valor intermediário de um tom de cinza) é máxima, pois todos os pontos estão bem distantes deste valor (ou são pretos ou são brancos).

Acontece que apenas uma imagem bem focada do tabuleiro de xadrez irá retornar uma variância mais alta de seus pontos, pois as imagens desfocadas produzem uma suavização dos pontos das bordas entre os quadrados pretos e brancos, gerando uma grande quantidade de pontos com diferentes tonalidades de cinza, abaixando criticamente a variância da imagem (figura 6.16).

A figura 6.17 ilustra a escolha da melhor imagem do vetor de imagens de calibração.

4. Tendo a imagem de melhor foco em mãos, inicia-se um processo para identificação das dimensões dos quadrados em número de *pixels*. O primeiro passo é realizar a binarização da imagem através de um algoritmo automático de limiarização (*autothreshold*).

Este algoritmo de limiarização automática vai aumentando levemente o valor de limiar na ima-

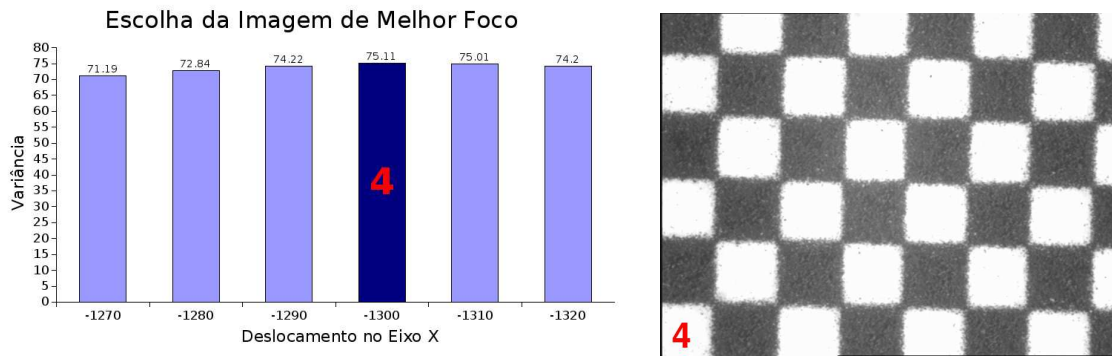


Figura 6.17: Escolha da imagem de melhor foco através da inspeção da variância de seus pixels.

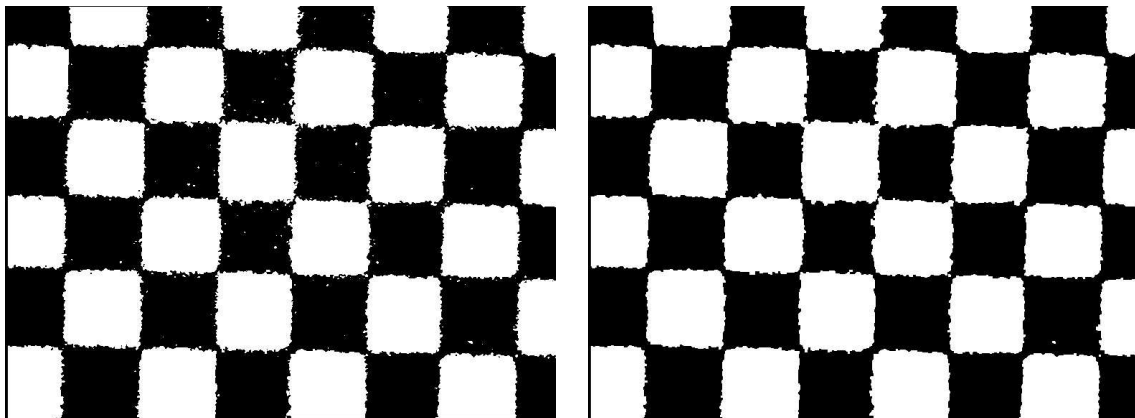


Figura 6.18: Binarização automática da imagem de calibração e posterior limpeza de ruídos.

gem, até o ponto em que o número de *pixels* brancos e pretos tenham aproximadamente a mesma proporção, o que representa bem as características de um tabuleiro de xadrez. Como a aquisição das imagens nunca é perfeita nem mesmo a impressão do tabuleiro de xadrez resulta em um tabuleiro ideal, após a binarização da imagem do tabuleiro surgem alguns pequenos ruídos. Estes ruídos podem ser em grande parte eliminados pela aplicação de um algoritmo de morfologia matemática denominado fechamento (ver apêndice A), que busca eliminar pequenos pontos de ruído na imagem através de um pequeno aumento das proporções de seus objetos (figura 6.18).

5. Ao se obter a imagem de calibração binarizada e com boa qualidade, busca-se identificar todas as linhas que definem as bordas dos quadrados do tabuleiro, pois deseja-se realizar a medição da distância média entre todas estas linhas para se chegar a um resultado robusto para a calibração.

Para encontrar as linhas do tabuleiro é utilizado um filtro para realce das discontinuidades da imagem, ou características de alta frequência. O filtro que apresentou melhor resultado foi novamente o filtro *canny* (figura 6.19).

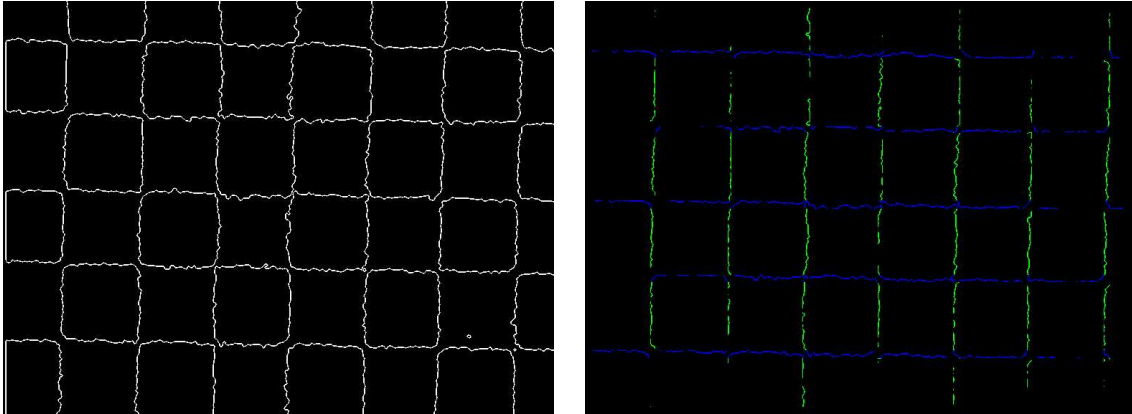


Figura 6.19: Processo de identificação das linhas verticais e horizontais da imagem de calibração.

Esta imagem contendo as informações realçadas das linhas do tabuleiro é varrida, para diferenciar os pontos que pertencem ao eixo vertical e os que pertencem ao eixo horizontal (utilizadas para o cálculo da calibração vertical e horizontal do sistema, respectivamente). Neste processo em que as linhas verticais e horizontais são procuradas, alguns pontos que se encontrem demasiadamente distantes destas linhas são também dispensados, para que não influam de forma negativa para a identificação dos parâmetros das melhores retas sobre as linhas (figura 6.19).

6. Após a identificação dos grupos de pontos que representam as linhas verticais e horizontais na imagem, inicia-se o processo de interpolação de retas sobre estes pontos, usando um algoritmo de mínimos quadrados, da mesma forma como já mencionado para a detecção das bordas da ferramenta na etapa de detecção de bordas da cadeia de processamento de imagens.

A partir destas linhas interpoladas, encontram-se todos os pontos de intersecção entre as mesmas, pois é através destes pontos que será calculada a distância média vertical e horizontal do sistema, conforme as equações 6.1 e 6.2 e como pode ser visto a partir da figura 6.20.

$$C_y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Dist(y)_j \quad (6.1)$$

$$C_x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Dist(x)_i \quad (6.2)$$

A atual composição do sistema óptico e do sistema de aquisição apresenta um resultado de calibração de $4,78\mu m/pixel$ para o eixo vertical (C_y) e $4,74\mu m/pixel$ para o eixo horizontal (C_x). Este resultado habilita o sistema a realizar a conversão dos valores de medição do desgaste para uma unidade métrica padrão desejada.

Os resultados do algoritmo de calibração automática foram comparados com os resultados

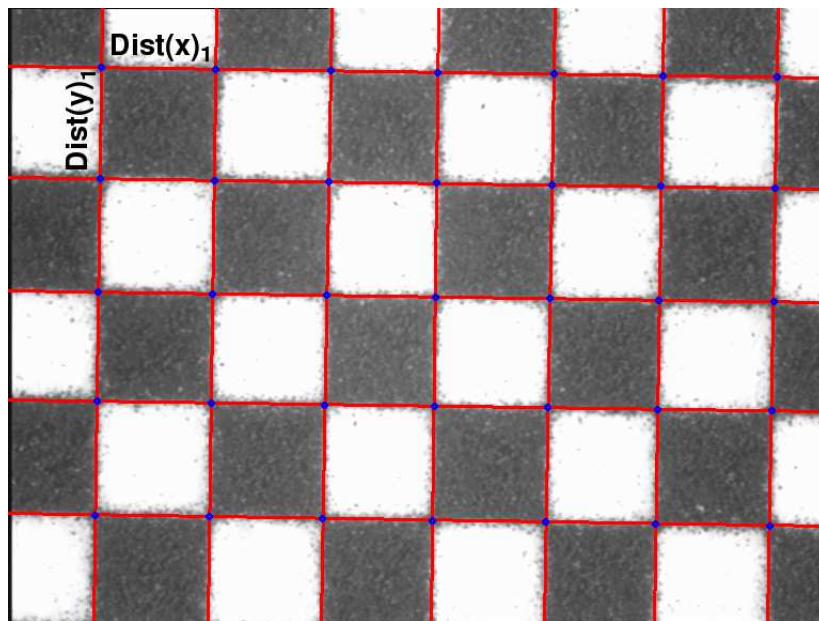


Figura 6.20: Calibração do sistema pela medição da distância média entre as linhas do gabarito.

anteriores de calibração manual realizados a partir de funções de um outro aplicativo proprietário (o *software* WIT da empresa Dalsa Coreco¹), tendo seus valores muito aproximados, confirmando a eficiência do algoritmo de calibração automática. Um ponto a ser levantado é que este algoritmo ainda não leva em conta, para a realização dos cálculos de calibração, a taxa de distorção óptica das lentes do sistema, que deve ser analisada em trabalhos futuros.

Este capítulo apresentou em detalhes todas as etapas de processamento de imagens realizadas no sistema, desde a aquisição das imagens, até a medição e classificação do desgaste. Um método para realizar a calibração automática do sistema também foi comentado, sendo necessário para cumprir com os requisitos de simples interfaceamento do sistema com o usuário. Alguns resultados alcançados pelo sistema já foram apresentados nestes dois últimos capítulos. O capítulo seguinte trata exclusivamente destes resultados em maiores detalhes.

¹<http://www.coreco.com/>

Capítulo 7

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados atingidos ao fim desta dissertação. Alguns resultados já foram introduzidos ao longo de capítulos anteriores deste documento e serão apenas revistos aqui. Ao longo dos dois anos e meio em que este trabalho foi desenvolvido, vários colegas tiveram a oportunidade de participar das atividades do projeto no Brasil e na Alemanha, tendo alguns destes sido co-orientados pelo presente autor. Os resultados alcançados em conjunto neste tempo serão também apresentados citando os devidos autores. Praticamente todos os objetivos listados na seção 1.6 foram atingidos com sucesso e serão tratados na mesma ordem em que foram lá enunciados.

O **primeiro objetivo** a ser alcançado era o de melhorar a documentação e ampliar a revisão bibliográfica do projeto, buscando novas soluções para a inspeção do desgaste das ferramentas. Os quatro primeiros capítulos e os apêndices deste trabalho foram dedicados totalmente ao cumprimento deste primeiro objetivo, na tentativa de documentar de forma ampla e didática um bom conteúdo sobre processos de fabricação metal-mecânica, ferramentas de corte e seu desgaste, técnicas de monitoramento de processos de fabricação, sistemas de visão e processamento de imagens. Além de levantar diversas publicações sobre estes assuntos, foi possível ainda contribuir com a publicação de dois artigos em eventos internacionais, em cooperação com os colegas do laboratório WZL, divulgando os resultados das atividades desenvolvidas no âmbito do projeto (referências [12] e [13]).

O **segundo objetivo** diz respeito à reformulação do projeto de *hardware* do sistema, em especial os sistemas óptico, de iluminação e aquisição, para garantir aquisição de imagens com qualidade e resolução suficiente e propiciar uma medição robusta do desgaste das ferramentas. Neste sentido foram feitos cálculos pelo presente autor para otimizar os sistemas óptico e de aquisição do TOOLSPY, conforme apresentado nas seções A.1.1 e A.1.3. A compra de novo *hardware* que satisfaça estas especificações ainda espera por financiamento, e por isso o sistema trabalha com um *hardware* improvisado, mas que proporciona resultados satisfatórios, também de acordo com as metas traçadas.

O sistema de iluminação que era um dos principais problemas da solução foi completamente reprojeto e reconstruído na Alemanha por Postel [45] e posteriormente tendo seu controle complementado por de Moraes [24]. Esta mudança deu grande flexibilidade para a aplicação e foi peça chave para atender diversos objetivos traçados para este trabalho, como comentado na seção A.1.2.

O **terceiro objetivo** requeria a continuidade do desenvolvimento de uma estrutura modular orientada a objetos e independente de plataforma operacional, para que o sistema mantivesse suas características de flexibilidade, reusabilidade e transportabilidade. Este objetivo foi atingido parcialmente. Conforme colocado na etapa de modelagem do *software* do sistema na seção 5.3.1, toda a estrutura de *software* da interface e comunicação com *hardware* foi mantida modular e implementada através das linguagens C e C++, garantindo a flexibilidade e reusabilidade destas ferramentas para uso em soluções futuras. Já para a cadeia de processamento de imagens, foi realizada pelo presente autor, por de Moraes [24] e por Adur [23] uma comparação entre o desempenho da versão antiga da cadeia (com a estrutura IPFramework de Deschamps [3]) com uma nova, organizada segundo uma programação estruturada. O resultado foi a comprovação de um rendimento superior da nova versão (em relação ao tempo de execução), pois a biblioteca IPFramework adicionava um certo *overhead* de processamento ao sistema, e por isso foi temporariamente abandonada.

Para permitir a transportabilidade do sistema para demais plataformas operacionais, uma série de bibliotecas foi desenvolvida pela equipe do laboratório S2i no Brasil, contando com a co-orientação e também desenvolvimento do presente autor, utilizando programação segundo as normas *standard* da linguagem C++ e foram incorporadas à biblioteca S2ILIB:

- Implementação de módulos de E/S controlados pelas interfaces paralela e serial do computador, dispensando a utilização de placas de E/S que em geral possuem uma API proprietária direcionada para apenas um sistema operacional.
- Implementação de um módulo de aquisição de imagens através de distintas interfaces (diferentes placas de aquisição e interface *firewire* para câmeras digitais) para o sistema GNU/Linux, utilizando principalmente os recursos da biblioteca V4L (*Video for Linux*).
- Implementação de um módulo de geração de relatórios e *logs* para análise estatística das ações do sistema, especialmente para a geração de relatórios de inspeção no sistema TOOLSPY.
- Atualização das bibliotecas S2iImage e S2iNeural, para representação/manipulação de imagens e redes neurais, respectivamente, extensivamente usadas nos projetos do WZL.

A cadeia de processamento de imagens do sistema usou muitos recursos da biblioteca OPENCV, para permitir a transportabilidade desta solução para outras plataformas operacionais. Apesar do es-

forço para manter o código sempre compatível com diversas plataformas, foi dada maior ênfase na implementação de uma interface gráfica para as plataformas Windows XP e 2000, conforme requisitos do projeto. Apenas pequenas interfaces de teste e depuração de trechos do código da cadeia de processamento de imagens foram programadas utilizando os recursos visuais da biblioteca OPENCV (biblioteca *highgui*) e são portanto transportáveis a demais plataformas. Uma interface gráfica para a plataforma GNU/Linux ainda não foi implementada, devido aos motivos acima citados.

O **quarto objetivo** a ser alcançado requiritava um aperfeiçoamento da cadeia de processamento de imagens para permitir ampliar os recursos da solução de medição e classificação do desgaste para diferentes tipos de ferramentas de corte, pois a solução ainda estava muito direcionada a um tipo de ferramenta. Este objetivo foi sem dúvida o mais difícil de ser alcançado, pois requer uma estruturação especial desde a parte de *hardware* do sistema até uma generalização extrema na solução de *software* da cadeia de processamento de imagens.

Por parte do *hardware*, a grande dificuldade estava em definir um módulo de iluminação flexível suficiente para atender às diferentes geometrias e características das ferramentas de corte, o que foi feito ao longo do início deste trabalho, como já mencionado. Porém, por falta de recursos financeiros, os novos conjuntos ópticos e de aquisição não puderam ser trocados, e exigiram um pouco mais de esforço por parte do *software* para realizar a generalização da solução.

Uma das grandes contribuições do presente autor para o projeto foi a pesquisa de diversos algoritmos de pré-processamento e segmentação passíveis de serem aplicados no realce e isolamento da região do desgaste das ferramentas. Foram testados diversos algoritmos de segmentação baseados em descontinuidades (detecção de pontos, linhas e bordas) ou em similaridades (detecção de limiares, segmentação por regiões, divisores de água, piramidal). Ao final dos testes, ainda no período do trabalho de de Moraes [24], chegou-se a uma solução muito próxima do que foi apresentado nas etapas de pré-processamento e extração de características do capítulo 6, utilizando-se os algoritmos de equalização de histogramas, binarização por limiar e limpeza dos ruídos através de morfologia matemática e um algoritmo de análise estatística de *blobs* desenvolvido por de Moraes [24]. Esta estratégia fez-se funcional para dois tipos de ferramentas de corte, mas notava-se claramente que apresentava desempenho melhor para um dos tipos de ferramenta.

Posteriormente, ao longo do trabalho de Adur [23], o autor teve a oportunidade de participar das atividades do projeto na Alemanha, e verificou-se a necessidade de alterar novamente as etapas de pré-processamento e segmentação do sistema, devido a algumas mudanças feitas na configuração do conjunto óptico do sistema e também para incluir mais uma variante de ferramenta de corte na aplicação, adaptando de forma homogênea a solução para todas as ferramentas. Por isso deu-se o desenvolvimento de um algoritmo de equalização automática do histograma das imagens das ferra-

mentas, com o intuito de realizar um realce otimizado das características do desgaste conforme as características geométricas da ferramenta e o tamanho e tipo propriamente dito do desgaste. Apesar deste algoritmo melhorar significativamente o processo de segmentação para os três tipos de ferramenta, os passos seguintes de limpeza dos ruídos remanescentes ainda tiveram de ser replanejados para se adaptarem às novas condições, e as aplicações de morfologia e análise de *blobs* foram substituídas pelo algoritmo pré-filtro desenvolvido por Adur [23], baseado nesta solução anterior. A parte de extração das características do contorno do desgaste também contou com uma reformulação do algoritmo *jacket* por Adur [23].

Destaca-se ainda a necessidade da interação com um banco de dados de informações de ferramentas e da manipulação correta das ferramentas quanto a sua geometria através do sistema de manipulação, cujas interfaces de comunicação foram implementadas por de Moraes [24]. Com todas estas modificações realizadas no *hardware* e na cadeia de processamento de imagens do sistema foi possível generalizar a solução para três diferentes tipos de ferramentas de corte.

Para permitir a classificação do desgaste nestes três tipos de ferramentas de corte, o presente autor auxiliou na orientação do trabalho de Adur [23] no que diz respeito à primeira abordagem da solução, que fez uso de redes neurais para a classificação do desgaste das ferramentas, tendo em vista que já havia abordado semelhante solução em um trabalho anterior [1]. Esta abordagem apresentou bons resultados de classificação, como pode ser visto em [13], mas foi posteriormente atualizada com uma nova abordagem implementada por Adur [23], utilizando apenas uma análise direta das características geométricas da ferramenta, que apresentou maior robustez para a classificação dos dois tipos de desgaste (flanco e quebra) focados atualmente pelo projeto.

O **quinto objetivo** traçado tratava do aprimoramento da interface gráfica do sistema para a plataforma Windows e a elaboração de uma interface semelhante para a plataforma GNU/Linux. Neste sentido, o trabalho de de Moraes [24] já contribuiu bastante para a reestruturação da antiga interface do sistema, tornando mais intuitiva e fácil a operação da interface principal do sistema e criando as novas janelas de configuração avançada. Em seguida o presente autor e Adur [23] só acrescentaram recursos à interface para a utilização das novas funcionalidades incluídas no sistema e desabilitaram recursos que passaram a ser desnecessários. Devido à necessidade de se concentrar na solução para a plataforma Windows, não foi implementada uma interface para a plataforma GNU/Linux, tendo apenas pequenos aplicativos de teste sido implementados pelo autor para a validação das soluções de pré-processamento e segmentação da cadeia de processamento de imagens e da solução de calibração automática do sistema.

Já o **sexto objetivo** definido diz respeito à continuidade do desenvolvimento de um protótipo do sistema TOOSPY do lado brasileiro do projeto de cooperação. Foi iniciada a construção de um

protótipo brasileiro já a partir do trabalho de Deschamps [3]. Um antigo módulo de iluminação em cúpula (mencionado na seção 1.5) utilizado na Alemanha foi adaptado no Brasil para ser acionado através da porta paralela do sistema de processamento. Porém, devido à dificuldade de reunir recursos financeiros para a compra de todos os equipamentos do sistema e com as constantes alterações realizadas no *hardware* e *software* do protótipo alemão, a construção do protótipo brasileiro foi temporariamente adiada, à espera de uma versão mais robusta e estável do protótipo alemão, para que uma réplica do mesmo possa ser feita posteriormente no Brasil. Durante este período a equipe de desenvolvimento do lado brasileiro concentrou-se na implementação de *drivers* e na atualização do *software* da biblioteca S2ILIB para propiciar a transportabilidade da solução do sistema para outras plataformas operacionais, conforme já mencionado.

A possibilidade/necessidade de se construir uma réplica do sistema no Brasil é devida à oportunidade de se introduzir o sistema para testes em laboratórios e indústrias em território brasileiro. Alguns contatos com o laboratório LMP da UFSC e com as empresas do ramo industrial WEG e LESI já foram realizados, no intuito de adaptar o sistema para as suas necessidades e realizar testes no chão-de-fábrica de suas instituições, como já mencionado na seção 1.3.

O **sétimo objetivo** a ser alcançado trata da validação dos resultados de medição e classificação do sistema através da aplicação de outros métodos tradicionais empregados atualmente para a inspeção do desgaste em ferramentas de corte, como por exemplo, o de microscopia óptica. Ao longo do trabalho de Adur [23], no período de implementação da solução de classificação das ferramentas de corte, 100 ferramentas de corte foram analisadas, sendo 80 ferramentas da SANDVIK (tipo 4030) e 20 da SECO (tipo T250M). Das 80 ferramentas da SANDVIK, 39 apresentavam um revestimento dourado e as demais 41 não apresentavam revestimento (cor preta). Destes três tipos de ferramenta no total, apresentavam-se 58 casos de quebra e 42 casos de desgaste de flanco. Todas as 100 ferramentas passaram pela mão de um especialista para receberem o tipo classificação correta do desgaste, permitindo que os resultados de classificação alcançados pelo sistema TOOLSPY fossem validados. Já para os resultados de medição das 42 ferramentas que apresentavam desgaste de flanco, Adur [23] realizou uma medição manual dos valores de desgaste máximo de flanco VB_{max} através de um microscópio. Todos estes resultados de classificação e medição encontram-se formatados na seção 7.1.

Algumas **atividades extras** foram desenvolvidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, que não haviam sido inicialmente traçadas como objetivos a serem alcançados. A primeira atividade extra que contou com a colaboração do autor foi a criação de um sítio Wiki¹ na internet junto à página do laboratório S2i para melhorar e aumentar a comunicação e troca de informações e conteúdo sobre temas do projeto entre ambos os lados brasileiro e alemão da cooperação. O sítio contém informações

¹<http://s2i.das.ufsc.br/wiki/>

sobre as soluções de *hardware* e *software* adotadas no projeto, orçamentos de equipamentos levantados para a aplicação, documentos técnicos sobre alguns temas da área de visão e *logs* das reuniões periódicas que eram realizadas por vídeo-conferência entre Brasil e Alemanha. A segunda atividade extra foi realizada no período em que o autor se encontrava na Alemanha e verificou-se a necessidade de criar uma solução própria para realizar a calibração automática do sistema TOOLSPY, como já havia sido recomendado pelo próprio autor em [1], pois a calibração manual que era realizada não era uma solução aceitável para ser aplicada no meio industrial por um operador comum do sistema. Desta forma, a nova solução de calibração automática foi realizada pelo presente autor (como detalhado na seção 6.1.7) contando com o auxílio de alguns algoritmos já desenvolvidos por Adur [23] até aquele momento, para que um simples usuário do sistema pudesse realizá-la, apesar da funcionalidade ter sido reservada apenas aos usuários avançados por questões de segurança.

Por fim, o **último objetivo** traçado para este trabalho foi a incorporação destes resultados ao protótipo do sistema TOOLSPY na Alemanha e a participação do presente autor no evento de divulgação dos diversos projetos do instituto WZL, em especial para a apresentação do projeto TOOLSPY para a comunidade científica e industrial, nas dependências do instituto em Aachen. O período de 3 meses de estadia do autor em Aachen, na Alemanha, foi financiado pelas verbas do projeto do lado brasileiro da cooperação.

A seguir seguem resultados técnicos da cadeia de processamento de imagens e da validação dos resultados de medição e classificação do sistema.

7.1 Validação dos Resultados de Medição e Classificação

Os resultados da classificação do desgaste das 100 ferramentas de corte foram validados através da análise das ferramentas por um especialista no assunto. Já a validação dos 42 resultados de medição de desgaste de flanco foi feita através de microscopia óptica. Todos os resultados de validação aqui apresentados foram retirados de Adur [23].

A classificação dos casos de desgaste entre desgaste de flanco ou quebra foram realizadas levando em conta as diferentes características superficiais que cada caso apresenta nas imagens adquiridas das ferramentas, conforme já mencionado na seção 6.1.5.

A tabela 7.1 apresenta os resultados de classificação para as 20 ferramentas da SECO, sendo que todas as quebras foram detectadas com sucesso e 79% dos casos de desgaste de flanco foram detectados corretamente.

Tabela 7.1: Classificação de Ferramentas SECO.

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
2	Quebra	Quebra	OK
2p	Flanco	Flanco	OK
3p	Flanco	Flanco	OK
4	Flanco	Flanco	OK
4p	Quebra	Quebra	OK
5	Quebra	Quebra	OK
5p	Quebra	Quebra	OK
7	Quebra	Quebra	OK
8p	Flanco	Flanco	OK
9p	Flanco	Flanco	OK
10	Flanco	Flanco	OK
10p	Flanco	Flanco	OK
21	Quebra	Quebra	OK
21p	Flanco	Flanco	OK
22	Quebra	Flanco	Falso
24p	Flanco	Flanco	OK
26	Flanco	Flanco	OK
26p	Quebra	Flanco	Falso
28	Flanco	Flanco	OK
28p	Quebra	Flanco	Falso

A tabela 7.2 apresenta os resultados de classificação para as 39 ferramentas da SANDVIK com revestimento dourado, sendo que todas as quebras foram detectadas com sucesso e 95% dos casos de desgaste de flanco foram detectados corretamente.

Tabela 7.2: Classificação de Ferramentas SANDVIK com revestimento.

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
1bp	Flanco	Flanco	OK
1c	Quebra	Flanco	Falso
2a	Flanco	Flanco	OK
2cp	Flanco	Flanco	OK
4a	Flanco	Flanco	OK
4b	Quebra	Quebra	OK
4bp	Flanco	Flanco	OK
5a	Flanco	Flanco	OK
5bp	Flanco	Flanco	OK
5c	Flanco	Flanco	OK
6a	Flanco	Flanco	OK
6ap	Flanco	Flanco	OK
6c	Flanco	Flanco	OK
7cp	Quebra	Quebra	OK
8ap	Flanco	Flanco	OK
8bp	Flanco	Flanco	OK
8c	Quebra	Quebra	OK
10a	Quebra	Quebra	OK
10ap	Quebra	Quebra	OK
11a	Quebra	Quebra	OK
11bp	Quebra	Quebra	OK
11c	Quebra	Quebra	OK
12b	Quebra	Quebra	OK
12bp	Quebra	Quebra	OK
13ap	Quebra	Quebra	OK
14bp	Quebra	Quebra	OK
14c	Quebra	Quebra	OK
15ap	Quebra	Quebra	OK
15b	Quebra	Quebra	OK

Continua ...

Tabela 7.2 – Continuação

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
15bp	Quebra	Quebra	OK
16a	Quebra	Quebra	OK
16c	Quebra	Quebra	OK
17b	Quebra	Quebra	OK
18bp	Flanco	Flanco	OK
19b	Flanco	Flanco	OK
20a	Flanco	Flanco	OK
23c	Flanco	Flanco	OK
24a	Flanco	Flanco	OK
24c	Quebra	Quebra	OK

A tabela 7.3 apresenta os resultados de classificação para as 41 ferramentas da SANDVIK sem revestimento (cor preta), sendo que todas as quebras foram detectadas com sucesso mas apenas 67% dos casos de desgaste de flanco foram detectados corretamente. A razão para este baixo índice de detecção do desgaste de flanco neste tipo de ferramenta foi pelo fato de terem sido usados os mesmos parâmetros para o filtro *canny* (conforme seção 6.1.5) na tentativa de detectar as quebras laterais em ambas as ferramentas com revestimento dourado e sem revestimento (pretas). Isto provou que a simples mudança de cor da superfície da ferramenta influencia diretamente em boa parte dos parâmetros da cadeia de processamento de imagens. Após terem sido corrigidos os parâmetros do filtro *canny* para serem utilizados com as ferramentas sem revestimento, os resultados melhoraram significativamente, sendo que todos os casos de desgaste de flanco foram detectados com sucesso e 97% dos casos de quebra foram detectados corretamente.

Tabela 7.3: Classificação de Ferramentas SANDVIK sem revestimento.

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
1ap	Quebra	Quebra	OK
1bp	Quebra	Quebra	OK
1c	Quebra	Quebra	OK
2b	Quebra	Quebra	OK

Continua ...

Tabela 7.3 – Continuação

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
2c	Quebra	Quebra	OK
3a	Flanco	Flanco	OK
3bp	Quebra	Quebra	OK
3c	Flanco	Flanco	OK
4ap	Flanco	Flanco	OK
4b	Quebra	Quebra	OK
4c	Quebra	Quebra	OK
4cp	Flanco	Flanco	OK
5a	Quebra	Quebra	OK
5b	Quebra	Quebra	OK
5c	Flanco	Flanco	OK
5cp	Quebra	Quebra	OK
6a	Flanco	Flanco	OK
6ap	Quebra	Quebra	OK
6b	Quebra	Flanco	Falso
6bp	Quebra	Quebra	OK
6cp	Quebra	Quebra	OK
7b	Quebra	Quebra	OK
8a	Quebra	Quebra	OK
9b	Quebra	Quebra	OK
9c	Quebra	Quebra	OK
9cp	Quebra	Quebra	OK
10a	Quebra	Quebra	OK
10b	Quebra	Quebra	OK
10bc	Quebra	Quebra	OK
10c	Quebra	Quebra	OK
10cp	Quebra	Quebra	OK
11a	Quebra	Quebra	OK
11b	Quebra	Quebra	OK
11bp	Quebra	Flanco	Falso
12c	Quebra	Quebra	OK

Continua ...

Tabela 7.3 – Continuação

Ferramenta	Classificação Automática	Classificação Manual	Resultado
13b	Quebra	Quebra	OK
13bp	Quebra	Quebra	OK
13c	Quebra	Flanco	Falso
14cp	Quebra	Quebra	OK
15a	Quebra	Quebra	OK
17a	Quebra	Quebra	OK

Um fato interessante de ser ressaltado é a alta incidência do número de quebras nas ferramentas da SANDVIK sem revestimento frente às mesmas ferramentas com revestimento, o que estatisticamente demonstra uma certa eficiência do revestimento em conservar o estado da ferramenta.

Analisando o conjunto geral das 100 ferramentas, já após ter feito a otimização dos parâmetros do filtro *canny* para as ferramentas sem revestimento, tem-se uma taxa de acerto de 98% para a detecção dos casos de quebra e de 90% para os casos de desgaste de flanco, que é considerada uma ótima taxa de acertos, tendo em vista a importância de se detectar o caso crítico de uma quebra na ferramenta, que pode prejudicar substancialmente o desempenho do processo produtivo. Esta mudança dos parâmetros do filtro *canny* foi realizada de forma manual e não é trivial de ser feita. É necessário ainda automatizar este processo em trabalhos futuros.

Quanto aos resultados das 42 medições realizadas com as ferramentas que apresentaram desgaste de flanco, parte dos mesmos podem ser conferidos nas tabelas 7.4, 7.5 e 7.6, onde encontram-se 5 exemplos de medição de ferramentas da SECO, da SANDVIK com revestimento e da SANDVIK sem revestimento, respectivamente.

Tabela 7.4: Medição de 5 ferramentas SECO.

ID	A_{VB} [mm ²]	VB [mm]	VB_{max} [mm]	VB_{max} Manual [mm]	Erro VB_{max} [%]
4	0,441	0,165	0,287	0,273	5,2
9p	0,169	0,061	0,146	0,139	4,81
10	0,225	0,085	0,146	0,137	6,57
10p	0,268	0,099	0,174	0,174	0,05
26	0,272	0,066	0,141	0,138	1,49

Para as 14 medições realizadas com as ferramentas da SECO houve um erro médio de 23,87% nas medições e o erro máximo encontrado foi de 126%. Já para as 19 medições realizadas com as ferramentas da SANDVIK com revestimento dourado houve um erro médio de 17,65% e um erro

Tabela 7.5: Medição de 5 ferramentas SANDVIK com revestimento.

ID	A_{VB} [mm ²]	VB [mm]	VB_{max} [mm]	VB_{max} Manual [mm]	Erro VB_{max} [%]
1bp	0,238	0,085	0,136	0,126	7,89
4bp	0,208	0,071	0,150	0,141	6,5
8ap	0,318	0,103	0,202	0,187	8,2
8bp	0,186	0,071	0,108	0,106	2,04
19b	0,213	0,075	0,160	0,140	14,45

Tabela 7.6: Medição de 5 ferramentas SANDVIK sem revestimento.

ID	A_{VB} [mm ²]	VB [mm]	VB_{max} [mm]	VB_{max} Manual [mm]	Erro VB_{max} [%]
3a	0,108	0,038	0,061	0,057	8,01
3c	0,116	0,038	0,071	0,046	54,02
4ap	0,108	0,038	0,056	0,068	17,37
4cp	0,147	0,052	0,094	0,086	10,01
6a	0,107	0,038	0,061	0,061	0,1

máximo de 54%. Por fim, para as 9 medições realizadas com as ferramentas da SANDVIK sem revestimento houve um erro médio de 29,27% e um erro máximo de 56%.

Apesar de grande parte dos erros de medição serem aceitáveis, alguns casos são críticos. Na verdade a variação média de erros para cada conjunto de ferramentas poderia ser ainda alterada caso um outro operador realizasse o processo de medição através de microscopia óptica, dada a subjetividade da tarefa, totalmente dependente da experiência do operador. Nota-se que pequenos erros na medição de uma ferramenta (poucos *pixels*) já significam uma boa parcela de erro na medição real, devido à taxa de calibração do sistema que é atualmente de 4,7 μ m para cada *pixel*. Com certeza um novo sensor óptico com maior resolução ajudaria muito neste sentido.

Outro fator que atrapalha o processo de medição é a poeira atraída pela superfície da ferramenta, provocando grandes áreas de ruído na imagem que são difíceis de eliminar através dos filtros de limpeza da cadeia de processamento de imagem. Uma solução é realizar uma limpeza prévia da ferramenta com um jato de ar comprimido antes de inserir a ferramenta na estação de medição.

Porém, em geral o processo de medição funciona de maneira robusta, salvo raras ocasiões em que a região do desgaste da ferramenta não é isolada de maneira correta e retorna erros de medição facilmente identificáveis pelo usuário comum do sistema, que pode requisitar em seguida uma medição manual da mesma ferramenta e solucionar o problema. Porém, a inspeção utilizando a ferramenta no modo manual compromete a autonomia da célula de produção, que em geral deveria contornar problemas com a inspeção do desgaste das ferramentas sem necessitar do apoio direto do usuário.

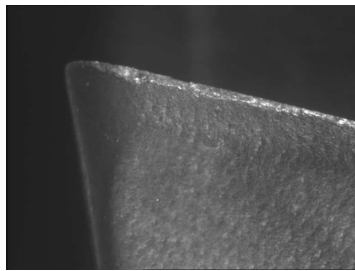
7.2 Quadro Completo da Cadeia de Processamento de Imagens

O capítulo 6 deste documento dedicou-se em explicar tecnicamente todos os passos da cadeia de processamento de imagens, apresentando alguns resultados intermediários alcançados a partir da execução de cada algoritmo de processamento.

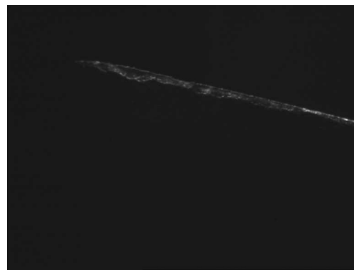
Será apresentado aqui um quadro completo da sequência de resultados obtidos para quatro ferramentas de corte inspecionadas, duas da SECO (figuras 7.1 e 7.2) e outras duas da SANDVIK (figuras 7.3 e 7.4), demonstrando todas as etapas de processamento intermediárias para um caso de quebra e outro de desgaste de flanco em cada tipo de ferramenta de corte.

Este capítulo comentou detalhadamente todos os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento do projeto. O próximo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para a continuação do projeto em trabalhos futuros.

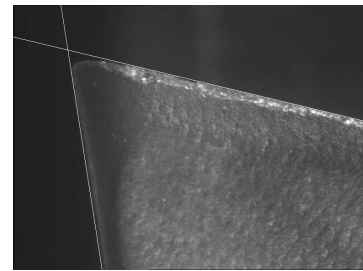
Ferramenta SECO ID10: $VB = 0,085mm$, $VB_{max} = 0,146mm$, $A_{VB} = 0,225mm^2$



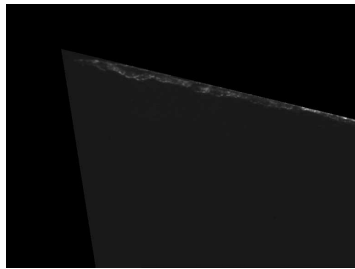
1 - Imagem com iluminação frontal



2 - Imagem com iluminação lateral



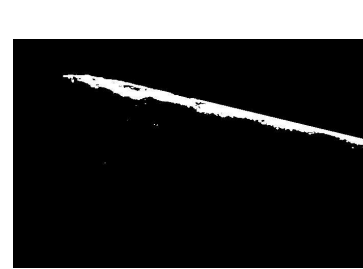
3 - Detecção de bordas da ferramenta



4 - Eliminação do fundo da imagem



5 - Equalização automática do histograma



6 - Binarização da imagem



7 - Primeira aplicação do pré-filtro



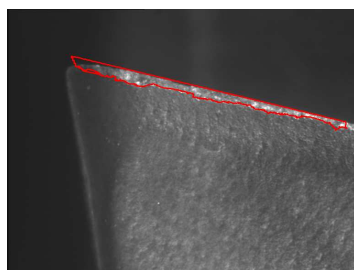
8 - Segunda aplicação do pré-filtro



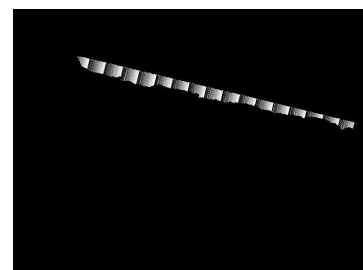
9 - Terceira aplicação do pré-filtro



10 - Desgaste envolvido pelo jacket



11 - Detecção do contorno pelo snakes



12 - Medição perpendicular ao topo

Figura 7.1: Sequência de resultados obtidos para ferramenta com desgaste de flanco da SECO.

Ferramenta SECO ID2: Quebra

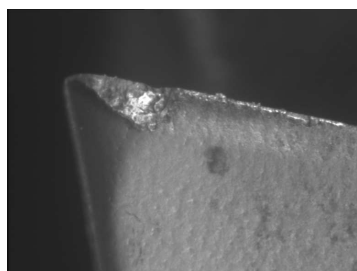
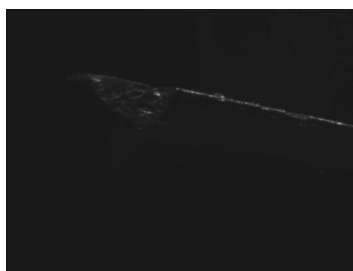
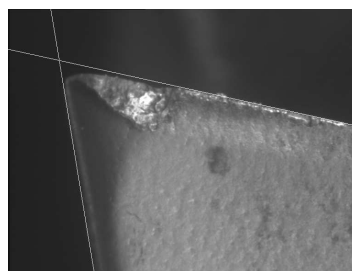
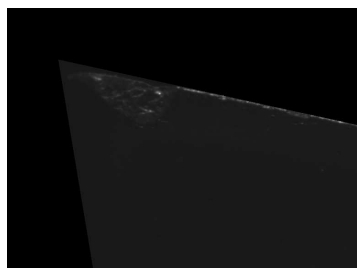
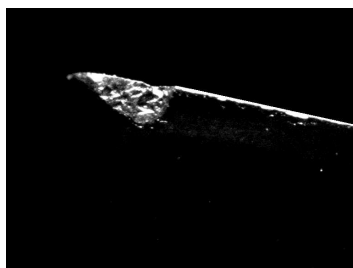
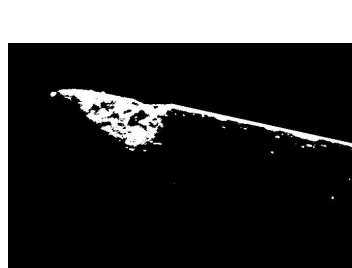
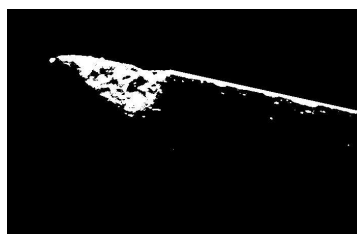
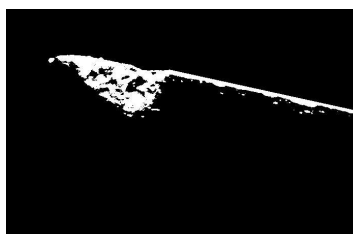
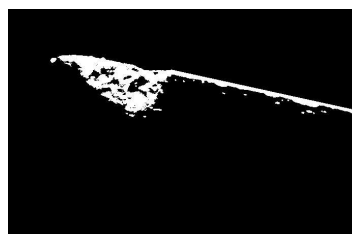
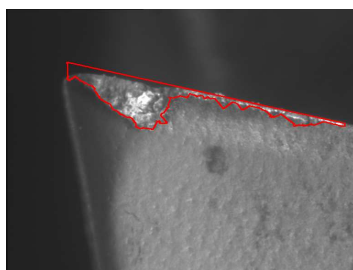
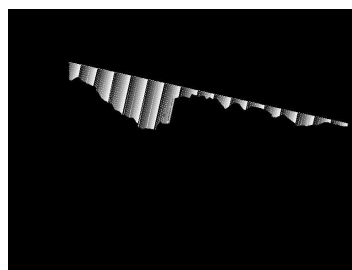
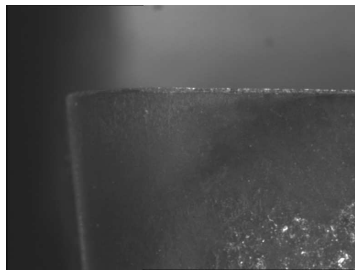
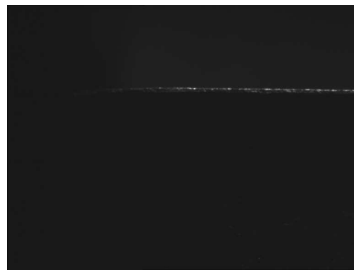
*1 - Imagem com iluminação frontal**2 - Imagem com iluminação lateral**3 - Detecção de bordas da ferramenta**4 - Eliminação do fundo da imagem**5 - Equalização automática do histograma**6 - Binarização da imagem**7 - Primeira aplicação do pré-filtro**8 - Segunda aplicação do pré-filtro**9 - Terceira aplicação do pré-filtro**10 - Desgaste envolvido pelo jacket**11 - Detecção do contorno pelo snakes**12 - Medição perpendicular ao topo*

Figura 7.2: Sequência de resultados obtidos para ferramenta com quebra da SECO.

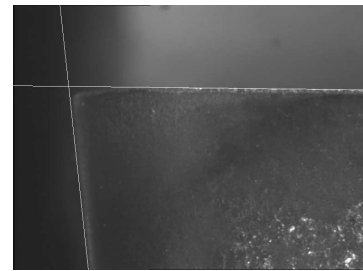
Ferramenta SANDVIK ID4cp: $VB = 0,052mm$, $VB_{max} = 0,094mm$, $A_{VB} = 0,147mm^2$



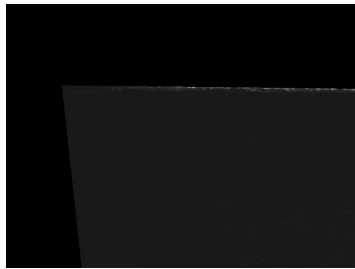
1 - Imagem com iluminação frontal



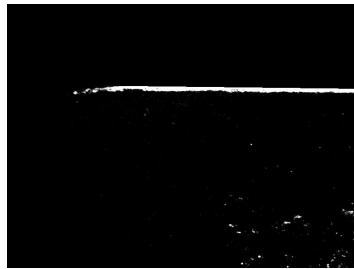
2 - Imagem com iluminação lateral



3 - Detecção de bordas da ferramenta



4 - Eliminação do fundo da imagem



5 - Equalização automática do histograma



6 - Binarização da imagem



7 - Primeira aplicação do pré-filtro



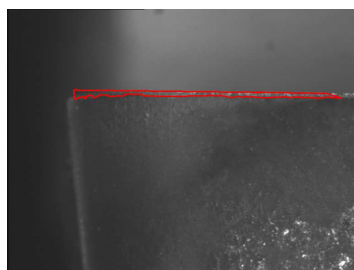
8 - Segunda aplicação do pré-filtro



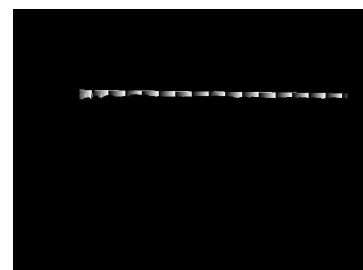
9 - Terceira aplicação do pré-filtro



10 - Desgaste envolvido pelo jacket



11 - Detecção do contorno pelo snakes



12 - Medição perpendicular ao topo

Figura 7.3: Sequência de resultados obtidos para ferramenta com desgaste de flanco da SANDVIK.

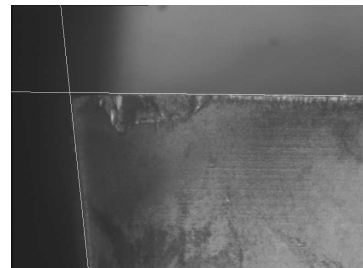
Ferramenta SANDVIK ID8c: Quebra



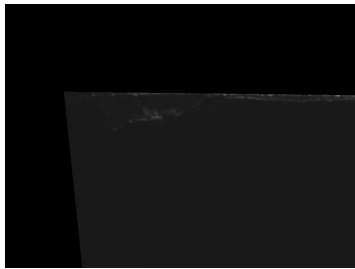
1 - Imagem com iluminação frontal



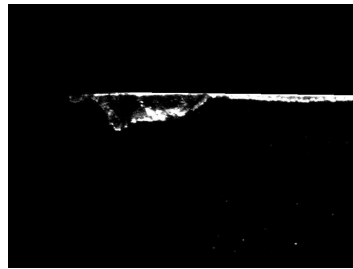
2 - Imagem com iluminação lateral



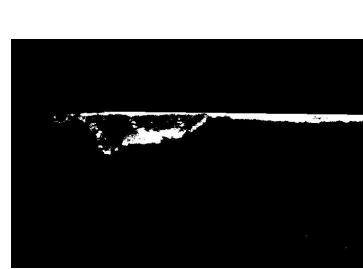
3 - Detecção de bordas da ferramenta



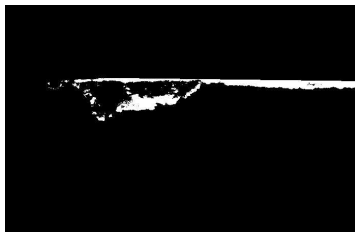
4 - Eliminação do fundo da imagem



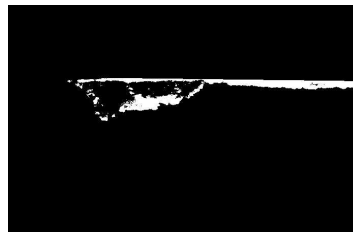
5 - Equalização automática do histograma



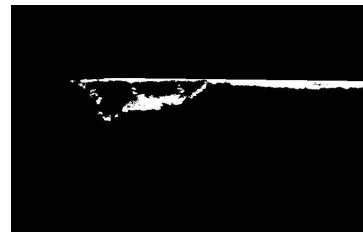
6 - Binarização da imagem



7 - Primeira aplicação do pré-filtro



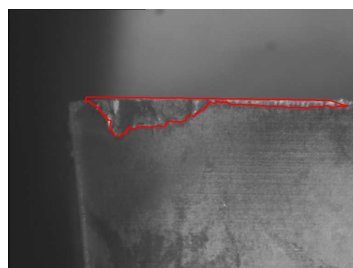
8 - Segunda aplicação do pré-filtro



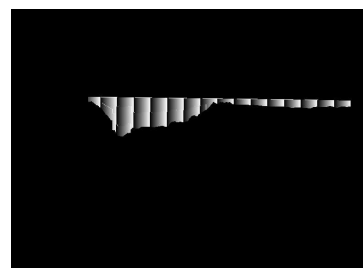
9 - Terceira aplicação do pré-filtro



10 - Desgaste envolvido pelo jacket



11 - Detecção do contorno pelo snakes



12 - Medição perpendicular ao topo

Figura 7.4: Sequência de resultados obtidos para ferramenta com quebra da SANDVIK.

Capítulo 8

Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do autor sobre os avanços alcançados no desenvolvimento do projeto TOOLSPY durante o período deste trabalho de mestrado. Algumas perspectivas para trabalhos futuros na área são levantadas em seqüência.

8.1 Conclusões

O principal objetivo do sistema TOOLSPY é alcançar a medição e classificação automática do desgaste de ferramentas de corte. Este objetivo já foi alcançado e tem sido otimizado freqüentemente, para tornar a solução cada vez mais amigável e de fácil operação para usuários do sistema. Não só as medições do desgaste se tornaram mais robustas com as otimizações feitas ao longo dos algoritmos da cadeia de processamento de imagens, como também a classificação do desgaste apresentou resultados muito bons, sendo que a solução deixou de ser apenas um estudo de caso para um único tipo de ferramenta e passou a abranger três tipos diferentes de ferramentas a partir da mesma solução aplicada. Isso graças em parte ao novo módulo de iluminação do sistema, que devido a sua flexibilidade proporciona à aplicação diferentes técnicas de iluminação para realce das características do desgaste, e em parte a adaptações na cadeia de processamento de imagens.

Desta forma, fica provado através dos resultados deste trabalho que a solução de medição e classificação do desgaste das ferramentas é totalmente viável de ser aplicada pela tecnologia de visão, garantindo resultados mais precisos do que os métodos tradicionais empregados e sem a necessidade de um operador experiente junto ao sistema. Lembra-se ainda que os métodos tradicionais de microscopia óptica somente retornam poucas informações a respeito do desgaste da ferramenta, sendo parte dela inferida subjetivamente pelo próprio operador. A classificação do desgaste da ferramenta é extremamente difícil de ser corretamente definida por um operador. E esta informação é útil para

a definição de que tipo de tarefas de usinagem podem ainda ser realizadas com a ferramenta (alta ou baixa precisão).

Ficou claro, ao longo do desenvolvimento da solução, que a dificuldade para conseguir criar algoritmos adaptativos que se adequassem às diferentes características das três ferramentas cresceu bastante, tendo praticamente saturado todas as capacidades de generalização. É importante tentar otimizar este processo de generalização, para facilitar o emprego da solução para novos tipos de ferramentas, evitando que o operador do sistema tenha que realizar algum tipo de ajuste avançado para adaptar o sistema ao seu caso. Porém, sabe-se que as dificuldades de expansão e generalização para diversas ferramentas são grandes. Por isso, acredita-se que o sistema deveria ser empregado direcionado a famílias de ferramentas, que apresentem algumas características em comum, como por exemplo, a geometria, a cor de revestimento, as características reflexivas da superfície. Desta forma, o sistema trabalharia com distintas soluções (diferentes configurações da cadeia de processamento de imagens) para as diferentes famílias de ferramentas, permitindo uma generalização aceitável do sistema, sem requisitar esforço demasiado por parte do *software* de processamento.

Outra solução para este problema seria utilizar os recursos do banco de dados e passar a guardar uma série de informações e parâmetros de algoritmos de processamento para cada tipo de ferramenta. Esta situação permitiria o funcionamento adequado do sistema para todo e qualquer tipo de ferramenta de corte, porém, deixaria de ser amigável e de fácil uso pelo operador, pois exigiria conhecimentos avançados de sua parte toda vez em que um novo tipo de ferramenta tivesse de ser incluído no sistema para inspeção, tendo de ser reconhecidos e configurados os melhores parâmetros de processamento para este. Esta solução foge um pouco da idéia original do sistema TOOLSPY, que deve ser amigável e de fácil operação e por isso não é muito atraente.

Outra questão a ser discutida é a eficiência do sistema por si só. Já está claro que o TOOLSPY apresenta eficiência igual ou superior a qualquer método tradicional de medição direta do desgaste em ferramentas de corte, pois uma inspeção do sistema leva atualmente em média 10 segundos. Porém, justamente por tratar-se de um método direto e também pós-processo de inspeção, é necessária a retirada da ferramenta da máquina-ferramenta para que a inspeção seja realizada. Isto não necessariamente impede que a máquina continue trabalhando, mas implica sim na troca da ferramenta da máquina, o que pode ser em alguns casos um fator que atrapalhe o desempenho do processo como um todo. Desta forma, nota-se que é necessário uma certa inteligência por parte do controle central do processo ou da máquina-ferramenta para definir em que instantes seria mais adequado disparar uma inspeção automática do desgaste da ferramenta pelo sistema TOOLSPY, para otimizar este processo de troca de ferramentas.

Porém, é extremamente complicado imaginar uma lógica que realizasse este controle do tempo

de inspeção sem expor o sistema a um possível caso de quebra da ferramenta, antes de ser disparada a medição do desgaste, o que poderia ser muito mais prejudicial do que requisitar o processo de medição sucessivamente, a cada término de operação de usinagem da ferramenta. Uma boa solução para este problema é a integração dos métodos diretos e indiretos de medição do desgaste das ferramentas em uma mesma solução (fusão de sensores), como recomendam e avaliam como a tendência futura para as células de desenvolvimento autônomas muitos especialistas na área [6, 10, 18, 19, 61, 112, 116]. Desta forma é possível realizar inspeções em processo e pós-processo em conjunto, permitindo dar inteligência à lógica de controle para requisitar uma inspeção visual automática da ferramenta no momento correto. Ou seja, através do uso de técnicas indiretas de monitoramento do desgaste busca-se descobrir quando os parâmetros de usinagem do sistema começam a sofrer alterações consideráveis, representando um aumento no estado de desgaste da ferramenta. Poderiam ser usados sensores acústicos, sensores de força e torque, sensores de vibração, dentre outros para exercer esta tarefa. Deve-se então definir alguns critérios, de acordo com a mudança dos parâmetros de usinagem, para disparar uma inspeção direta do desgaste da ferramenta de corte, para evitar frequentes paradas de máquina e trocas de ferramenta. Estes critérios devem ser escolhidos cautelosamente para evitar que casos de quebra ocorram antes que uma inspeção direta do desgaste da ferramenta tenha sido disparado.

8.2 Perspectivas Futuras

Quanto a perspectivas de melhorias e otimizações do projeto, algumas idéias são listadas a seguir para desenvolvimento em futuros projetos:

- As configurações do conjunto óptico já estão bem otimizadas (configuração da íris bem fechada) para o atual nível de intensidade luminosa produzido pelo módulo de iluminação. No entanto, a imagem com iluminação lateral continua muito escura e requer muito esforço de processamento das imagens para realçar e limpar a área do desgaste. Seria interessante aumentar o poder de iluminação por parte dos painéis laterais do módulo de iluminação, trocando os LEDs atuais por mais fortes. Também poderia se pensar em trocar a lente do sistema por uma com melhores características em relação à profundidade de campo, para poder manter bom foco em todas as áreas da ferramenta sem ter de fechar tanto a íris.
- Como visto no capítulo de resultados, a maioria das medições realizadas em casos de desgaste de flanco poderiam apresentar um erro bem menor e mais aceitável de medição caso o sensor óptico do sistema tivesse melhores características de resolução. Na seção A.1.3 foi mostrado que com um sensor de dimensões 1600 X 1200 já seria possível melhorar a incerteza de medição do sistema atual de $\pm 4,7\mu m$ para $\pm 2,21\mu m$.

- O sistema de manipulação das ferramentas ainda sofre algumas deficiências. Em primeiro lugar, o sistema de manipulação externo à estação de medição precisa ser terminado para que a solução seja completamente automatizada, pegando a ferramenta do *magazine* da máquina-ferramenta e trazendo para dentro da estação de medição. Porém, esta ainda é uma atividade de menor prioridade em relação aos demais problemas que devem ser resolvidos para melhorar a robustez do sistema. Porém, em relação ao sistema de manipulação interno da estação de medição, é necessário que se realize um estudo do *software* de controle atual dos motores de passo via rede CANbus, para otimizar o tempo de resposta da rede, que apresenta-se muito lento, prejudicando o desempenho do sistema de medição em termos de seu tempo de resposta.
- A solução para classificação das ferramentas de corte quanto aos casos de quebra e desgaste de flanco se mostrou robusta, mas ainda emprega alguns parâmetros que devem ser ajustados manualmente para a configuração do filtro *canny*. Seria interessante que a escolha destes parâmetros fosse realizada de maneira automática de acordo com algumas características geométricas ou superficiais das ferramentas para garantir a flexibilidade e generalização da solução de classificação para diferentes tipos de ferramentas. Pode-se ainda pensar na expansão da solução de classificação para começar a abordar novos tipos de desgaste, como por exemplo, entalhes, fissuras e microlascamentos. Esta expansão provavelmente deverá ser através de redes neurais, devido à complexidade da tarefa de classificação.
- O algoritmo de calibração automática do sistema provê bons resultados atualmente, porém, não leva em conta nenhuma informação sobre as taxas de distorção provocadas pelas lentes do conjunto óptico para realizar a calibração do sistema. Seria necessário levantar estas informações para garantir uma medição mais confiável por parte do sistema, ou ainda, trocar o conjunto óptico do sistema e passar a usar lentes telecêntricas, que como explicado na seção A.1.1, apresentam melhores características para tratar dos problemas de aberração e distorção. Porém estas lentes apresentam um preço mais alto do que as lentes comuns encontradas no mercado.
- Outra questão ligada ao processo de medição é a pré-limpeza das ferramentas, como já comentado na etapa de resultados deste documento. É interessante que seja levada em conta a construção de um possível sistema de limpeza por ar comprimido, para que todos os pontos de poeira e sujeira da ferramenta sejam eliminados antes da ferramenta ser inserida na estação de medição, pois estes afetam consideravelmente o processo. Esta limpeza com o ar comprimido já é feita de forma manual atualmente e apresenta muito bons resultados.
- Outro ponto diz respeito ainda ao posicionamento das ferramentas frente ao conjunto óptico e

de aquisição. Atualmente estes parâmetros de posicionamento são todos recebidos através da comunicação com o banco de dados do sistema. Porém, seria interessante utilizar os recursos do atual sistema de calibração automática do sistema para inferir sobre a melhor posição de foco para uma ferramenta com uma determinada geometria, tendo em vista que o algoritmo de calibração já realiza a escolha da melhor posição de foco do sistema. Bastaria relacionar as condições geométricas das ferramentas de corte comuns com as condições geométricas da ferramenta especial de calibração para se concluir sobre a melhor posição de foco para cada ferramenta do sistema, evitando de realizar um prévio posicionamento manual dos novos tipos de ferramenta a serem incluídos para ter de armazenar no banco de dados sua posição de inspeção.

- Outra vertente a ser investigada seria a análise do desgaste de cratera das ferramentas, tendo em vista que estes, juntamente com o desgaste de flanco, também fornecem diversas informações importantes para otimização do processo produtivo. A medição do desgaste de cratera com suas características de profundidade não é realmente necessária. Mais importante do que isto é verificar a presença/ausência deste tipo de desgaste na ferramenta e retornar os parâmetros de largura do lábio (KL) e afastamento médio da cratera (KM), que podem ser facilmente identificados através da aplicação de técnicas de processamento de imagens 2D. Uma real medição do desgaste de cratera requisitaria técnicas de processamento de imagens 3D, tendo em vista as características de profundidade do desgaste.

Apêndice A

Projeto de Sistemas de Visão

Este apêndice traz informações complementares sobre a tecnologia de sistemas de visão, com o intuito de prover embasamento necessário a respeito do *hardware* e *software* empregado em todos seus componentes, importante para o projeto de um sistema de visão completo.

A.1 Componentes de *Hardware* de um Sistema de Visão

Para ter sucesso na implementação de uma aplicação de visão, deve-se ter muito cuidado na escolha do *hardware* de cada componente do sistema. Uma regra é básica: para que se possa escolher bons algoritmos de processamento de imagens e alcançar bons resultados na interpretação das informações, é necessário ter como entrada do sistema uma imagem de boa qualidade [121, 124], ou seja, a etapa de aquisição da imagem deve ser bem configurada, o que implica a escolha correta e precisa do sistema óptico, de iluminação e aquisição das imagens. Erros na configuração destes sistemas, como por exemplo, obtenção de imagens escuras ou com sombras perturbadoras, foco inapropriado, magnificação insuficiente, e ruídos demasiados podem inviabilizar a implementação da aplicação.

Porém, o sistema de transmissão e processamento de dados também deve ser minuciosamente especificado, principalmente para atender aos requisitos temporais das aplicações.

Alguns parâmetros de um sistema de visão são essenciais para que se possa especificar o *hardware* de qualquer parte componente do sistema. Estes parâmetros são ditos **parâmetros fundamentais**, sendo necessário familiarizar-se com os mesmos antes de iniciar um projeto. A figura A.1 ilustra estes parâmetros. Segue uma descrição detalhada dos mesmos [124, 152, 153, 154]:

Campo de Visão (*Field of Vision* – *FOV*): representa a área visível do objeto em estudo que incide sobre o sensor, ou seja, a porção do objeto que preenche e sensibiliza a área do sensor.



Figura A.1: Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Distância de Trabalho (*Working Distance – WD*): representa a distância da parte frontal das lentes até a superfície do objeto. Trata-se normalmente de uma faixa de valores (máximo e mínimo).

Resolução (*Resolution – R*): representa a menor porção do objeto em estudo que pode ser distinguida pelo sistema. É normalmente visualizada em pares de linha, ou em número de *pixels*, e também é bem conhecida pela expressão “resolução espacial”.

Profundidade de Campo (*Depth of Field – DOF*): representa a maior distância (em termos de profundidade no campo de visão) que pode ser mantida em foco no objeto em estudo para uma determinada distância de trabalho. Também pode ser vista como a quantidade de movimento permitida ao objeto que ainda conserve foco na área ou superfície inspecionada.

Tamanho do Sensor (*Sensor Size – SS*): representa o tamanho da área ativa do sensor, especificada em sua dimensão horizontal. Tamanhos comuns são de 1/4, 1/3, 1/2, 2/3 e 1 polegada.

Desta forma o primeiro passo para o projeto de um sistema de visão é a identificação destes parâmetros fundamentais na aplicação, que permitem inferir a respeito dos demais dispositivos necessários ao sistema. A figura A.2 apresenta uma metodologia sistemática para o projeto de um sistema de visão do ponto de vista do *hardware* do sistema [3].

Nota-se no diagrama que o projeto inicia sempre com a identificação dos parâmetros fundamentais para a boa formação das imagens (FOV, DOF, WD, R, SS e derivados). Na sequência, um pré-projeto do sistema de processamento pode ser inferido, de acordo com as restrições temporais da

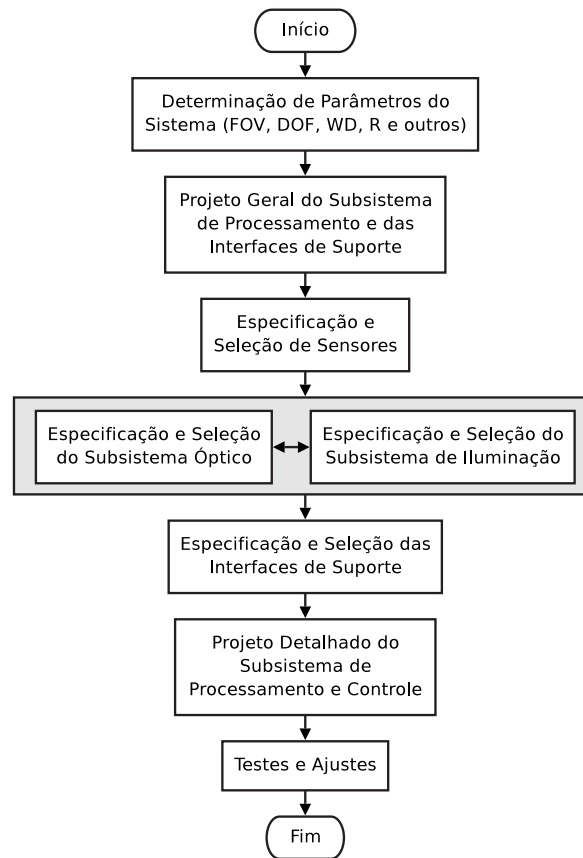


Figura A.2: Metodologia sistemática para o projeto de um sistema de visão.
Fonte: Deschamps [3].

aplicação. Em geral nesta fase já foram adquiridas algumas imagens do objeto de estudo, e pode-se tentar inferir soluções preliminares para o processamento destas.

Um sensor para aquisição das imagens deve ser escolhido, levando-se em conta o tipo de varredura, taxa de aquisição e resolução necessárias para atacar o problema. O conjunto óptico e de iluminação devem ser ajustados a seguir, para permitir correta magnificação, foco e destaque para o objeto em estudo na imagem. Em geral a escolha de ambos estes sistemas é feita de maneira paralela pela forte ligação de algumas características das lentes e a quantidade de luminosidade que afeta o sistema. Ao final, fixa-se a definição do conjunto de interfaces de suporte, transmissão e processamento de dados, sendo possível a realização de testes e a elaboração de uma estratégia mais profunda em relação ao processamento das imagens para extração das características desejáveis.

Nas próximas seções, serão descritos alguns conceitos básicos próprios de cada um destes componentes, necessários para a correta especificação do *hardware* do sistema completo de visão.



Figura A.3: Exemplo de componentes ópticos.
 Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

A.1.1 Sistema Óptico

O sistema óptico é formado pela composição de lentes, tubos extensores e de montagem, filtros, difusores, polarizadores, espelhos, prismas e fibras ópticas, sendo responsável pelo direcionamento e dimensionamento dos feixes luminosos que provêm do objeto para o sensor óptico [126, 152].

As lentes definem a superfície de foco e a magnificação (ampliação ou redução) da imagem do objeto em estudo. Podem ser côncavas, convexas, plano-convexas, telecêntricas, dentre outras. Os tubos extensores (ou espaçadores) auxiliam na magnificação da imagem do objeto em estudo, porém, diminuem a quantidade de iluminação incidente sobre o sensor e limitam a distância de trabalho. Já os tubos de montagem servem para adaptar diferentes padrões de lentes e câmeras. Filtros extraem frequências específicas do espectro luminoso que incide no sensor, como por exemplo, filtros de cores visíveis ao olho humano, filtros infra-vermelhos e ultra-violetas, dentre outros. Difusores são aplicados no espalhamento ou dispersão dos raios luminosos incidindo sobre os objetos, para dar um aspecto mais homogêneo de iluminação. Já os polarizadores filtram a intensidade dos feixes luminosos incidentes sobre o objeto em estudo. Espelhos são usados na manipulação da trajetória dos feixes luminosos incidentes na cena em estudo por reflexão, sendo muito usados para simular dupla aquisição de imagens, ou seja, aquisição feita por duas câmeras, porém, realizada com apenas uma câmera, para economizar custos do sistema. Os prismas também possuem características reflexivas, porém, costumam ser usados para realizar a divisão dos feixes luminosos em mais de uma direção, ou até mesmo a separação de componentes da luz. A figura A.3 ilustra os componentes acima citados.

Para a correta especificação destes componentes ópticos, calcula-se a partir dos parâmetros fundamentais previamente identificados outros parâmetros do sistema, como por exemplo, a magnificação primária ($PMAG$), a magnificação do sistema ($SMAG$), os limites focais (f'), dentre outros.

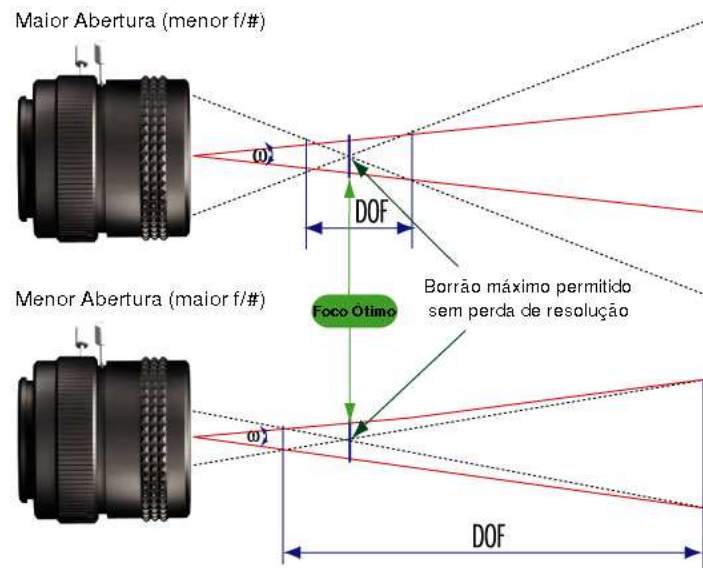


Figura A.4: *Relacionamento entre a profundidade de campo e a abertura de lentes.*

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Segue nas próximas sub-seções a explicação de algumas variáveis derivadas dos parâmetros fundamentais de um sistema de visão [126, 152, 153, 154].

Abertura de Lentes ($f/\#$)

A abertura de lentes ($f/\#$ ou *f-number*) representa o controle de abertura da íris das lentes, proporcionando uma medida da quantidade de luminosidade que sensibiliza o sensor óptico. À medida que a íris se fecha, $f/\#$ aumenta.

Há uma relação íntima entre a abertura de lentes e a profundidade de campo do sistema, como pode ser visto na figura A.4. Há um aumento na profundidade de campo do sistema à medida que a abertura da íris diminui. Em contrapartida, deve-se compensar a quantidade luminosa incidente no sensor aumentando a potência da fonte luminosa.

Magnificações Primária e do Sistema

As magnificações representam a relação de proporção entre as dimensões do objeto em estudo no mundo real e as imagens projetadas no sistema.

A magnificação primária das lentes é a relação do campo de visão (*FOV*) e o tamanho do sensor (*SS*) do sistema. Representa o quanto o objeto em estudo será aumentado (ou diminuído) de acordo com o tamanho da imagem projetada no sensor. Em geral os cálculos são feitos usando as componentes horizontais destas variáveis, como na equação A.1 e ilustrada na figura A.5.

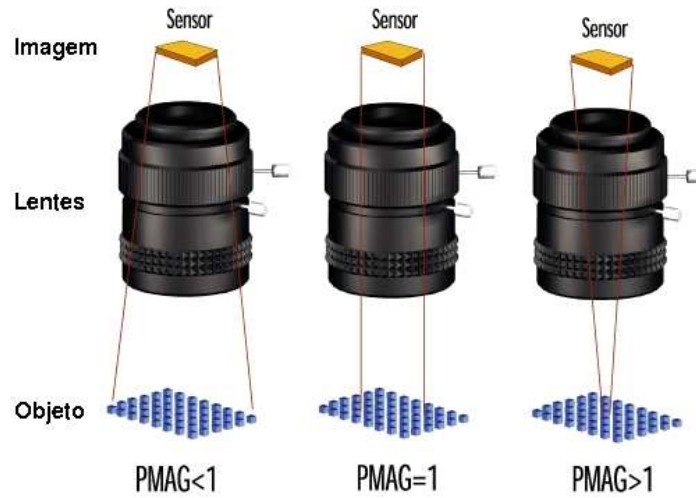


Figura A.5: Relação entre tamanho do sensor e campo de visão.
 Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

$$PMAG = \frac{SS_H}{FOV_H} \quad (A.1)$$

A magnificação do sistema é obtida da relação entre o tamanho da área de projeção da imagem em um *display* ou impressora do sistema (*Display*) e o campo de visão (*FOV*), como na equação A.2.

$$SMAG = PMAG \cdot \frac{Display_H}{SS_H} \quad (A.2)$$

Limites Focais

A distância focal das lentes é influenciada diretamente pela distância de trabalho do sistema, ou seja, é necessário conhecer a distância do objeto em estudo em relação às lentes para poder determinar onde queremos manter foco para a aquisição das imagens. Os limites focais significam na verdade uma faixa de valores de distâncias em que o sistema alcança foco sobre o objeto. Esta faixa de valores pode ser calculada de acordo com as equações A.3 e A.4. O termo limite focal também é conhecido como profundidade de foco na literatura de visão [154].

$$f_{max} = \frac{WD_{max}}{1 + (1 + PMAG)} \quad (A.3)$$

$$f_{min} = \frac{WD_{min}}{1 + (1 + PMAG)} \quad (A.4)$$

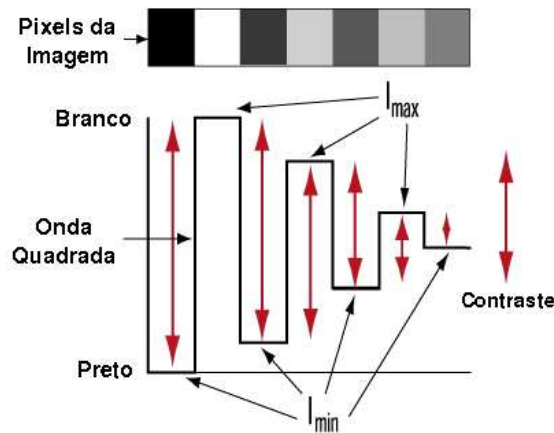


Figura A.6: *Contraste entre diferentes tonalidades de cinza em uma imagem.*

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Contraste

O contraste é uma comparação entre as diversas tonalidades de cinza (intensidade luminosa) da imagem adquirida, que auxilia a identificar e separar objetos do fundo da imagem. É fortemente influenciado pelas características da lente, da câmera e principalmente da iluminação do sistema.

A figura A.6 ilustra diferentes tonalidades de cinza, evidenciando o contraste entre elas. O contraste ($C\%$) é normalmente definido em termos de porcentagem. Por exemplo, uma linha preta desenhada sobre uma superfície branca resulta em 100% de contraste entre a linha e a superfície. A equação A.5 demonstra o cálculo do contraste entre diferentes intensidades (I) luminosas.

$$C\% = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \cdot 100 \quad (A.5)$$

Distorções, Erros de Perspectiva e Lentes Telecêntricas

Fenômenos como o de distorção e os erros de perspectiva alteram a qualidade final da imagem. A distorção é um fenômeno (ou aberração de natureza geométrica) que ocorre com as lentes devido as suas características esféricas, produzindo diferenças de magnificação em pontos distintos da imagem, fazendo com que os objetos sejam dispostos incorretamente na imagem em relação ao seu centro. Ou seja, a distorção não causa em perda de informações na imagem, mas sim um posicionamento incorreto de partes da imagem. A distorção ($D\%$) pode ser corrigida por *software* calculando-se a porcentagem de erro de distorção ou deslocamento ocasionado pelas lentes, através dos valores de distância atuais (AD) e previstos (PD) nas imagens adquiridas, conforme a equação A.6.

$$D\% = \frac{AD - PD}{PD} \cdot 100 \quad (A.6)$$

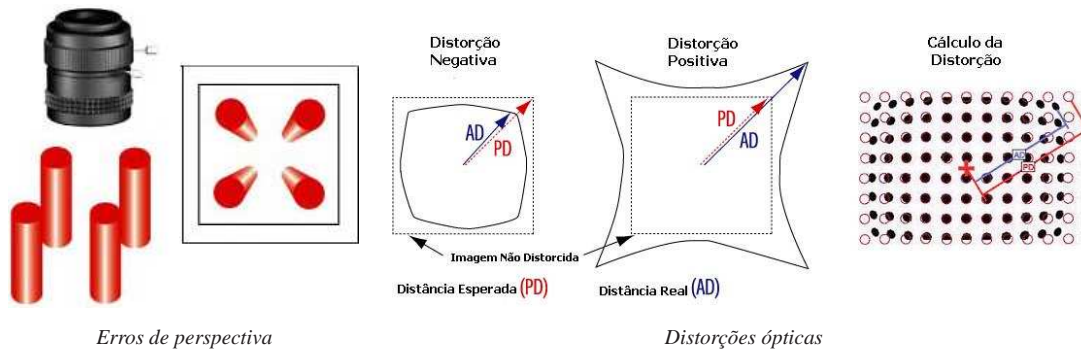


Figura A.7: Ilustração de fenômenos que afetam a aquisição de imagens.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

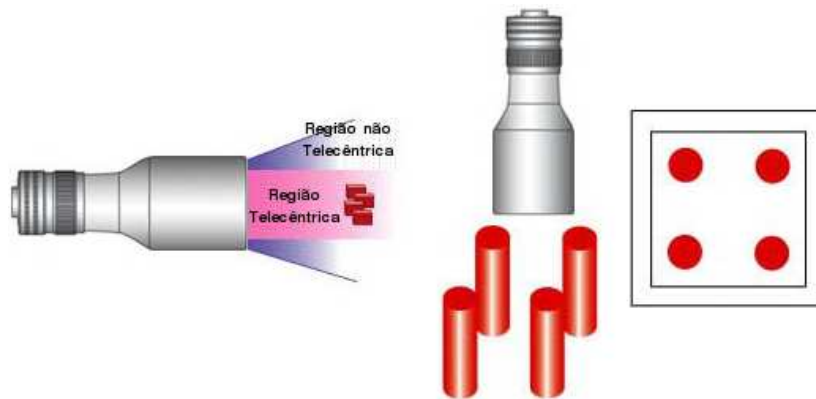


Figura A.8: Princípio de funcionamento das lentes telecêntricas.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Já os erros de perspectiva (conhecidos por *parallax*) são fenômenos bem conhecidos da visão humana, sendo de fato, o que permite o cérebro humano interpretar as informações 3D do mundo real. Estes erros são mudanças na magnificação de um objeto, dando a impressão de que as regiões mais próximas da lente tenham dimensões maiores do que as que se encontram mais distantes.

Em geral, ambos fenômenos não afetam substancialmente o bom funcionamento do sistema. Porém, em algumas aplicações de metrologia óptica, podem alterar substancialmente o resultado final da medição, sendo necessário o cálculo da quantidade de distorção sofrida pela imagem devido a estes erros, ou optar pelo uso de lentes telecêntricas. Apesar de serem mais caras, elas não sofrem com estes tipos de aberrações, pois possuem internamente uma segunda íris, permitindo que apenas os feixes luminosos paralelos ao eixo óptico incidam no sensor. A desvantagem é que o campo de visão da aplicação torna-se reduzido (em geral do tamanho do diâmetro da lente telecêntrica).

A figura A.7 ilustra os fenômenos de distorção e erros de perspectiva encontrados na aquisição de imagens. O princípio das lentes telecêntricas é ilustrado na figura A.8.

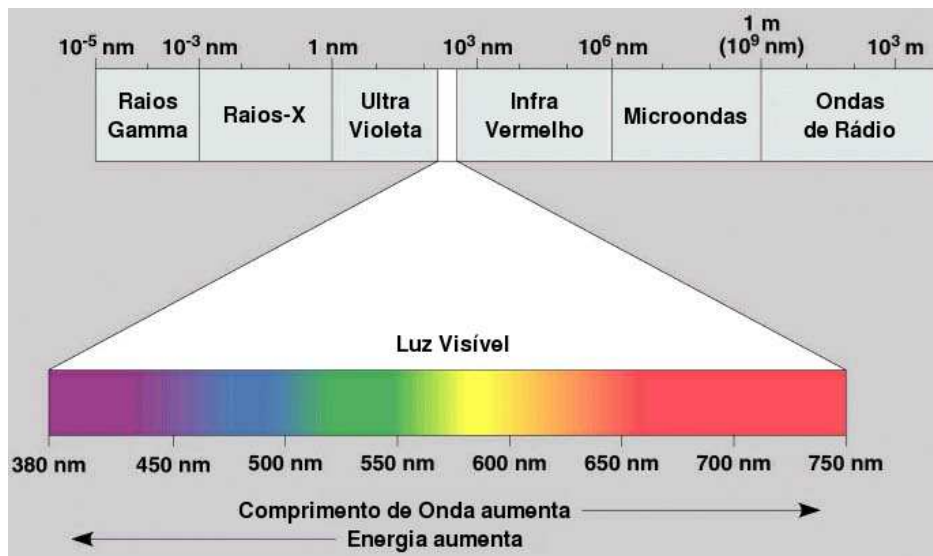


Figura A.9: Todas as faixas do espectro luminoso.

Montagem de Lentes

As lentes são acopladas em frente ao sensor da câmera por encaixes padronizados (roscas). Os dois padrões mais comuns de encaixe de lentes são os padrões C e CS. A única diferença entre estes padrões está na distância entre a rosca e o eixo óptico: a montagem C possui uma distância de 12.5mm, enquanto que a CS possui 17.5mm. Estes padrões podem ser facilmente intercambiados a partir do uso de tubos ou espaçadores de montagem.

A.1.2 Sistema de Iluminação

O objetivo do sistema de iluminação é a projeção de luz sobre o objeto em estudo, pois em geral estes não emitem luz própria, que é necessária para a sensibilização do sensor óptico. Quando se menciona em luz, entende-se qualquer faixa do espectro luminoso, e não apenas a faixa do espectro visível ao olho humano. Existem muitas soluções de visão que requerem inclusive a aplicação de luz incidente em faixas não visíveis do espectro luminoso, com por exemplo, as imagens de tomografia médica, algumas imagens astronômicas e imagens de curvas de calor. A figura A.9 ilustra toda a faixa do espectro luminoso. Repara-se como é pequena a faixa visível ao olho humano, e quão limitada seria a tecnologia de visão caso se restringisse apenas à pequena faixa visível do espectro.

Sendo assim, a escolha de um tipo de iluminação correto para o ambiente da aplicação torna-se extremamente importante, pois se o objeto em estudo não for destacado (apresentar bom contraste) em relação às demais informações da cena, dificilmente consegue-se progredir na solução, e o projeto pode ser totalmente inviabilizado. Em contrapartida, caso uma boa iluminação seja alcançada, as

etapas de processamento das informações tornam-se muito mais fáceis [125].

Em geral, a escolha de uma fonte luminosa e de uma técnica de iluminação adequada são influenciadas pelas características superficiais do objeto em estudo (geometria, estrutura, cor, transparência, reflectância), onde o objetivo é normalmente incidir sobre a superfície do objeto uma iluminação homogênea e constante ao longo do tempo [125, 126].

O projeto de iluminação de um sistema de visão consiste normalmente de 3 etapas [2, 3]:

1. Determinar o tamanho exato do campo de visão (junto ao projeto do sistema óptico), para que se compreenda o tamanho e as características superficiais da área que se deseja iluminar.
2. Determinar o tipo de fonte luminosa adequada à aplicação (tungstênio, fluorescente, halogênio, LED, laser), escolhendo uma faixa de frequência apropriada do espectro luminoso [126] conforme as características superficiais do objeto em estudo vistas no passo anterior.
3. Determinar a geometria (posição da fonte em relação ao objeto e sensor, direção dos feixes luminosos), a potência, eficácia e características temporais da fonte luminosa, necessárias para realçar as partes desejáveis do objeto de forma homogênea e constante ao longo do tempo [126].

É possível que para determinadas aplicações as etapas 2 e 3 tenham suas ordens trocadas, caso tenha de se experimentar diferentes tipos de fontes luminosas para averiguar o comportamento de cada uma delas sobre a superfície do objeto. É apresentado a seguir um estudo breve das diferentes fontes de iluminação e técnicas de projeção da luz aplicadas com estas fontes.

Fontes de Iluminação

As fontes de iluminação podem ser classificadas como naturais ou artificiais [126]. Como fonte natural de iluminação temos, por exemplo, a irradiação solar, e dentre as artificiais, podemos citar as famosas lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Segue uma descrição das principais fontes de iluminação usadas, assim como as vantagens e desvantagens de sua aplicação [125, 126]:

Luz natural: é normalmente a opção mais econômica, porém, a irradiação solar não costuma ser própria para aplicações de visão, pois sua cor e intensidade luminosa sofrem constante variação ao longo dos dias, períodos do ano e com as condições temporais, prejudicando o projeto do *software* de processamento das imagens. Pode até tornar-se prejudicial e fonte de ruído para aplicações envolvendo outras fontes de iluminação, pois a luz solar contém todas as frequências

do espectro luminoso, e por sua grande potência, costuma ser difícil contorná-la com o uso de fontes luminosas artificiais, sem prover algum tipo de enclausuramento do ambiente.

Lâmpadas Incandescentes: são as lâmpadas mais comuns e menos custosas em relação às demais fontes luminosas, porém, não apresentam características muito próprias para o processamento de imagens, especialmente quando a taxa de aquisição das imagens é múltipla ou similar da frequência da rede elétrica (50 ou 60Hz). Isto costuma ser um problema para câmeras lineares, que acabam gerando imagens com muita interferência (linhas claras escuras), devido à diferença entre as frequências da rede e de aquisição. A resposta das lâmpadas incandescentes ao controle de sua intensidade luminosa tem bastante inércia, sendo dependente da temperatura atual de seu filamento de tungstênio. Além disso, elas costumam esquentar bastante e por isso emitem, além da luz na frequência visível do espectro luminoso, radiação infra-vermelho até faixas intermediárias do espectro infra-vermelho.

Lâmpadas QTH: estas lâmpadas halógenas funcionam de forma similar às lâmpadas de tungstênio, mas não sofrem com o problema de interferência da frequência da rede elétrica. Apesar disto, o filamento de tungstênio das lâmpadas halógenas pode atingir temperaturas bem mais altas que nas lâmpadas de tungstênio normais, emitindo radiação infra-vermelho até faixas avançadas deste espectro. A vantagem é que elas apresentam um comportamento mais adequado em relação à intensidade luminosa gerada, que é praticamente constante, o que torna estas lâmpadas boas fontes de iluminação para alimentar sistemas iluminados por fibras ópticas.

Lâmpadas de Descarga: estas lâmpadas operam sob o princípio de descargas de gases, onde um forte campo elétrico é criado dentro da lâmpada para realizar a movimentação dos íons dos gases em seu interior, gerando radiação luminosa a partir do choque e recombinação das moléculas. Existem dois tipos de lâmpadas de descarga: as espectrais e as fluorescentes, sendo ambas muito semelhantes, porém as espectrais não apresentam um revestimento fluorescente. As lâmpadas fluorescentes liberam forte radiação luminosa, especialmente ultra-violeta, que é nocível aos seres humanos (podendo ocasionar queimaduras dos tecidos externos do corpo). Por isso, esta radiação é convertida em um sinal luminoso de menor frequência (visível ao olho humano) ao entrar em contato com o revestimento fluorescente da lâmpada, antes de atingir seu meio externo. Elas apresentam um campo de iluminação homogêneo e podem ser operadas através de retificadores de frequência, para prevenir a modulação da intensidade luminosa e as interferências indesejáveis. Não esquentam muito e costumam ser bem utilizadas para aplicações de visão. Mas perdem a intensidade luminosa com longos períodos de uso.

Lâmpadas de Arco Voltaico: são lâmpadas como as de descarga, porém, para operação em altas correntes elétricas, os eletrodos que criam o campo elétrico na lâmpada esquentam demasiadamente, e a descarga dos gases torna-se uma descarga voltaica. Estas lâmpadas apresentam alta intensidade luminosa, utilizadas muitas vezes até para simular luz solar, e ainda podem ser condicionadas a pequenas áreas luminosas (fontes pontuais).

LEDs: permitem um controle da intensidade luminosa gerada e reagem de maneira instantânea e praticamente sem inércia a este controle, sendo por isto também próprios para aplicações estroboscópicas. Além disto, tem tamanho pequeno, são leves, apresentam custos razoavelmente econômicos e um tempo de vida muito amplo, dificilmente tendo de ser trocados. Não apresentam problemas de aquecimento, perturbação acústica ou ruídos, vibração, nem de alimentação com alta voltagem, e bem por isso, seu uso em ambientes industriais cresceu expressivamente nos últimos anos. Podem ser arrançados em diversas geometrias para criação de diferentes módulos de iluminação, variando sua faixa de frequência luminosa desde o azul até curto infravermelho. Também servem de alimentação para sistemas iluminados por fibras ópticas.

Lasers: possuem uma grande potência de radiação focada em pequena área. Por questão de segurança, as antigas e grandes unidades de *laser* foram substituídas por módulos de diodos *laser*. Assim como os LEDs, são pequenos e integram-se em sistemas com espaços limitados, podendo gerar projeções de linhas, pontos, círculos, matrizes e outras formas geométricas de iluminação. Também podem alimentar sistemas iluminados por fibra óptica.

Emissores Infra-Vermelho: são fontes de iluminação baseadas em princípios termais. Em geral, tratam-se de aquecedores baseados em resistência elétrica. Costumam ser usados em ambientes onde é impossível eliminar a indesejável influência da luz natural ou de radiação dispersiva de outras fontes de iluminação. Desta forma, utiliza-se um filtro que permita passar apenas a faixa de sinais infra-vermelhos, cortando a influência das demais fontes. Lâmpadas incandescentes e QTH também produzem bastante radiação infra-vermelho.

Técnicas de Iluminação

Segue uma descrição das principais técnicas de iluminação usadas, assim como vantagens e desvantagens de suas aplicações [2, 121, 125, 126, 152]:

Direcional: consiste na emissão de um feixe luminoso (unilateral ou bilateral) em direção fixa e com pouca dispersão, o qual reflete sobre o objeto realçando características especiais deste.

Vantagens: forte, realçando características superficiais do objeto.

Desvantagens: pode gerar sombras ou regiões de muito brilho.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lâmpadas incandescentes.



Figura A.10: Ilustração da técnica de iluminação direcional.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Multi-Direcional: consiste na emissão de diversos feixes luminosos provindos de diferentes mas equidistantes pontos em relação ao centro do objeto, gerando uma iluminação mais uniforme de toda sua superfície.

Vantagens: forte e uniforme, reduzindo sombras.

Desvantagens: pode gerar regiões de muito brilho, custos mais elevados.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs.

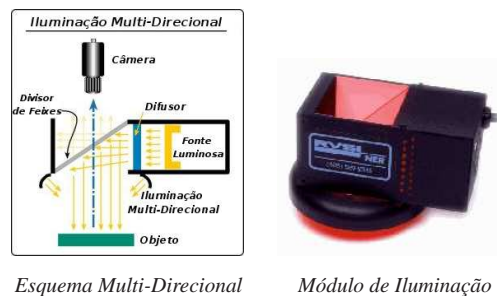


Figura A.11: Ilustração da técnica de iluminação multi-direcional.

Fonte: RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Anel: tem o formato de um anel luminoso, que é fixado junto à lente da câmera, fornecendo iluminação paralela ao eixo óptico.

Vantagens: forte e uniforme, reduzindo sombras.

Desvantagens: pode gerar um anel de muito brilho sobre superfícies reflexivas.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lâmpadas fluorescentes.

Campo Escuro: tipo especial de iluminação direcional, onde a luz é emitida em diversas direções, porém, sempre perpendicular ao eixo óptico. Torna-se muito útil para inspeção de objetos com superfícies em alto relevo ou irregulares.



Figura A.12: Ilustração da técnica de iluminação em anel.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Vantagens: propicia ótimo contraste para superfícies transparentes ou em alto relevo.

Desvantagens: gera pouco contraste em objetos opacos, e sua instalação é mais complicada, devido à proximidade dos objetos.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lasers.

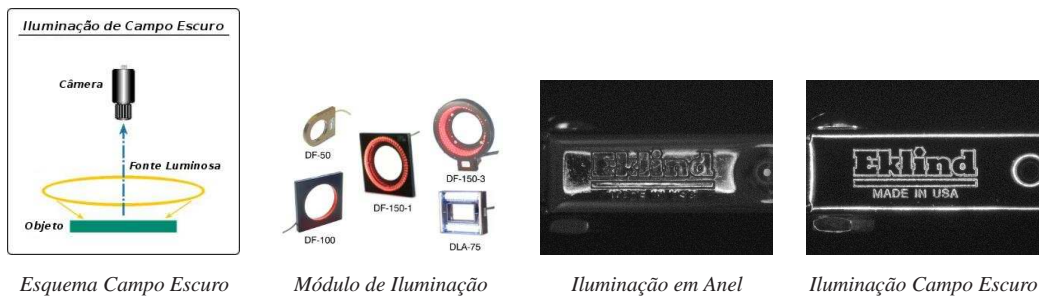


Figura A.13: Ilustração da técnica de iluminação de campo escuro (dark-field).

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Luz de Fundo: consiste em posicionar a fonte luminosa atrás do objeto, emitindo luz na direção do eixo óptico. Útil para aplicações em metrologia e análise de objetos translúcidos.

Vantagens: propicia ótimo contraste para detecção de bordas e análise de objetos translúcidos.

Desvantagens: elimina os detalhes superficiais do objeto, por não serem iluminados.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lâmpadas fluorescentes.

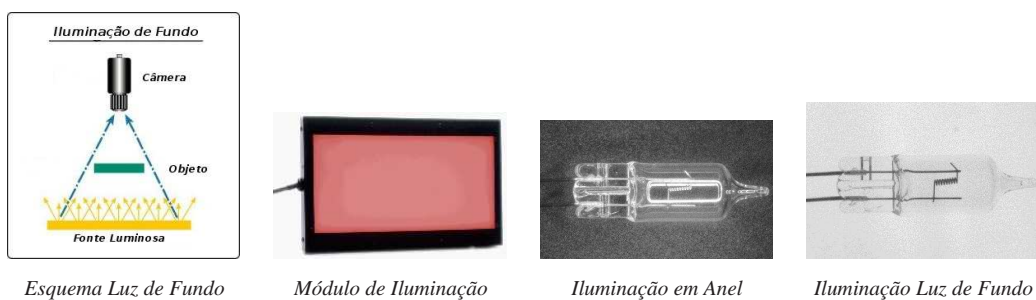


Figura A.14: Ilustração da técnica de iluminação de fundo (backlight).

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Cúpula: consiste em emitir feixes luminosos provenientes da base de uma cúpula semi-esférica, que propagam-se e refletem em diferentes pontos ao longo da cúpula, concêntrica com o objeto. Provê iluminação uniforme e difusa sobre toda a superfície do objeto.

Vantagens: reduz sombras e inibe áreas de muito brilho em superfícies reflexivas.

Desvantagens: instalação é mais complicada, devido à proximidade do objeto, custos mais elevados.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lâmpadas fluorescentes.

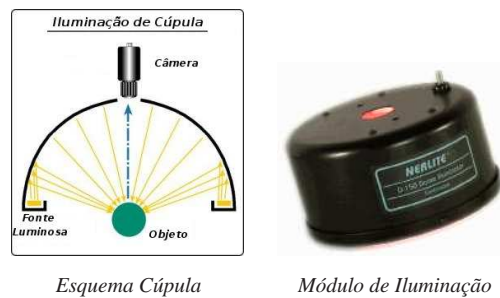


Figura A.15: Ilustração da técnica de iluminação de cúpula (*dome*).

Fonte: RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Difusa: consiste em projetar iluminação perpendicularmente ao eixo óptico através de um difusor. A luz dispersa que passa pelo difusor atinge um divisor de feixes (*beamsplitter*) e é refletida para a superfície do objeto. Os feixes que provêm do objeto paralelos ao eixo óptico atravessam o divisor de feixes e sensibilizam o sensor.

Vantagens: reduz sombras e brilho, apresenta iluminação uniforme das superfícies planas.

Desvantagens: limitada a pequenas distâncias de trabalho, produz pouca intensidade luminosa, além de ser de difícil instalação e ter custos mais elevados.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, com difusores.

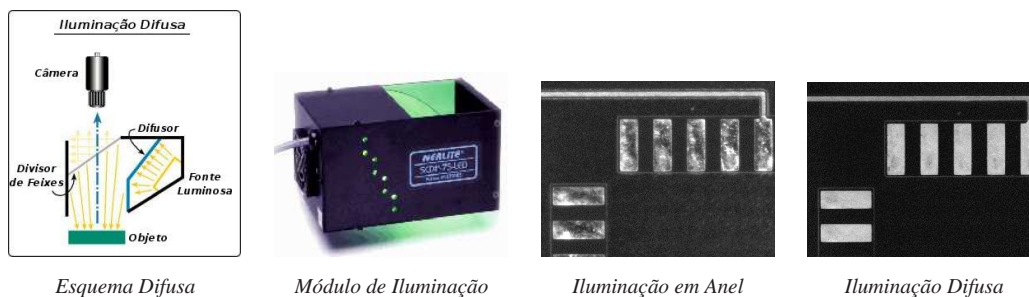


Figura A.16: Ilustração da técnica de iluminação difusa.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Dia Nublado: semelhante à iluminação em cúpula, esta técnica também emite feixes luminosos provenientes da base da cúpula e ainda por uma fonte superior através de um divisor de feixes. Os

raios luminosos propagam-se e refletem em diferentes pontos ao longo desta, produzindo um efeito luminoso semelhante ao comportamento de um dia nublado, com iluminação uniforme em todas as direções que incidem sobre o objeto.

Vantagens: propicia iluminação uniforme, reduz sombras e inibe áreas de muito brilho em superfícies complexas e reflexivas.

Desvantagens: instalação é mais complicada, devido à proximidade do objeto, custos mais elevados.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lâmpadas fluorescentes.



Figura A.17: Ilustração da técnica de iluminação dia nublado (cloudy day).

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/> e RVSI/Nerlite em <http://www.nerlite.com/>.

Estruturada: produz uma linha luminosa sobre a superfície do objeto, possibilitando uma análise das características geométricas da superfície do objeto ao movimentar esta linha sobre o mesmo. Muito usada em aplicações em 3D.

Vantagens: destaca informações de relevo e geometria das superfícies.

Desvantagens: requer fontes potentes de iluminação, de difícil calibração e complexo sistema de movimentação do feixe luminoso.

Fontes de Iluminação: fibras ópticas, LEDs, lasers.

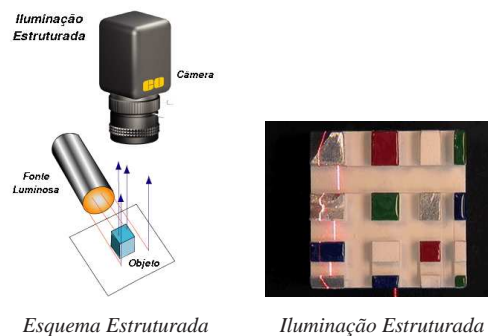


Figura A.18: Ilustração da técnica de iluminação estruturada.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Polarizada: consiste na filtragem dos feixes luminosos, empregada junto às demais técnicas anteri-

ormente citadas. Filtros polarizadores são colocados em frente à fonte luminosa e à câmera, de modo a possibilitar apenas feixes provenientes de uma direção específica transpassar os filtros. Deste modo, ruídos provenientes de reflexões e de outras fontes luminosas são eliminados.

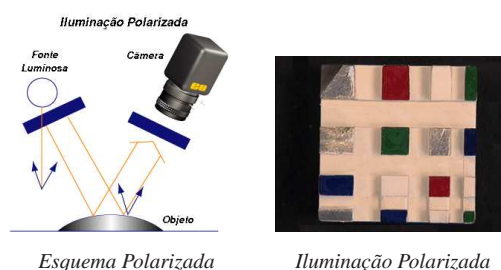


Figura A.19: Ilustração da técnica de iluminação polarizada.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

A.1.3 Sistema de Aquisição de Imagens

O sistema de aquisição de imagens depende diretamente da boa configuração dos sistemas óptico e de iluminação para cumprir bem seu papel. Ele contém o sensor óptico que é responsável pela tradução do sinal de radiação luminosa refletido pelo objeto em estudo para um sinal elétrico que possa ser compreendido pelo sistema de processamento.

Os sensores ópticos (ou de aquisição de imagens) são constituídos por matrizes de elementos fotosensíveis, que são submetidos à exposição luminosa do ambiente durante certo tempo (tempo de exposição) e mapeiam o nível de intensidade luminosa recebido sobre sua superfície em um sinal elétrico analógico proporcional, repassando este sinal para um elemento processador, que irá digitalizar e armazenar o sinal em uma memória de rápido acesso para futuro processamento [125].

Os sensores ópticos podem ser classificados de acordo com o tipo de escaneamento realizado e conforme sua sensibilidade. Quanto ao método de escaneamento, os mais usados atualmente são os de escaneamento por área, linear, *laser*, tomográfico, termográfico e ultra-sônico. Já quanto a sensibilidade ao espectro luminoso, há sensores magnéticos, sensores para aquisição de informações na faixa de frequências visível do espectro luminoso, raios gamma, raios X, raios infra-vermelho, ondas de rádio e até ondas ultra-sônicas [123, 125].

Os sistemas de aquisição variam conforme a aplicação para qual são destinados. Diferenças são encontradas quanto ao princípio de aquisição, a velocidade ou taxa de aquisição, a resolução das imagens adquiridas, o sistema de sensoriamento e a frequência do espectro luminoso utilizada [125].

Segue uma descrição de características gerais dos sensores ópticos.

Princípio de Aquisição (Técnica de Varredura)

Três técnicas de varredura para aquisição de imagens são bem difundidas: entrelaçada, progressiva e linear. Segue abaixo o princípio de funcionamento de cada uma delas [33, 122, 125]:

Varredura Entrelaçada (*Interlaced Scanning*): esta tecnologia foi criada para conter perturbações visuais (*flickering*) em sinais de vídeo de televisões com tubo de imagem. A mesma tecnologia foi aplicada na varredura das informações de alguns tipos de sensores ópticos, consistindo na divisão de uma imagem em dois quadros distintos: um contendo somente as linhas pares da imagem, e a outro contendo apenas as ímpares. Desta forma, a leitura das informações da imagem é feita de forma entrelaçada, primeiramente adquiridas as linhas ímpares, e posteriormente as linhas pares. Uma desvantagem desta técnica é a aquisição de imagens de objetos em movimento, pois como a varredura é dividida em duas etapas, a varredura do segundo quadro (linhas pares) normalmente resulta em um aspecto borrado, evidenciando o estado de movimento do objeto. Para contornar este problema é necessário diminuir o tempo de exposição do sensor, evitando que movimentos bruscos de objetos sejam detectados. Porém isto afeta diretamente a intensidade luminosa que atinge o sensor, geralmente produzindo imagens escuras. Existem ainda técnicas de iluminação estroboscópica próprias para realizar um “congelamento” da imagem por tempo suficiente para viabilizar a leitura de ambos quadros da imagem.

Varredura Progressiva (*Progressive Scanning*): consiste na leitura progressiva e sequencial de todas as linhas da imagem na mesma etapa de varredura, criando um quadro único e completo que representa a imagem. Pode ser aplicada na aquisição de imagens em movimento sem gerar borrões indesejáveis como na técnica anterior. Porém, o escaneamento progressivo ainda apresenta problemas de compatibilidade com os padrões de transmissão de vídeo atuais, normalmente necessitando de uma placa de aquisição de imagens compatível com a tecnologia de varredura progressiva para transmitir os dados adquiridos ao sistema processador. Com o desenvolvimento das tecnologias digitais de aquisição, a tendência é que os padrões analógicos tornem-se obsoletos, e a tecnologia progressiva de varredura deixe de apresentar tais problemas. O custo destes sensores ainda é bem mais alto do que os de varredura entrelaçada. Por serem incompatíveis com os padrões de vídeo atuais, não podem ser produzidos em massa.

Varredura Linear (*Line Scan*): enquanto as técnicas entrelaçada e progressiva lidam com escaneamento de imagens por área, a varredura linear lida com o escaneamento por linhas. A imagem final é gerada a partir da integração de várias linhas de imagem sequencialmente adquiridas. Esta técnica exige uma movimentação (translação ou rotação) do sensor ou do próprio objeto

para viabilizar a aquisição da imagem inteira e nem sempre esta movimentação é trivial, o que pode tornar este tipo de varredura de difícil aplicação para algumas soluções.

Sensores CCD e CMOS

A primeira câmera para aquisição de vídeo possuía uma estrutura chamada *vidicon*, onde os elétrons dos raios luminosos eram varridos sobre uma cobertura de fósforo para adquirir a imagem.

A tecnologia empregada na fabricação e operação dos sensores já encontra-se bem mais evoluída, sendo os sensores CCD (*Charge Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) os mais difundidos atualmente. Eles são formados por matrizes de elementos foto-sensíveis (ou *pixels*) e agrupados em geometria retangular ou linear. Ambas tecnologias são vistas em mais detalhes a seguir [122, 125, 126].

Sensores CCD:

Os fótons de energia luminosa incidente no sensor CCD desprendem certa quantidade de elétrons (proporcional a intensidade luminosa) ao entrar em contato com o material semi-condutor do sensor. Os elétrons captados pelos foto-díodos do sensor são guardados em áreas de armazenamento para posterior transmissão das informações na forma de um sinal elétrico.

O leiaute físico destes sensores dita a maneira como os elétrons são coletados/armazenados, havendo três arranjos diferentes: transferência entrelinhas (*interline transfer*), transferência por quadros (*frame transfer*) e transferência por quadro completo (*full frame transfer*). O princípio de quantização da energia luminosa permanece o mesmo em todos os leiautes.

Sua arquitetura é subdividida em uma região sensítiva e outra de armazenamento. No primeiro instante o sensor recebe a informação luminosa do ambiente externo durante o tempo de exposição, que ativa a região sensítiva do sensor, liberando uma quantidade de elétrons coletados por cada elemento fotosensível. Estes elétrons são quantizados e repassados para a região de armazenamento do sensor e esta informação é repassada de forma serial para um registrador de saída, que envia um pulso elétrico com a informação quantizada da região de armazenamento para um elemento processador, que fará a digitalização deste sinal analógico. Esta operação é ilustrada na figura A.20 para um sensor CCD retangular e outro linear.

Apesar dos avanços alcançados nesta tecnologia, sensores CCD ainda sofrem com um problema de super saturação (*blooming*) de seus elementos sensítivos. O fenômeno ocorre quando uma fonte luminosa é fotografada em frente a um fundo escuro, resultando em um ponto luminoso super saturado que cresce incontrolavelmente na imagem. Além deste problema, o sistema

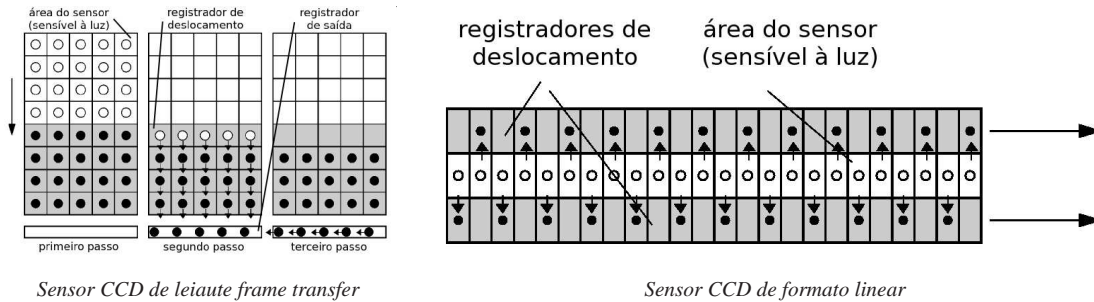


Figura A.20: Sensibilização, armazenamento e deslocamento da imagem em CCDs.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

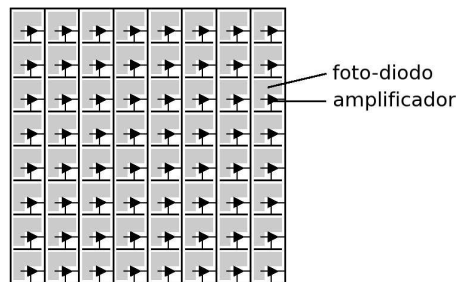


Figura A.21: Operações de sensibilização e transferência de dados em sensores CMOS.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

de deslocamento serial dos elétrons quantizados é ainda um gargalo para melhorar a taxa de transferência de dados a partir destes sensores.

Sensores CMOS:

Os sensores CMOS são fabricados em processos semelhantes ao de microprocessadores, podendo inclusive aproveitar uma linha industrial deste tipo para sua fabricação, o que é uma vantagem sobre os sensores CCD, que precisam de uma linha própria para sua fabricação.

Em sensores CCD, os elétrons gerados pela emissão de fótons sobre o sensor têm de ser coletados, armazenados e posteriormente transmitidos de maneira serial por registradores de deslocamento. Este procedimento requer uma fatia de tempo de execução considerável. Nos sensores CMOS, os elementos fotosensíveis (foto-diodos) estão diretamente acoplados em resistores, permitindo uma contínua transformação da quantidade luminosa recebida em um sinal elétrico proporcional, como pode ser visto na figura A.21.

Antigamente os sensores CMOS não eram tão populares pois apresentavam elevado nível de ruído nas aquisições de imagens, devido ao leiaute do sensor. Conforme a tecnologia evoluiu, foram acoplados aos foto-diodos um circuito de amplificação que auxiliou na redução destes ruídos. Apesar disso, câmeras CMOS ainda apresentam um sinal com taxas de ruídos maiores do que os encontrados em sensores CCD. Porém, uma série de outras vantagens dos sensores

CMOS sobre os sensores CCD colocam-no como uma possível escolha para substituição da tecnologia de sensores CCD no futuro [125]:

- Sensores CMOS permitem acesso direto ao valor de qualquer *pixel* da matriz do sensor, tal qual é feito o acesso de um elemento da imagem na memória do computador.
- É possível acoplar funcionalidades inteligentes ao sensor, como por exemplo, alguns algoritmos de processamento de imagens (compressão, filtragem, dentre outros).
- O consumo de energia de sensores CMOS é cerca de cem vezes menor do que de sensores CCD, sendo que a bateria de uma câmera filmadora com um sensor CMOS poderia durar cerca de uma semana, enquanto a de uma câmera com sensor CCD duraria algumas horas.
- Os sensores CMOS apresentam custos bem mais baixos de produção do que os sensores CCD, por já aproveitarem arranjos de linhas industriais de microprocessadores.
- Sensores CMOS não apresentam problemas de super saturação (*blooming*) como os sensores CCD, já que cada *pixel* da matriz sensorial é lido individualmente.
- As taxas de aquisição de sensores CMOS são bem maiores do que dos sensores CCD, pois a transferência dos dados é feito de forma paralela, sem registradores de deslocamento.

Sensores Monocromáticos e Coloridos

A escolha entre sensores monocromáticos ou coloridos para uma determinada aplicação é de vital importância para seu sucesso. Há uma falsa concepção de que imagens geradas por sensores monocromáticos sejam de qualidade inferior do que as geradas por sensores coloridos. Na verdade, na maioria dos casos, o que ocorre é o inverso [122, 125, 126, 152].

Câmeras monocromáticas (ou preto e branco) possuem apenas 1 sensor e adquirem imagens em diferentes tonalidades de cinza. Ou seja, cada *pixel* adquirido de uma imagem de 256 tons de cinza reflete exatamente o nível de intensidade luminosa registrado pelo sensor naquele ponto específico, podendo variar desde preto (valor 0), até branco (valor 255). Câmeras coloridas podem ter 1 ou 3 sensores. Seja qual for a quantidade de sensores da câmera, as informações de cores são sempre armazenadas em três componentes básicas, uma vermelha, outra verde e outra azul (formato RGB), sendo que a combinação destas cores gera as demais cores do espectro visível.

As câmeras coloridas de apenas um sensor organizam a informação de cores de duas maneiras diferentes: por linhas ou por mosaicos (figura A.22). O resultado desta organização é uma perda de aproximadamente 10% da resolução da imagem em relação às câmeras monocromáticas, que não necessitam deste arranjo de cores. As câmeras monocromáticas ainda possuem menor taxa de ruídos

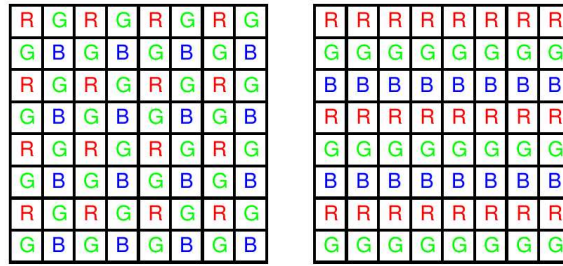


Figura A.22: Cores arranjadas por mosaico ou por linhas numa imagem.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

no sinal, maior sensibilidade à luz e melhor contraste do que as câmeras coloridas. O processamento de imagens em tons de cinza também costuma ser mais rápido do que em imagens coloridas. Em certos casos, alguns filtros coloridos são utilizados junto a sensores monocromáticos para a percepção de características de uma cor específica na imagem. Em geral, câmeras monocromáticas são melhores soluções para aplicações de metrologia ou aplicações em que a resolução do sistema seja um fator importante para o sucesso do mesmo. Usa-se câmeras coloridas apenas quando a informação de cor dos objetos da imagem seja extritamente necessária para sua análise.

Para os casos em que tanto as informações de cores quanto a alta resolução do sistema sejam necessárias, é possível optar pelas câmeras coloridas com três sensores, onde cada sensor responsabiliza-se pela captura de uma componente de cor específica, e não há portanto, perda de resolução. Nestas câmeras, a informação luminosa passa pela lente e é projetada sobre um arranjo de prismas antes de atingir os sensores (figura A.23). Ao entrar em contato com os prismas, a luz é dividida em três componentes, e direcionada para os três sensores respectivamente. Desta forma, o resultado é a aquisição e o armazenamento de três imagens em áreas diferentes na memória do computador, que combinadas, formam a imagem colorida. É possível realizar um processamento específico em uma das componentes da imagem para extração de características próprias de uma das cores. A desvantagem destas câmeras é seu alto custo em relação às demais opções e a baixa sensibilidade à luz fraca, devido à baixa intensidade de cada um dos feixes resultantes na divisão do feixe luminoso primário.

Sensores Infra-Vermelho

Sensores infra-vermelho adquirem imagens segundo os mesmos princípios das câmeras monocromáticas comuns. Porém, a sensibilização do sensor se dá pela radiação infra-vermelho proveniente do estado de calor dos corpos observados. Dá-se o nome de termografia a este processo.

Uma diferença para os sensores monocromáticos comuns é que os sensores infra-vermelhos devem ser continuamente resfriados para que os ruídos provenientes da temperatura do ambiente

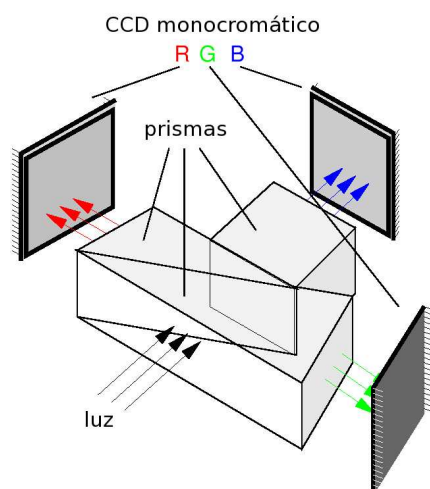


Figura A.23: Técnica de divisão de feixes luminosos em 3 componentes coloridos.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

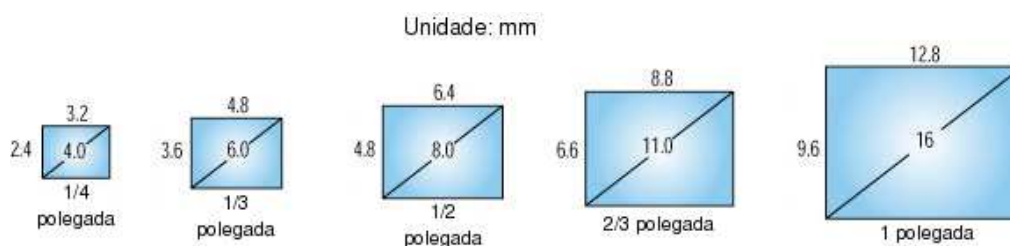


Figura A.24: Tamanhos padrão de sensores CCD.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

não afetem os resultados da aquisição das imagens. Devido a este fato, as câmeras infra-vermelho costumam apresentar maiores dimensões e serem bem mais caras [125].

Tamanho e Resolução de Sensores

O tamanho dos sensores é extremamente importante para o cálculo da magnificação primária e magnificação do sistema, importantes para a escolha do conjunto óptico para a aplicação. A figura A.24 ilustra os diferentes tamanhos de sensores CCD à disposição no mercado.

A resolução provida pelo sensor é outro parâmetro importante a ser identificado, especialmente em aplicações de metrologia, que normalmente necessitam de boa precisão nas medidas. Deve-se fazer distinção entre a resolução “espacial” e a resolução de “nível de intensidade luminosa” do sistema, pois possuem conceitos diferentes. A resolução espacial de um sensor representa a menor porção do objeto em estudo que pode ser distinguida pelo sistema. Ela pode ser especificada de diversas maneiras, como por exemplo, em pares de linha, ou em número de *pixels* do sensor/imagem [122, 124, 152]. Já a resolução de nível de intensidade luminosa (ou de tonalidade) representa a

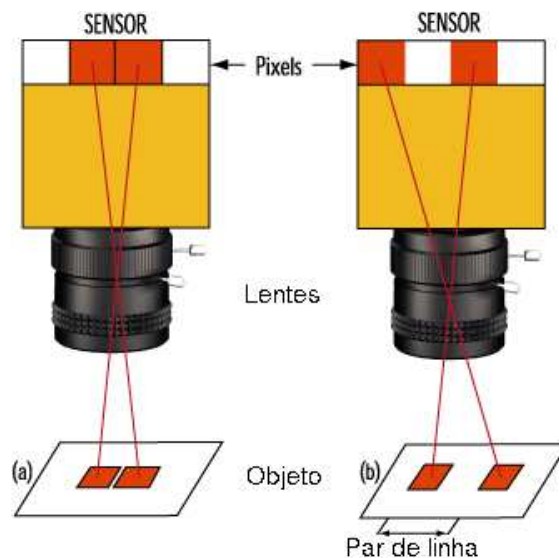


Figura A.25: Resolução de um sensor em termos de pares de linha.

Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

menor diferença em termos de intensidade luminosa (tons de cinza) distinguida pelo sistema, variando conforme o número de *bits* empregados na representação de um *pixel* da imagem. São comuns o emprego de 8, 10 e 12 *bits*, o que resulta em escalas de 256, 1024 e 4096 tonalidades de cinza (ou outra cor) respectivamente, para a representação do nível de intensidade luminosa de um ponto da imagem.

A figura A.25 ilustra uma situação em que dois quadrados são vistos como *pixels* de uma imagem. A intenção é mostrar que para dois objetos serem distinguidos em uma imagem é necessário que exista uma certa quantidade de espaço entre estes. Desta situação define-se a resolução por pares de linhas. Na figura, um par de linha corresponde a um quadrado mais um espaço em branco, ou seja, a quantidade mínima de espaço necessária para distinguir objetos muito próximos na imagem. Por isso, muitas vezes a resolução é referida em termos de uma frequência, pois o inverso desta frequência resulta no espaçamento de resolução mínimo da imagem.

A resolução pode ser ainda especificada em número de *pixels*, pois conhece-se de antemão a quantidade de elementos fotosensíveis que compõem o sensor. Voltando à figura A.25, notamos que um par de linha corresponde exatamente a dois *pixels*. Ou seja, para poder distinguir objetos distintos em uma imagem, é necessário que haja no mínimo um *pixel* de distância entre os mesmos.

Já a figura A.26 ilustra a resolução de nível de intensidade luminosa em uma imagem de apenas 32 tons de cinza (5 *bits* de resolução). Nesta imagem, o valor 0 é a representação da cor preta pura, e o valor 31 representa o branco puro. Níveis intermediários representam os diferentes tons de cinza distinguíveis de acordo com a resolução do nível de intensidade luminoso captado pelo sensor.

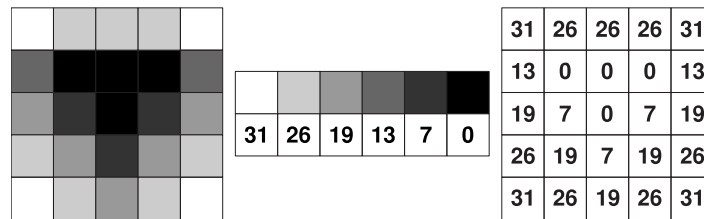


Figura A.26: Representação de resolução de 5 bits para o nível de intensidade luminosa da imagem.

Fonte: Orth [2].

Tipos de Câmeras

Diversos são os tipos de câmeras encontradas no mercado, variando conforme as características do sensor acoplado e a aplicação ao qual será submetida. Uma classificação geral resulta em seis tipos distintos de câmeras: analógicas, digitais, inteligentes, *webcams*, sem fio (*wireless*) e especiais [2, 33]. A figura A.27 ilustra estes tipos de câmeras. Uma descrição sobre cada tipo é dada a seguir:

Câmeras Analógicas: transmitem um sinal de vídeo analógico de saída para um elemento processador (que digitalizará o sinal) ou diretamente para um *display*. Existem variantes com varredura tanto entrelaçada quanto progressiva, assim como monocromáticas ou coloridas. A vantagem do uso deste tipo de câmeras está em seu tamanho reduzido, sua tecnologia bem sedimentada e seu baixo custo. Em compensação, uma placa de aquisição de imagens é necessária para compreender e digitalizar o sinal analógico transmitido antes de repassar a informação ao processador. O sinal de vídeo analógico não permite altas taxas de transferência de dados, nem tão pouco alta resolução das imagens, devido às suas limitações técnicas, sendo ainda susceptível à influência de ruídos eletromagnéticos. São empregadas sempre que a resolução ou a velocidade do sistema não sejam fatores críticos para sucesso da aplicação.

Câmeras Digitais: são semelhantes às câmeras analógicas em suas características básicas, mas produzem um sinal de vídeo de saída já digitalizado para transferência das imagens adquiridas, dispensando o uso de uma placa de aquisição. Várias vantagens podem ser mencionadas, pois o sinal digital é bem mais robusto em relação ao sinal analógico, permitindo altas taxas de transferência de dados, sendo praticamente imune a ruídos eletromagnéticos, suportando aquisição de imagens com alta resolução (*megapixel*) e maiores níveis de contraste de cores ou tons de cinza (de 8 a 16 bits). Estas câmeras são mais propícias para aplicações de maior resolução e velocidade, além de serem mais adequadas às condições agressivas do ambiente industrial.

Câmeras Inteligentes: também apresentam um sinal de saída de vídeo digital, mas diferem das anteriores por apresentarem junto ao sensor óptico um elemento processador capaz de realizar tarefas inteligentes sobre os dados adquiridos (operações de filtragem ou compressão) antes

de transmiti-las ao processador. Desta forma é possível reduzir a quantidade de informações trocadas entre a câmera e o computador, pois boa parte do processamento das imagens é feito na própria câmera, liberando o processador para ocupar-se de outras tarefas do sistema. Em alguns casos, estas câmeras podem até dispensar o uso de um computador, caso apresentem condições para a tomada de decisões, realizar todo o processamento requerido localmente e comunicarem-se com o sistema através de portas de entrada e saída ou por rede. Esta opção auxilia muito na redução dos custos do sistema, assim como suas dimensões físicas.

Webcams: desenvolvidas inicialmente para o ambiente doméstico e de escritório, mas já ganham espaço até mesmo em aplicações industriais. Tratam-se de câmeras coloridas digitais, com varredura progressiva e boas taxas de transferência de dados, já apresentando até mesmo alta resolução de imagens (*megapixel*). São em geral de pequeno tamanho, peso e baixo custo. Possuem um conjunto óptico próprio e fixo, o que dificulta seu uso para aplicações de metrologia. São atualmente bem empregadas em vídeo-conferências, sistemas de vigilância e monitoramento de ambientes, auxílio a deficientes físicos, dentre outros.

Câmeras Sem Fio (*Wireless*): são câmeras digitais que transmitem as informações das imagens por ondas de rádio para um elemento processador. Sua grande vantagem está em dispensar os cabos de transmissão de dados, tornando-se totalmente imune à influência eletromagnética do ambiente. A tendência é utilizar estas câmeras juntamente à computadores de mão (PDAs), os quais assumiriam o papel dos elementos processadores do sistema de visão. Atualmente, com o crescimento desta tecnologia, esta opção já é viável.

Câmeras Especiais: são dispositivos de aquisição de imagens que atuam fora do espectro luminoso visível, não necessariamente fazendo uso de um sensor do tipo CCD ou CMOS, nem assemelhando-se fisicamente ao formato de uma câmera convencional. Porém, ainda operam de modo a adquirir e armazenar uma imagem em uma matriz n-dimensional, como nas câmeras previamente mencionadas. Exemplos destas câmeras especiais são as câmeras infra-vermelho que captam o sinal de calor proveniente de objetos, aparelhos de raios-X e tomografia para geração de imagens médicas, dispositivos que operam com ondas de rádio e raios gamma para obtenção de imagens astronômicas, dentre outros.

A.1.4 Sistema de Transmissão de Dados

O sistema de transmissão de dados está intimamente ligado aos sistemas de aquisição, processamento e de atuação, pois é o elo de comunicação responsável pela de troca de dados do sensor óptico ao elemento processador e informações de controle deste para os demais componentes do sistema.



Figura A.27: *Diferentes tipos de câmeras encontradas no mercado.*

Os sinais trocados pelo sistema de transmissão obedecem padrões analógicos ou digitais [125], e não necessariamente necessitam de cabeamento para que esta troca de informações ocorra. As vantagens e desvantagens do uso de tecnologias analógicas ou digitais quanto ao custo, desempenho, resolução, taxas de transferência e robustez também já foram levantadas anteriormente, sendo aqui tratada apenas a parte que diz respeito aos protocolos de comunicação utilizados.

Sinais Analógicos

Sinais analógicos de vídeo são normalmente sinais elétricos de baixa tensão, que carregam as informações da imagem junto a pulsos de sincronização, para permitir a correta comunicação entre câmera, processador, placa de aquisição e *display*. Estes sinais podem ser “compostos” ou “separados” de acordo com a modulação das informações de intensidade luminosa e de cor no sinal. Os compostos agrupam ambas informações no mesmo sinal, enquanto que os separados distinguem as informações em sinais diferentes, e por isso, possuem melhor resolução e nitidez das informações de cores das imagens [2, 33, 152]. Os padrões analógicos mais comuns foram desenvolvidos pela EIA (*Electronics Industries Association*) e CCIR (*Comité Consultatif International des Radiocommunications*) nos Estados Unidos e Europa, respectivamente [125, 126].

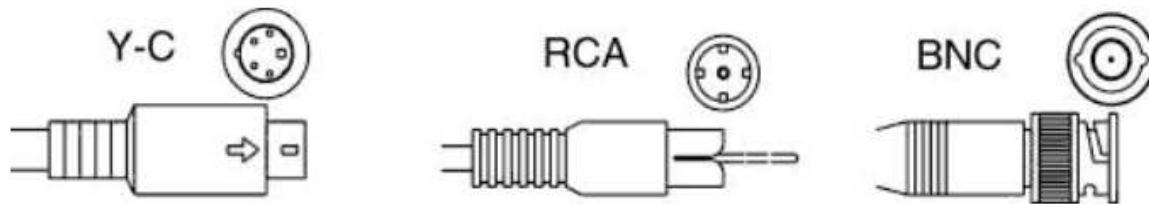


Figura A.28: Diferentes tipos de conectores em cabeamento de vídeo analógico.
 Fonte: Edmund Optics em <http://www.edmundoptics.com/>.

Os padrões RS-170 e RS-170A são padrões de vídeo analógicos da EIA, para transmissão de vídeo monocromático e colorido, respectivamente. O padrão RS-170A é mais conhecido pela sigla NTSC (*National Television System Committee*), tratando-se de um sinal composto. Ambos empregam técnica de varredura entrelaçada e admitem resolução e qualidade nível médio.

Já os padrões PAL (*Phase Alternation Line*) e SECAM (*Sequentiel Couleur à Memoire*) são da CCIR, usados para transmissão de sinais monocromáticos e coloridos, ambos compostos. O PAL é empregado em quase toda a Europa, menos na França e parte do leste europeu, onde predomina o SECAM. O protocolo SECAM admite uma resolução maior das imagens do que o PAL.

Existem ainda os padrões Y-C e RGB, que são padrões de sinais que separam as informações de intensidade luminosa e cor em canais diferentes. O padrão Y-C é também conhecido como S-Video (ou SVHS), sendo que envia seus sinais de intensidade luminosa (luminância – Y) e cor (chroma – C) em 2 cabos distintos. Já o padrão RGB separa as informações de intensidade luminosa e cores em três canais diferentes, um para cada cor (vermelho, verde e azul).

O cabeamento mais utilizado para a transmissão dos dados em padrões analógicos é o cabo coaxial, que possui dois canais distintos: um para a transmissão dos dados e o outro para o sinal de referência (terra). Algumas variações de conectores existem. Para transmissão de sinal de vídeo monocromático composto, utiliza-se, por exemplo, conectores do tipo “BNC” ou “RCA” de duplos pinos. Já os sinais de vídeo coloridos usam o conector “DIN” de quatro pinos para a transmissão do sinal Y-C, onde a informação de intensidade luminosa vai em um canal, a de cor vai em outro, e os dois canais restantes são referências (terra) para cada sinal transmitido. O sinal RGB utiliza o mesmo cabeamento dos sinais monocromáticos, porém, trata-se de um cabo triplo, para transmissão de cada banda de cor em separado. Estes conectores são ilustrados na figura A.28.

Sinais Digitais

Os sinais de vídeo digitais possuem uma série de vantagens sobre os analógicos, sendo próprios para aplicações que requerem maior resolução, maior taxa de transferência de dados, menor taxa de

ruídos, dentre outras. Câmeras digitais realizam a digitalização das imagens adquiridas logo após a sensibilização do sensor e já enviam os dados digitais ao elemento processador [2, 33, 152]. Os padrões de sinais digitais mais utilizados são o TTL, RS422 e o RS644.

O sinal TTL é comum na eletrônica digital, baseado em um valor baixo e constante de voltagem (0 a 5 volts) em relação a um sinal de referência. Por não ser um sinal diferencial, está mais susceptível à influência de ruído eletromagnético e só pode ser empregado em cabos de curto comprimento.

O RS422 é um sinal diferencial que permite maiores taxas de transmissão de dados, sendo o padrão atualmente empregado nas câmeras digitais, sendo menos susceptível a ruídos e podendo ser empregado em cabos com grandes comprimentos.

O RS644 (ou LVDS – *Low Voltage Differential Signaling*) é um pouco mais recente e também trata-se de um sinal diferencial que opera com taxas de transferência de dados superiores aos do RS422 e permite cabeamento mais longo que os empregados no RS422.

Sobre estes padrões de sinais digitais, empregam-se alguns protocolos de comunicação diferentes, de acordo com o tipo de portas/barramento de comunicação utilizados. Os mais conhecidos atualmente são portas serial e paralela, HotLink, CameraLink, USB e IEEE1394.

As portas serial e paralela podem ser utilizadas em diferentes modos de operação, e já foram antigamente utilizadas para a transferência de imagens, porém, apresentam taxas de transferência muito baixas quando comparadas com os demais protocolos já existentes, sendo obsoletas para este tipo de operação, mantendo-se próprias apenas para a realização de operações de entrada e saída (sincronização e acionamento de dispositivos).

Dentre os demais, o HOTLink é o mais antigo, alcançando taxas de transmissão de até 330 Mbits/s, operando junto a uma placa de aquisição e permitindo utilização de cabos de até 100 metros.

O padrão CameraLink usa protocolo de comunicação ChannelLink, e recebeu grande suporte dos grandes fabricantes da área de visão, pois tinham a intenção de torná-lo um padrão, o que foi alcançado no ano de 2000. Baseado na tecnologia LVDS, o CameraLink atinge taxas de transferência de dados de até 255 Mbits/s, opera junto a uma placa de aquisição de imagens e permite utilizar cabos com até 550 metros de comprimento. É possível ainda conectar mais de uma câmera no mesmo cabo, sendo também fornecidos canais de E/S para operações de entrada e saída.

Já o barramento USB permite a troca de dados digitais através de dois protocolos seriais, o USB1.1 e o USB2.0, dispensando o uso de placas de aquisição de imagens. O protocolo USB2.0 baseia-se no seu antecessor, sendo totalmente compatível e estendendo algumas funcionalidades, como a taxa de transferência de dados, que passou de 12 Mbits/s para 480 Mbits/s. Trata-se de um barramento serial onde os dispositivos “escravos” podem ser ligados a qualquer momento (*hotplug*),

permitindo até 127 dispositivos ligados no mesmo barramento de um dispositivo “controlador” (computador) ao mesmo tempo, sendo possível a alimentação destes dispositivos através do próprio cabo USB. Câmeras *webcams* normalmente utilizam estes protocolos, sendo que algumas câmeras industriais já são produzidas com o protocolo USB2.0, para troca de dados em maior velocidade. Porém, ainda não existe um padrão regendo a maneira como as trocas de dados entre câmeras e computadores devem ser feitos através destes protocolos, tendo cada fabricante implementado seu próprio padrão, e deixando a comunidade de visão um tanto ainda insegura para adotar esta tecnologia.

Por último, temos o protocolo IEEE1394, mais conhecido como *FireWire*. Trata-se de um protocolo de comunicação serial, também baseado na tecnologia LVDS, que dispensa o uso de placas de aquisição de imagens, contando atualmente com duas versões: IEEE1394a e IEEE1394b. O padrão “a” atinge taxas de transferência de até 400 Mbits/s através de um cabeamento elétrico. Já o padrão “b” atinge taxas de até 3200 Mbits/s através de cabeamento de fibra óptica. Também permite a conexão dos dispositivos a qualquer momento (*hotplug*), sendo possível conectar até 63 dispositivos em cascata, com alimentação provida pelo cabo FireWire, e até mesmo a criação de redes de computadores pelo seu barramento. A grande vantagem que o padrão IEEE1394 tem sobre o USB atualmente é a existência de uma norma (IIDC – *Instrumentation and Industrial Control Digital Camera*) especificando a maneira como a troca de dados de imagens deve ser efetuada, o que traz mais segurança para o uso de câmeras baseadas neste padrão para aplicações de visão.

A.1.5 Sistema de Processamento de Dados

O sistema de processamento de dados é o coração do sistema de visão, responsável pelo pré- e processamento das informações recebidas de todas as outras partes do sistema, e principalmente pela tomada de decisões de acordo com o estado atual da aplicação. Comunica-se com todos os demais componentes, monitorando e coordenando as atividades gerais e proporcionando ao usuário uma interface de comando, para que este possa interferir no sistema quando desejado. Para realizar estas tarefas é necessário um *hardware* adequado, que cumpra os requisitos da aplicação e principalmente *software* para inserir a parte inteligente, que garante a autonomia do sistema.

O *hardware* do sistema processador trata-se de um computador (um elemento processador e memória) e em muitos casos ainda uma placa de aquisição de imagens, responsável pela digitalização dos dados vindos do sensor óptico. A placa de aquisição pode ser dispensada quando o sinal que provém das câmeras já encontra-se digitalizado. O elemento processador não é o único responsável pelo processamento dos dados provindos das câmeras, sendo comum, desejável e as vezes até mesmo indispensável que a própria placa de aquisição responsabilize-se por parte do processamento,

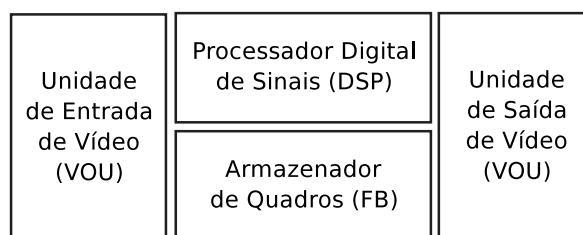


Figura A.29: *Estrutura modular genérica de placas de aquisição de imagens.*
Fonte: Erhardt-Ferron [125].

principalmente em aplicações com curtos requisitos temporais, permitindo assim que o elemento processador concentre esforços em tarefas mais custosas e na tomada de decisões [2, 33, 125].

Seguem maiores detalhes sobre as placas de aquisição. Quanto à parte de *software* do sistema de processamento, esta será tratada na seção A.2, devido a sua importância e extensão de conteúdo.

Placas de Aquisição (*Frame Grabbers*)

Além da aquisição das informações provenientes dos sensores ópticos, as placas de aquisição ainda devem preocupar-se com as seguintes funções: processar as informações provenientes de mais de uma fonte, armazenar as informações recebidas de forma rápida e eficiente, oferecer uma interface gráfica de controle e ser flexível suficiente para atender a uma variada gama de aplicações [125].

De acordo com a aplicação, a placa de aquisição pode incluir um ou mais DSPs, grande área de memória RAM e bibliotecas de *software* sofisticadas junto a uma interface gráfica. Tudo para permitir atender aos requisitos temporais, de resolução e precisão de uma determinada aplicação de visão.

Existem inúmeros fabricantes e tipos de placas de aquisição no mercado. Mas em geral, elas costumam apresentar uma estrutura modular (figura A.29), com quatro componentes principais [125]:

Unidade de Entrada de Vídeo (VIU):

Representa a interface entre o sensor óptico e uma unidade de armazenamento de informações. Algumas placas podem ser conectadas a variadas fontes de aquisição de imagens, como por exemplo, fontes de dados analógicos (câmeras, gravadoras, tomógrafos, microscópios eletrônicos) e fontes de dados digitais (câmeras, CDs, *scanners*). Para atender de forma flexível diversas fontes de aquisição, as VIU devem realizar as seguintes tarefas (figura A.30): multiplexar as diferentes fontes de entrada, sincronizar os dados recebidos com a unidade de armazenamento, digitalizar sinais analógicos através de um conversor ADC, transferir sinais digitais diretamente para a memória, realizar um breve pré-processamento/mapeamento dos dados caso necessário.

Armazenador de Quadros (FB):

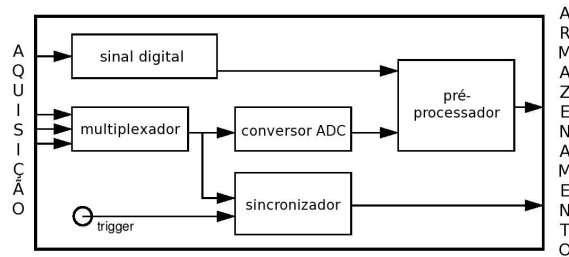


Figura A.30: Estrutura funcional das unidades de entrada de vídeo.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

Os dados coletados provindos do sensor óptico são direcionados pela placa de aquisição a três fontes distintas: sua própria área de armazenamento (FB – *frame buffer*), a memória da placa de vídeo do computador, ou a própria memória RAM do computador. A área de memória RAM da placa de aquisição é muito semelhante à memória RAM do computador, porém, provê uma maneira diferente de endereçamento, que não é contínuo, mas sim matricial. Esta área é administrada pela biblioteca de *software* que acompanha a placa, permitindo que a memória seja acessada por “duas portas”, adquirindo dados das imagens dos sensores, e ao mesmo tempo, projetando estes dados em *displays*.

Processador Digital de Sinais (DSP):

As placas de aquisição podem ter um ou mais processadores internos, próprios para tarefas de pré-processamento das imagens armazenadas em sua área de memória. Operações de filtragem, convoluções e compressão são as mais comuns e auxiliam dando significativo ganho de velocidade e desempenho ao sistema, sendo até essenciais em algumas aplicações de tempo-real. Os DSPs estão normalmente localizados junto às placas de aquisição, porém, em alguns casos, podem estar em placas separadas, comunicando-se via barramento PCI, ou ainda em computadores diferentes, comunicando-se por rede.

Unidade de Saída de Vídeo (VOU):

A unidade de saída de vídeo torna possível a projeção dos dados das imagens armazenadas na memória local da placa para um *display*. A maioria dos *displays* ainda é de tecnologia analógica, sendo necessária a conversão do sinal digital para um sinal analógico apropriado antes da transmissão das informações. Desta forma, as tarefas gerais de uma unidade de saída de vídeo resumem-se em realizar um breve pré-processamento/mapeamento das informações e uma conversão analógico-digital quando necessário, para prover uma saída adequada de vídeo. Esta estrutura pode ser vista na figura A.31.

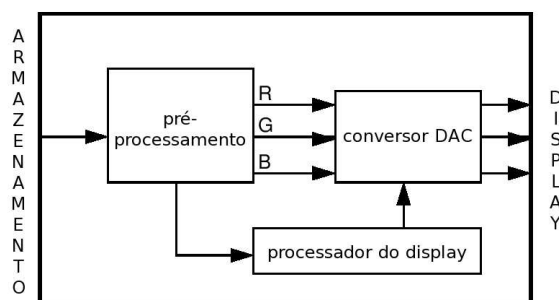


Figura A.31: Estrutura funcional das unidades de saída de vídeo.

Fonte: Erhardt-Ferron [125].

A.1.6 Sistema de Atuação

O sistema de atuação deve fornecer uma resposta ao ambiente em que aplicação está inserida (realimentação), de acordo com as decisões tomadas pelo sistema de processamento, a partir da análise das imagens adquiridas pelo sistema.

A atuação no sistema pode ser oferecida de várias formas, desde uma simples apresentação do estado de variáveis do sistema, impressão de relatórios e gráficos, acionamento de equipamentos, como cilindros pneumáticos e hidráulicos para manipulação de peças e expulsão de refugos, acionamento de alarmes, até a parada automática de um processo em caso de perigo [33]. Desta forma, dispositivos de atuação compreendem desde interfaces de apoio em um computador, como *displays* e impressoras, até cilindros pneumáticos e hidráulicos, motores, alavancas, alarmes, dentre outros.

O projeto de um sistema de atuação é completamente dependente da aplicação em questão, estando fora do escopo deste trabalho abordar sobre as diversas maneiras pelas quais dispositivos de atuação poderiam ser acoplados aos sistemas de visão.

A.1.7 Calibração do Sistema de Visão

A calibração do sistema consiste na tradução das dimensões da menor parte integrante de uma imagem adquirida (um *pixel* da imagem) para uma unidade de medição padrão conhecida.

Ela é importante para todo sistema que se comprometa em devolver valores de medição de objetos como resposta do sistema, pois em geral o usuário deseja receber um valor em uma unidade conhecida, e não apenas uma contagem de *pixels* da imagem. Especialmente as aplicações voltadas à área de metrologia óptica necessitam do valor de calibração do sistema para operarem corretamente.

Para sistemas que trabalham com imagens de duas dimensões é comum a utilização de imagens de tabuleiros de xadrez de dimensões conhecidas e com boa resolução para realizar a calibração. A seção 6.1.7 apresenta uma solução que utiliza este princípio.

A.2 Componentes de *Software* de um Sistema de Visão

A parte de *software* do sistema de processamento de dados é responsável principalmente pela inteligência das tarefas atribuídas ao sistema. Por *software* é possível controlar qualquer parte de *hardware* do sistema de visão, desde acionar a iluminação e a câmera no instante desejado, ajustar o foco e magnificação de lentes motorizadas, requisitar um pré-processamento específico das placas de aquisição, analisar, separar e classificar características importantes encontradas nas imagens, até acionar dispositivos de atuação no sistema.

Um bom projeto de *software* para sistemas de visão e processamento de imagens deve ter um código limpo, claro e eficiente em tempo de execução para suprir os requisitos temporais das aplicações. Deve realizar acesso ao *hardware* de baixo nível do sistema e tornar a solução flexível para que possa ser transportada para diferentes plataformas operacionais.

Nesta seção apresenta-se um embasamento dos principais algoritmos e técnicas empregadas no *software* de processamento de imagens. O grupo S2i possui uma biblioteca de *software* própria (S2iLIB), que implementa grande parte das funcionalidades descritas nesta seção. Mais informações sobre esta biblioteca podem ser vistas no apêndice B.

A.2.1 Propriedades das Imagens

As imagens digitais que são armazenadas na memória de um computador podem ser consideradas funções bi-dimensionais da forma $f(x,y)$, onde o valor de amplitude de f na coordenada espacial (x,y) da imagem é um valor inteiro não-negativo, representando o nível de intensidade luminosa proveniente da cena observada e registrado no sensor óptico naquele ponto [123, 147]. As imagens geradas a partir de um processo físico, possuem valores de f dentro de uma faixa finita e proporcional à intensidade luminosa incidente no sensor:

$$0 < f(x,y) < \infty \quad (\text{A.7})$$

sendo que f pode ser interpretada como uma combinação de duas componentes: (1) a quantidade de luz proveniente da fonte luminosa da cena e (2) a quantidade de luz refletida pelos objetos da cena, chamados de iluminação – $i(x,y)$ – e reflectância – $r(x,y)$, respectivamente:

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (\text{A.8})$$

onde

$$0 < i(x,y) < \infty \quad (\text{A.9})$$

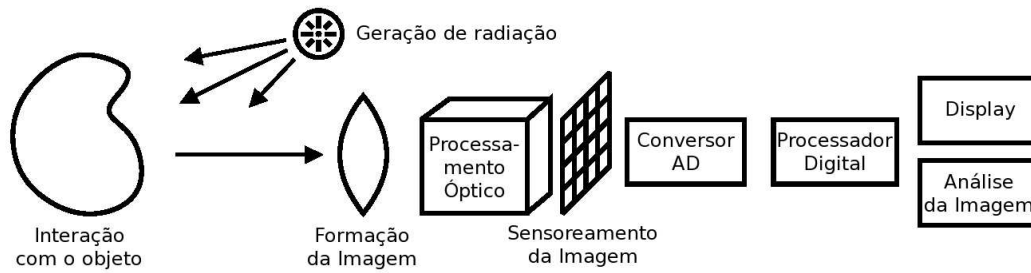


Figura A.32: Etapas de formação das imagens em um sistema de visão.

Fonte: Jähne et al. [126].

e

$$0 < r(x, y) < 1. \quad (\text{A.10})$$

A equação A.10 indica que a reflectância é sempre limitada à total absorção da luz pelos objetos ($r = 0$) ou à total reflexão dos raios luminosos ($r = 1$). A natureza de $i(x, y)$ depende da fonte luminosa, enquanto $r(x, y)$ depende das características superficiais dos objetos observados [123, 124].

Toda imagem captada pelo sensor óptico passa por um estágio de digitalização do sinal, para que possa ser compreendida pelo elemento processador do sistema (figura A.32). Deste processo de digitalização da imagem, destacam-se duas tarefas muito importantes realizadas pelo conversor analógico-digital: a **amostragem** e a **quantização** do sinal [123, 126, 147].

A amostragem consiste em pegar amostras de pontos da informação contínua e analógica do sinal em distâncias equidistantes ao longo dos eixos vertical e horizontal da imagem, enquanto que a quantização extrai os valores de intensidade luminosa identificados nos pontos amostrados. O processo de amostragem e quantização de uma imagem está intimamente ligado à resolução da imagem produzida. Nota-se que quanto maior o número de pontos amostrados na imagem, maior será a resolução espacial desta. Da mesma forma, quanto maior o número de níveis de intensidade luminosa considerados na imagem para representar a tonalidade de um ponto amostrado, maior será a resolução de tonalidades da imagem. A figura A.33 ilustra a amostragem e quantização de um sinal analógico para transformá-lo em um sinal digital.

Desta forma, fica fácil enxergar a organização de uma imagem de acordo com uma estrutura matricial, onde o número de elementos (pontos ou *pixels*) das linhas e colunas da matriz (imagem) é determinado pela amostragem do sinal, e o valor numérico dos elementos é extraído da quantização da intensidade luminosa incidente em cada ponto amostrado da matriz no sensor óptico [123, 126, 147].

Uma imagem com M linhas e N colunas possui em seu ponto de origem um valor de intensidade luminosa correspondente a $f(0, 0)$ e no seu ponto final $f(M - 1, N - 1)$. Os demais pontos

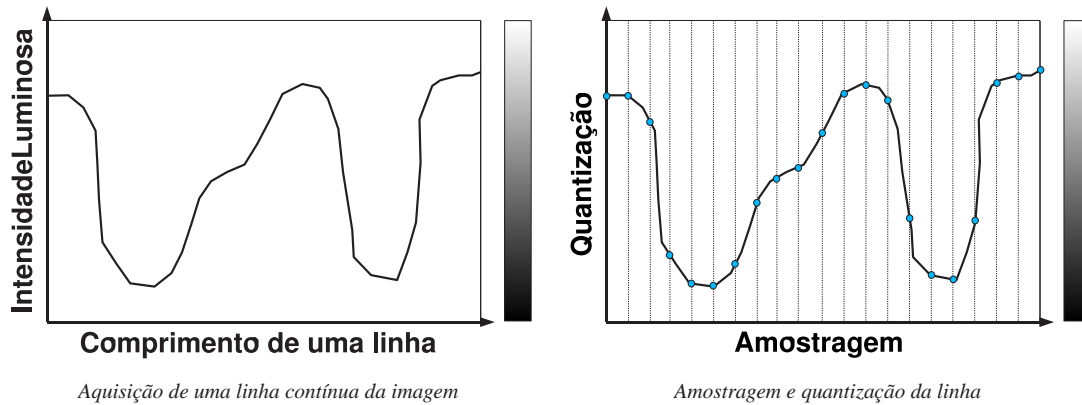


Figura A.33: Tarefas de amostragem e quantização dos dados analógicos de uma linha da imagem.

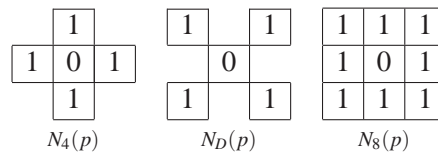


Figura A.34: Vizinhanças $N_4(p)$, $N_D(p)$ e $N_8(p)$ do pixel $p = 0$.

intermediários estão dispostos segundo a estrutura matricial da equação A.11:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Nota-se que diversas operações matemáticas aplicadas a matrizes podem também ser utilizadas na área de processamento de imagens. Para prosseguir com um estudo mais aprofundado sobre estas operações, é desejável ainda introduzir algumas propriedades e relacionamentos entre os elementos ou *pixels* internos de uma imagem: vizinhança, adjacência, conectividade, região e limite [123].

Um *pixel* p nas coordenadas (x,y) de uma imagem possui 4 vizinhos horizontais e verticais nas seguintes coordenadas: $(x+1,y)$, $(x-1,y)$, $(x,y+1)$, $(x,y-1)$. O conjunto destes *pixels* vizinhos denota-se $N_4(p)$. Neste conjunto, todos os *pixels* vizinhos de p encontram-se a uma unidade de distância de (x,y) . Já os outros 4 vizinhos diagonais de p encontram-se nas coordenadas: $(x+1,y+1)$, $(x+1,y-1)$, $(x-1,y+1)$, $(x-1,y-1)$, sendo que o conjunto destes *pixels* vizinhos denota-se $N_D(p)$. Este conjunto, juntamente com $N_4(p)$ forma um novo conjunto denominado $N_8(p)$, que engloba todos os *pixels* vizinhos de p . Há a possibilidade de algum destes *pixels* vizinhos permanecerem fora dos limites da imagem, caso p encontre-se em uma das bordas. A figura A.34 ilustra as vizinhanças (representadas por “1”) $N_4(p)$, $N_D(p)$ e $N_8(p)$ para um dado *pixel* $p = 0$.

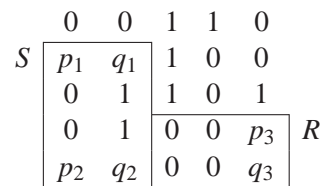


Figura A.35: Ilustração de caminhos conectados e regiões em uma imagem binária.

A partir do conceito de vizinhança, define-se a adjacência. Diz-se que o *pixel* q é adjacente de p quando q encontra-se na vizinhança de p e satisfaz ainda uma condição de semelhança ou afinidade de intensidade luminosa. Ou seja, além de ser vizinho, deve possuir um valor de intensidade dentro de uma faixa específica de tons, a definir.

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

Na figura A.35 podemos avaliar os conceitos acima definidos. Nota-se que para o conjunto S , existe uma conexão entre os pontos p_1 e p_2 caso ambos tenham valor 0, assim como para q_1 e q_2 caso ambos tenham valor 1. Já para o conjunto R , podemos declará-lo como uma região caso os pontos p_3 e q_3 tenham valor 0, concretizando a conexão completa de todos os pontos do conjunto.

Mais informações sobre propriedades das imagens em [121, 123, 124, 129, 146, 147, 155, 156, 157].

A.2.2 Pré-Processamento de Imagens (Realce de Características)

Operações de pré-processamento são aplicadas em uma imagem para alcançar como resultado outra imagem com características realçadas, mais adequadas para prosseguir com as demais etapas de processamentos necessárias [123]. Existem inúmeras técnicas de realce de imagens. Dentre as mais conhecidas estão as de filtragem espacial e frequencial, conforme será visto nas sub-seções seguintes.

Estas técnicas de pré-processamento enquadram-se entre as técnicas de baixo nível (conforme levantado na seção 4.1), recebendo imagens na entrada e resultando em imagens também na saída. O estudo destas técnicas é fundamental inclusive para a compreensão de muitas outras técnicas de processamento de imagens, que baseiam-se nestes conceitos para geração de novas soluções no processamento das imagens. As informações contidas nesta sub-seção baseiam-se principalmente em

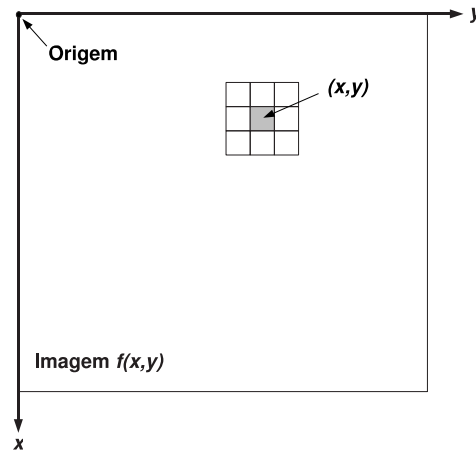


Figura A.36: Ilustração do operador T sobre a vizinhança de um ponto da imagem.
Fonte: Gonzalez and Woods [123].

[123] e podem ser encontradas mais aprofundadas em [121, 122, 124, 128, 129, 145, 146, 147, 155, 157, 158, 159].

Pré-Processamento no Domínio Espacial

O processamento no domínio espacial refere-se a procedimentos que operam diretamente sobre os *pixels* de uma imagem, na forma como estão arrançados espacialmente. Uma operação de processamento espacial é denotada da seguinte forma:

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (\text{A.12})$$

onde $f(x,y)$ representa a imagem de entrada, $g(x,y)$ representa a imagem de saída realçada, e T é um operador em f , definido para atuar sobre a vizinhança do ponto (x,y) . A ilustração deste procedimento pode ser vista na figura A.36.

O operador T pode atuar em diferentes tamanhos de vizinhança no ponto (x,y) , porém, o mais comum é que esta apresente um formato circular, quadrangular ou retangular, centrado sobre o ponto (x,y) . Típicos arranjos de operadores quadrangulares podem ser vistos na figura A.37.

Da figura vemos que a menor e mais simples vizinhança em torno do ponto (x,y) é o próprio ponto (operador 1×1). Quando T tem este tamanho de vizinhança ele é chamado de “função de transformação de intensidade”, pois opera diretamente no valor de intensidade do ponto (x,y) da imagem f , gerando um novo valor de intensidade para o mesmo ponto na imagem g . Caso este operador passasse por toda a área da imagem f somando a cada ponto um certo nível de intensidade luminosa, geraria uma imagem g mais clara. Estas operações de vizinhança unitária são também

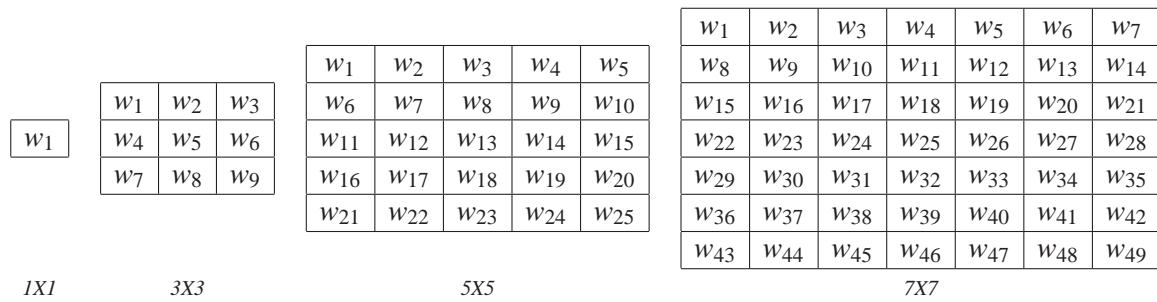


Figura A.37: Típicos arranjos de operadores para processamento espacial.

conhecidas como processamento pontual.

Já as demais configurações de operadores (3X3, 5X5, 7X7) são utilizadas especialmente em operações de filtragem de imagens, e são mais conhecidas na literatura de processamento de imagens como máscaras, *kernels* ou filtros propriamente ditos. Uma operação de filtragem linear para uma máscara de tamanho 3X3 poderia ser definida da seguinte forma:

$$R = w(-1, -1)f(x - 1, y - 1) + w(-1, 0)f(x - 1, y) + \dots + w(0, 0)f(x, y) + \dots + w(1, 0)f(x + 1, y) + w(1, 1)f(x + 1, y + 1),$$

onde R é o resultado da operação linear aplicada sobre o ponto (x, y) e sua vizinhança na imagem f , gerando o valor de intensidade luminosa para apenas um ponto (de coordenadas (x, y)) na imagem g . A operação é ilustrada na figura A.38. Desta forma, cada ponto da imagem g é gerado levando-se em conta uma operação linear aplicada a nove pontos da imagem f . A nova e completa imagem g é formada ao aplicar-se o operador acima citado sobre toda a região da imagem f , ou seja, movendo a máscara de filtragem sobre os pontos da imagem, de maneira semelhante ao que ocorre em operações de convolução de sinais unidimensionais.

Das operações de processamento pontual ou por máscara de convolução, surgem uma série de operações básicas, lógicas, aritméticas e de filtragem para aplicação em domínio espacial nas imagens. Dentre as operações básicas, baseando-se em operações de processamento pontual, as mais comumente empregadas podem ser vistas na figura A.39, seguindo uma sucinta descrição:

Identidade: nada mais do que uma cópia idêntica, ponto a ponto da imagem original.

Negativa: a negativa de uma imagem f é obtida ao inverter-se a intensidade luminosa de todos os pontos da imagem, resultando em uma nova imagem g com aspecto semelhante a um negativo fotográfico. Ou seja, para uma imagem f com uma faixa de tons de cinza variando de $[0, L - 1]$, a negativa desta imagem é obtida pela expressão: $g(x, y) = (L - 1) - f(x, y)$. Esta operação é adequada para destacar pequenos detalhes brancos ou cinza sobre grandes áreas negras.

Logarítmica: esta operação aplica uma transformação logarítmica à cada ponto de uma imagem f ,

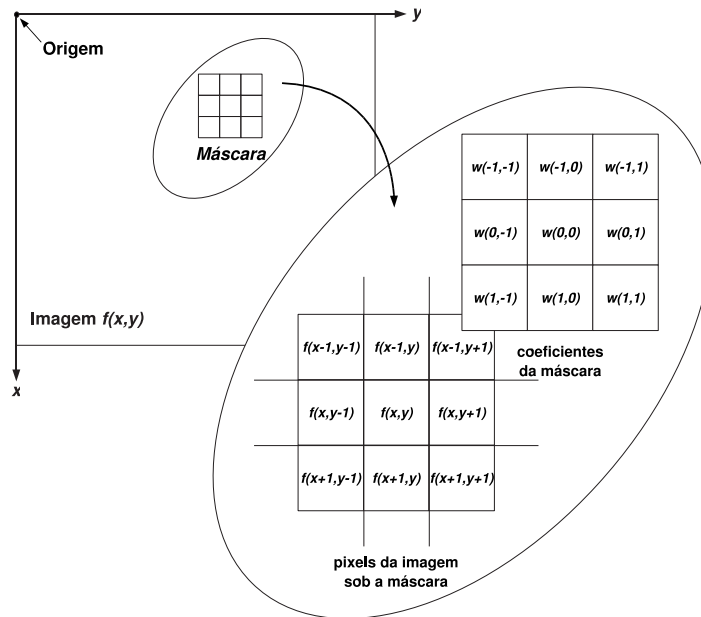


Figura A.38: Operador 3X3 aplicado sobre a vizinhança de um ponto da imagem.

Fonte: Gonzalez and Woods [123].

conforme a expressão: $g(x,y) = c \log(1 + f(x,y))$, onde c é uma constante a ser definida. Esta operação mapeia uma faixa de baixos valores de intensidade luminosa para faixas maiores, tornando visíveis partes da imagem que encontravam-se muito escuras.

Potência: esta operação aplica uma transformação de potência à cada ponto de uma imagem f , conforme a expressão: $g(x,y) = c(f(x,y) + \epsilon)^\gamma$, onde c é uma constante a definir, ϵ é um *offset* e γ é a potência a qual se deseja elevar o nível de intensidade luminosa de $f(x,y)$. Funciona de forma semelhante à logarítmica, realçando pontos de baixa intensidade luminosa.

Quanto às operações lógicas e aritméticas, alguns exemplos podem ser vistos na figura A.40, tendo como principais operações:

Aritméticas: compreendem a soma, subtração, multiplicação e divisão entre *pixels* de duas imagens, resultando em uma nova imagem. Estas operações evidentemente sofrem uma limitação pela faixa de valores de intensidade luminosa possíveis de serem assumidos pelos *pixels* da imagem, saturando nos limites inferior (nulo) e superior (comumente 255) sempre que ultrapassarem estes limites de resolução. Estas operações são comumente usadas para ampliar o nível de intensidade luminosa de imagens, encontrar diferenças entre duas imagens semelhantes, eliminar/incluir ruídos e gerar novas imagens a partir de uma média de outras imagens.

Lógicas: compreendem as três operações lógicas básicas *E*, *OU* e *NAO*, sendo possível a partir destas construir suas derivadas. As operações *E* e *OU* operam sobre duas imagens, enquanto que a

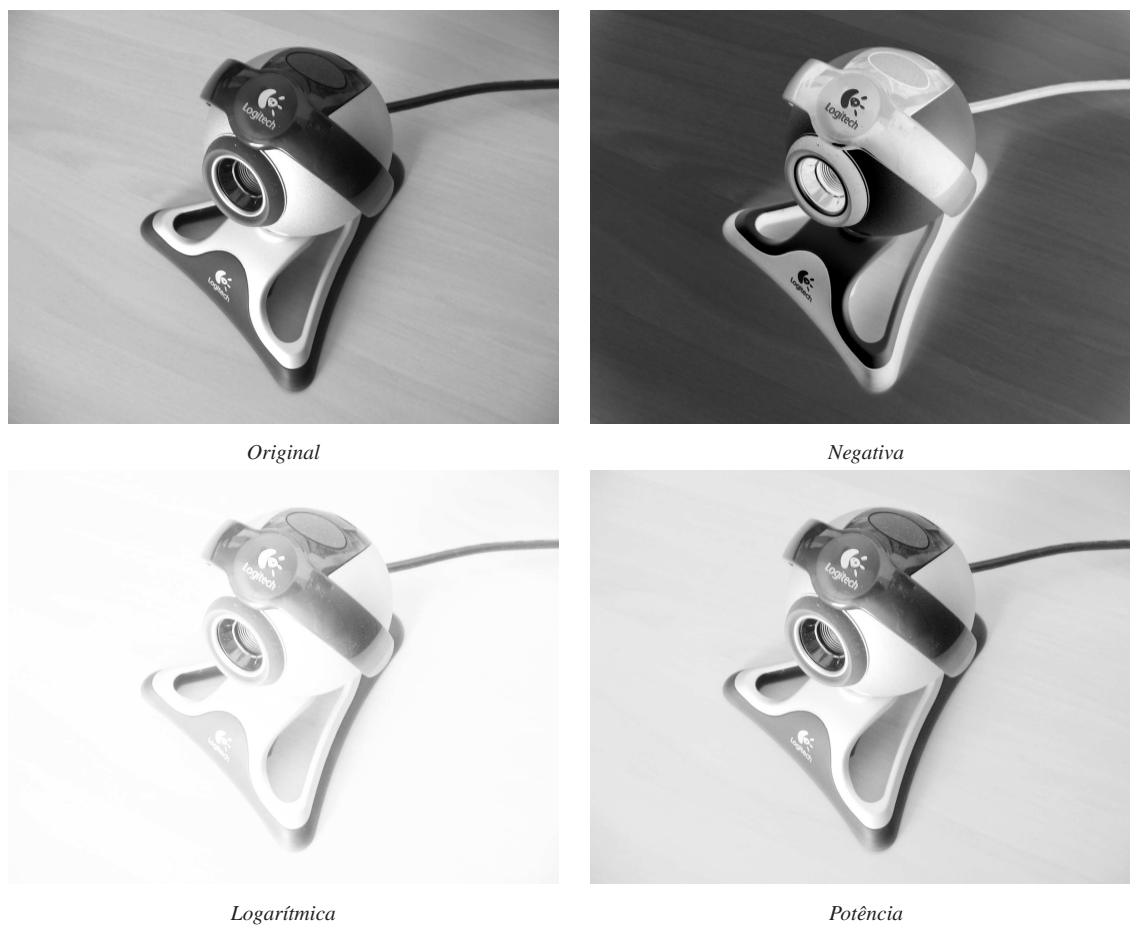


Figura A.39: Ilustração de operações básicas de pré-processamento.

NAO opera sobre apenas uma. São usadas principalmente para selecionar ou destacar áreas específicas das imagens (regiões de interesse – ROIs), além de serem muito importantes para as operações de morfologia, vistas na sub-seção A.2.3.

Por último, temos as mais importantes operações de pré-processamento no domínio espacial, as operações de filtragem, que baseiam-se nos princípios de convolução de máscaras pré-configuradas para realçar características específicas das imagens. As operações de filtragem dividem-se entre operações de suavização (*smoothing*) e enfatização (*sharpening*). Em geral operações de suavização procuram atenuar o nível de ruído nas imagens, removendo pequenos detalhes e suavizando contornos. Já as operações de enfatização procuram destacar detalhes da imagem, principalmente cantos e arestas. As principais técnicas utilizadas são ilustradas na figura A.41 e descritas a seguir:

Suavização Linear: estes filtros são aplicados para gerar novas imagens com aspecto mais suave, pois calculam o novo valor de intensidade luminosas de um dado ponto a partir de uma média linear dos valores de intensidade dos pontos vizinhos, de acordo com o tamanho da máscara de

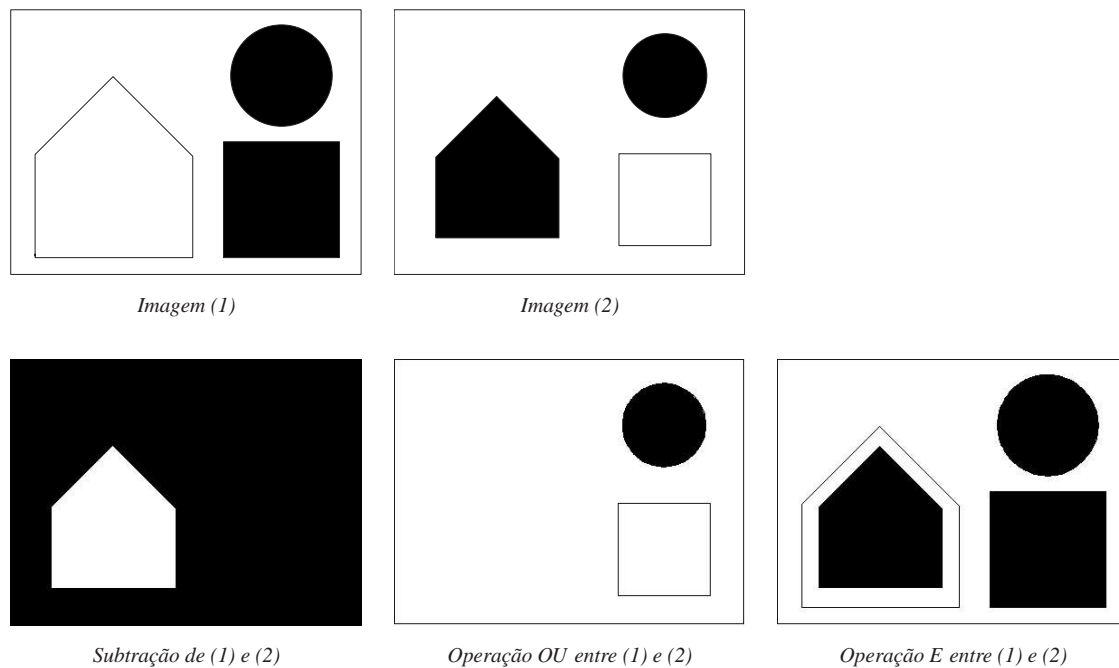


Figura A.40: Ilustração de operações lógicas e aritméticas de pré-processamento.

convolução usada. Numa configuração de máscara 3×3 , com todos os vizinhos sendo levados em conta da mesma maneira, a operação se resumiria na seguinte expressão: $g(x,y) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 f_i$. Porém, é possível adotar uma máscara que priorize ou conceda maior peso para vizinhos específicos, buscando um comportamento mais adequado para a aplicação.

Estatísticos Não-Lineares: estes filtros são aplicados para gerar novas imagens com aspecto mais limpo e suave, especialmente em casos para supressão de modelos de ruídos comportados. A resposta destes filtros não-lineares para um dado ponto na imagem é baseada na análise estatística do valor de intensidade luminosa de seus pontos vizinhos, que são ordenados conforme uma regra específica para posteriormente substituir o valor de intensidade do ponto central de acordo com a classificação da ordenação. Como exemplo, temos o filtro “mediano”, que analisa o valor de intensidade dos pontos vizinhos e retorna o valor daquele que está mais próximo da média dos valores encontrados. Existem ainda o filtro “máximo” e o “mínimo”, que retornam respectivamente, os valores máximo e mínimo dos pontos encontrados na vizinhança.

Gradiente: estes filtros baseiam-se nas definições da primeira derivada de sinais uni-dimensionais, que realçam as bruscas variações encontradas nestes sinais. Sendo as imagens nada mais do que um sinal bi-dimensionail, utiliza-se o conceito de gradiente para aplicar os a derivação de primeira ordem à toda a área da imagem. Desta forma, a derivação dos sinais de intensidade luminosa da imagem resultam no realce das regiões de transição abrupta desta intensidade, ou seja, um destaque especial para os cantos e bordas de objetos na imagem, eliminando muito da

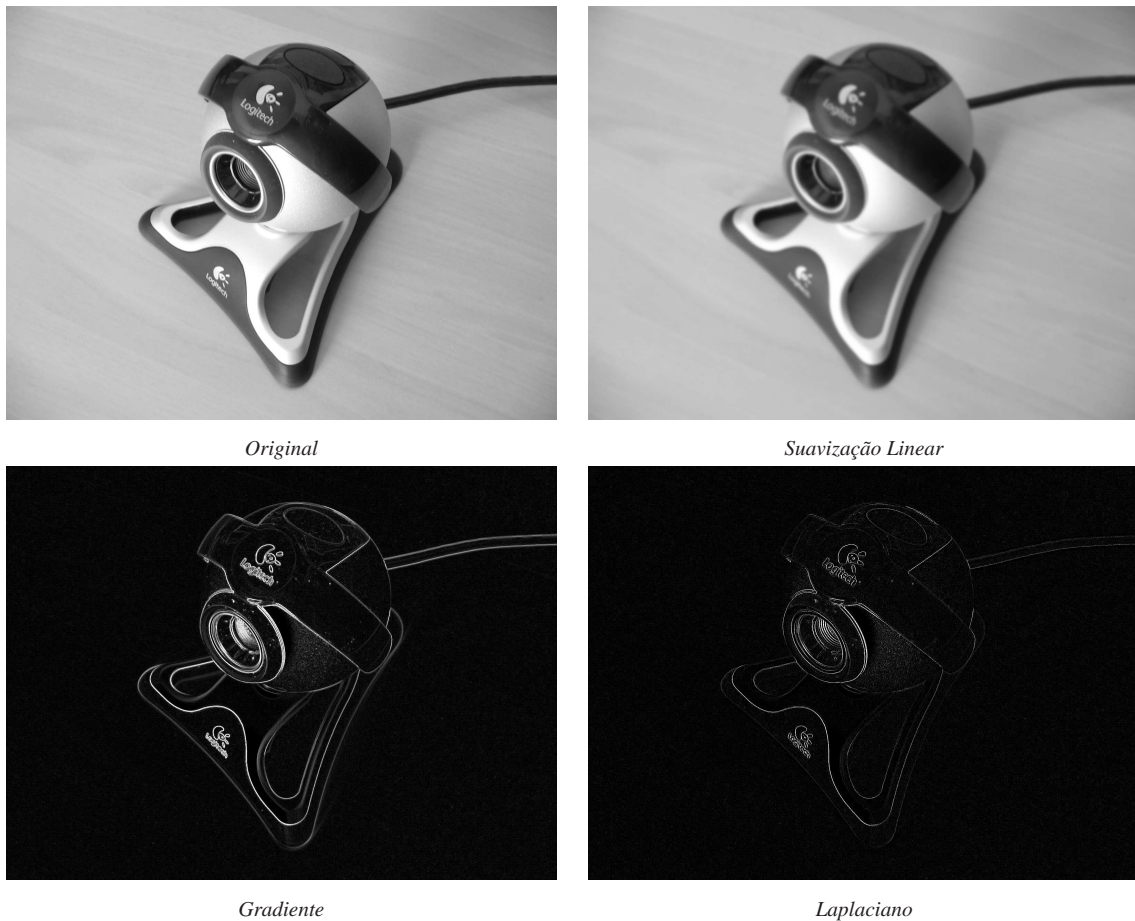


Figura A.41: Ilustração de operações de filtragem de suavização e ênfase.

informação constante na imagem.

Laplaciano: similar aos filtros gradientes, estes também baseiam-se na aplicação de derivadas às imagens para realçar cantos e arestas de objetos. Porém estes filtros aplicam a segunda derivada sobre as imagens, ao invés da primeira.

Pré-Processamento Estatístico

As técnicas de processamento estatístico formam um subconjunto distinto das técnicas de processamento espacial, baseando-se na análise de informações estatísticas da imagem. Dentre estas técnicas, as mais conhecidas são as de manipulação dos histogramas das imagens.

Um histograma é uma forma distinta de se enxergar os dados de uma imagem. Trata-se de um gráfico com dois eixos, um horizontal, cobrindo todos os níveis de intensidade luminosa possíveis para a representação do valor de um *pixel* da imagem, e outro vertical, representando o número de *pixels* com um nível de intensidade luminosa específico na imagem. O histograma pode ser avaliado

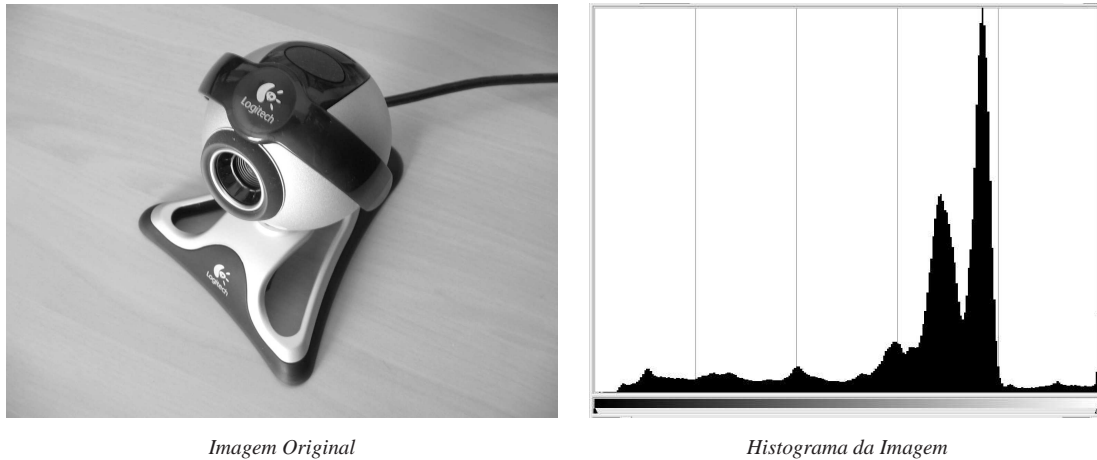


Figura A.42: Representação de uma imagem através de seu histograma.

a partir da expressão: $H(r_k) = n_k$, onde r_k é o k -ésimo nível de intensidade luminosa possível, de uma faixa que varia entre $[0, L - 1]$, e n_k é o número de *pixels* contendo nível de intensidade luminosa igual a r_k na imagem. A figura A.42 ilustra uma imagem e o seu respectivo histograma.

Também é comum encontrarmos um histograma em sua forma normalizada, ou seja, seu eixo vertical sofre pequena alteração (divisão do número de *pixels* das colunas do histograma pelo número de *pixels* total da imagem), resultando na probabilidade de ocorrência de cada nível de intensidade luminosa na imagem: $P(r_k) = \frac{n_k}{n}$, onde $P(r_k)$ é a probabilidade com que o nível de intensidade luminosa r_k aparece na imagem.

Histogramas são ferramentas poderosas, de fácil e rápido cálculo, e sua manipulação gera um vasta gama de efeitos desejáveis para operações de realce, segmentação e compressão de imagens. Uma das maiores utilidades de um histograma é o realce de imagens a partir do sua equalização. A equalização consiste numa transformação da imagem a partir da redistribuição dos níveis de intensidade luminosa de seus pontos, de forma a atingir uma distribuição mais uniforme de uma faixa ou de toda a faixa de intensidades luminosa do histograma da imagem (figura A.43).

Desta forma, imagens escuras de níveis de intensidade luminosa predominantemente baixos (comprimidos na parte esquerda do histograma), teriam estes valores de intensidade redistribuídos, de gerando um histograma mais uniforme, ocupando maior parte da vasta faixa de níveis de intensidade luminosa. Isto resulta em uma imagem mais clara e nítida, com maior contraste entre os objetos e o fundo da imagem. O mesmo princípio pode ser aplicado à imagens muito claras, buscando realçar características importantes da imagem para permitir futuros processamentos.

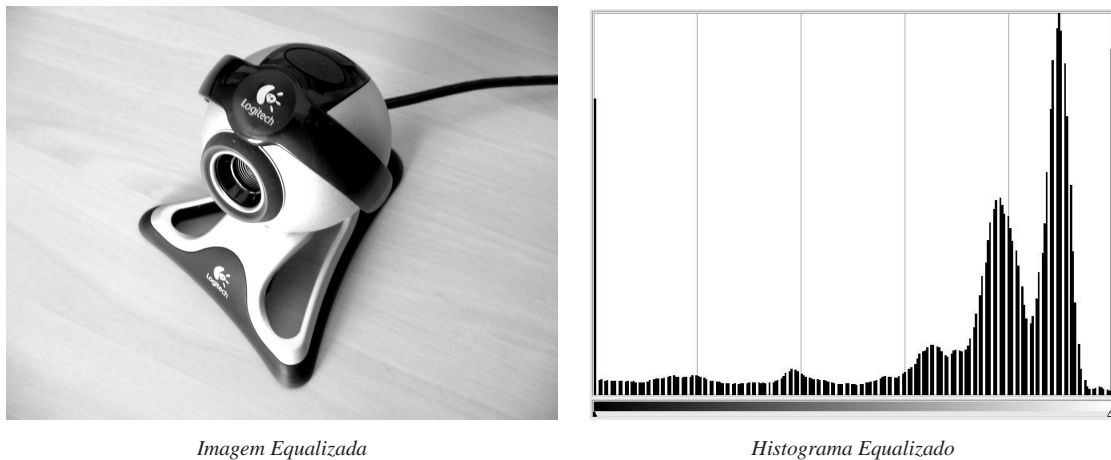


Figura A.43: Ilustração do processo de equalização do histograma de uma imagem.

Pré-Processamento no Domínio Freqüencial

O processamento no domínio freqüencial é semelhante ao feito no domínio espacial, porém os operadores utilizados nas tarefas de filtragem mudam significativamente, tendo em vista que agora a busca pelas características da imagem se dá no plano freqüencial, que é na verdade uma nova estrutura de representação das informações da imagem original. O que antes era analisado no domínio espacial de $f(x, y)$, agora é analisado em $F(u, v)$, que é a representação da imagem f no domínio freqüencial.

A ferramenta utilizada para mapear os dados de f do domínio espacial para F no domínio freqüencial é a Transformada Discreta de Fourier (DFT). Esta ferramenta mapeia as características do sinal no tempo (espaço) para um somatório de senos e cossenos com seus respectivos pesos, de forma a traduzir perfeitamente o sinal para o domínio da freqüência. Para retornar ao domínio do tempo, sem perdas de informações, basta aplicar a transformada inversa ao sinal freqüencial. A teoria matemática por trás desta ferramenta é extensa e possui rica literatura, não fazendo parte do escopo deste trabalho aprofundar-se em maiores detalhes de seu funcionamento. Maiores detalhes sobre operações em domínios freqüenciais pode ser encontrada em [123, 160, 161, 162].

O processamento no domínio freqüencial costuma ser mais custoso e demorado, devido ao número maior de etapas de processamento a serem cumpridas, e pela natureza das máscaras de convolução freqüenciais, que são bem maiores do que as utilizadas no processamento espacial. O processamento de uma imagem no domínio da freqüência, segue os seguintes passos (figura A.44) [123]:

1. Multiplicar a imagem no domínio espacial por um fator $(-1)^{x+y}$, para auxiliar o cálculo posterior da DFT (pois centraliza as informações da transformada na imagem).
2. Calcular a DFT da imagem f propriamente dita, gerando $F(u, v)$.

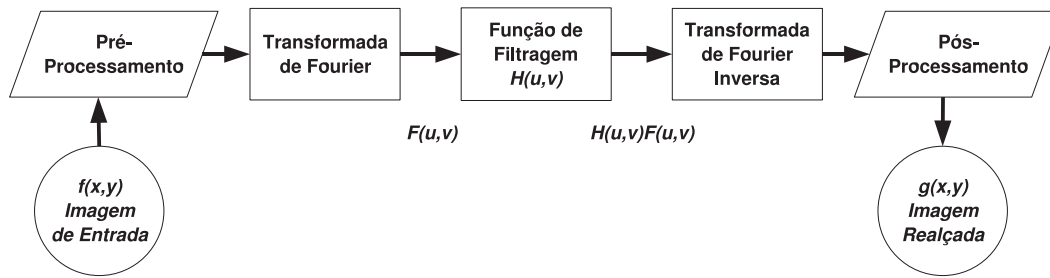


Figura A.44: Passos realizados no processamento frequencial de imagens.

Fonte: Gonzalez and Woods [123].

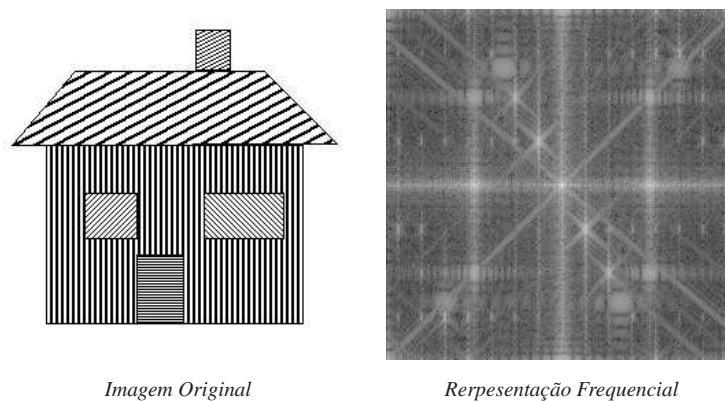


Figura A.45: Representação de uma imagem no domínio da frequência.

Fonte: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/freqfilt.htm>

3. Aplicar uma função de filtragem $H(u, v)$ sobre a imagem F , de acordo com as características que se deseja realçar na imagem, gerando uma nova imagem: $G(u, v) = H(u, v)F(u, v)$.
4. Calcular a DFT inversa do resultado da filtragem (G) realizado no passo 3, trazendo a imagem de volta ao domínio espacial com as modificações da filtragem.
5. Extrair apenas a parte real do resultado obtido da DFT inversa no passo 4.
6. Multiplicar esta parte real novamente por $(-1)^{x+y}$ para rearranjar a imagem corretamente no domínio espacial e possibilitar a visualização dos resultados.

As imagens F geradas no domínio frequencial pouco ou nada tem a ver no aspecto visual com suas imagens f originais no domínio espacial, conforme visto na figura A.45.

Existem dois tipos principais de filtros frequenciais comumente empregados: os filtros passa-baixa (ou de suavização) e os filtros passa-alta (ou de ênfase).

Passa-Baixa: análogos aos filtros de suavização no domínio espacial, porém com uma configuração da máscara de convolução diferente, que permite realizar as mesmas operações de suavização de cantos e arestas e redução de ruídos no domínio frequencial.

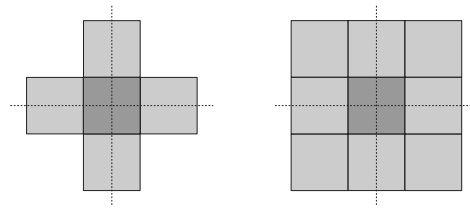


Figura A.46: Principais formas de elementos estruturantes na morfologia matemática.

Passa-Alta: análogos aos filtros de ênfase do domínio espacial, porém com uma configuração da máscara de convolução diferente, que permite realizar as mesmas operações de realce de cantos e arestas no domínio frequencial.

A.2.3 Morfologia Matemática

A morfologia é uma área da biologia que estuda a forma e estrutura dos animais e das plantas. O mesmo termo é usado aqui para caracterizar uma área do processamento de imagens, porém, costuma-se usar o termo completo “morfologia matemática” para fazer distinção entre as diferentes áreas. Analogamente diz-se que a morfologia matemática é uma ferramenta para extrair características importantes da estrutura de alguns componentes da imagem [123]. Desta maneira, a morfologia matemática representa um elo entre as operações de processamento de baixo e médio nível (conforme seção 4.1), pois geram tanto resultados em forma de imagens como atributos e características específicas de alguns de seus objetos.

A morfologia matemática baseia-se fortemente na teoria de conjuntos e em operações lógicas para definir uma vasta gama de ferramentas úteis ao processamento de imagens, principalmente imagens binárias, mas estendendo-se também (com algumas adaptações) às imagens de tons de cinza e coloridas. Está fora do escopo deste trabalho apresentar base em teoria dos conjuntos e operações lógicas, que podem ser encontradas em outra literatura [123]. O que será apresentado aqui é apenas uma descrição e exemplificação dos principais operadores morfológicos aplicados ao processamento de imagens, havendo maiores informações em [121, 122, 123, 128, 129, 145, 146, 147, 157, 158, 159].

De um modo geral, todos os operadores morfológicos baseiam-se no conceito da aplicação de um elemento estruturante percorrendo sobre uma imagem, de modo análogo ao que ocorre com as máscaras de convolução nas operações de filtragem. As principais estruturas de elementos estruturantes podem ser vistas na figura A.46, que é similar às configurações de vizinhança $N_4(p)$ e $N_8(p)$ vistas anteriormente na parte de pré-processamento no domínio espacial.

Segue uma descrição das operações básicas de morfologia matemática:

Dilatação: é a aplicação de um elemento estruturante de forma concêntrica sobre um conjunto definido de pontos (brancos ou pretos) em uma imagem, de maneira que o elemento estruturante adicione informação sobre a vizinhança destes pontos. Ou seja, pode-se imaginar que o elemento estruturante desliza sobre um conjunto de pontos dilatando sua vizinhança numa proporção que varia conforme as dimensões do elemento estruturante. Esta operação é utilizada principalmente para preencher intervalos e lacunas indesejáveis na imagem.

Erosão: é o inverso da dilatação. A aplicação do elemento estruturante ocorre analogamente à operação anterior, porém, ao invés de dilatar a vizinhança do ponto percorrido inserindo informação, o elemento retira informação (gerando erosão nas áreas percorridas). Esta operação é utilizada principalmente para eliminar detalhes irrelevantes, como ruídos, e abrir intervalos ou lacunas em regiões de conexão indesejada.

Abertura: é derivada das operações de dilatação e erosão. O operador de abertura aplica uma erosão seguida de uma de dilatação na imagem. Esta sequência de operações visa eliminar pequenos ruídos na imagem e abrir lacunas em regiões de fraca conexão entre objetos, através da erosão, e posteriormente tenta restaurar as dimensões reais de objetos da imagem através da dilatação. Os ruídos e fracas conexões eliminados com a erosão não retornam à imagem após a dilatação.

Fechamento: também derivada das operações de dilatação e erosão, trata-se da operação inversa da abertura, aplicando primeiramente uma dilatação seguida de uma erosão. Esta sequência de operações visa restaurar conexões fracas entre objetos da imagem.

A figura A.47 ilustra o princípio de funcionamento destes operadores morfológicos básicos aplicados em uma imagem binária. A partir destas ferramentas básicas, outros algoritmos morfológicos são desenvolvidos, como por exemplo, algoritmos para extração de bordas, preenchimento de regiões, extração de componentes conexos, afinamento, engrossamento e desbaste de regiões e esqueletonização [123].

A.2.4 Segmentação

O objetivo das técnicas de segmentação é dividir a imagem em suas diversas partes constituintes ou segmentos (objetos e regiões). O nível ou quantidade de divisões aplicadas na imagem varia conforme a aplicação, e em geral é realizada até atingir um nível de separação suficiente entre os objetos de interesse na cena analisada [123]. As técnicas de segmentação dão um passo à frente das técnicas de morfologia matemática quanto à classificação (seção 4.1), enquadrando-se dentre as técnicas de médio e alto nível de processamento de imagens.

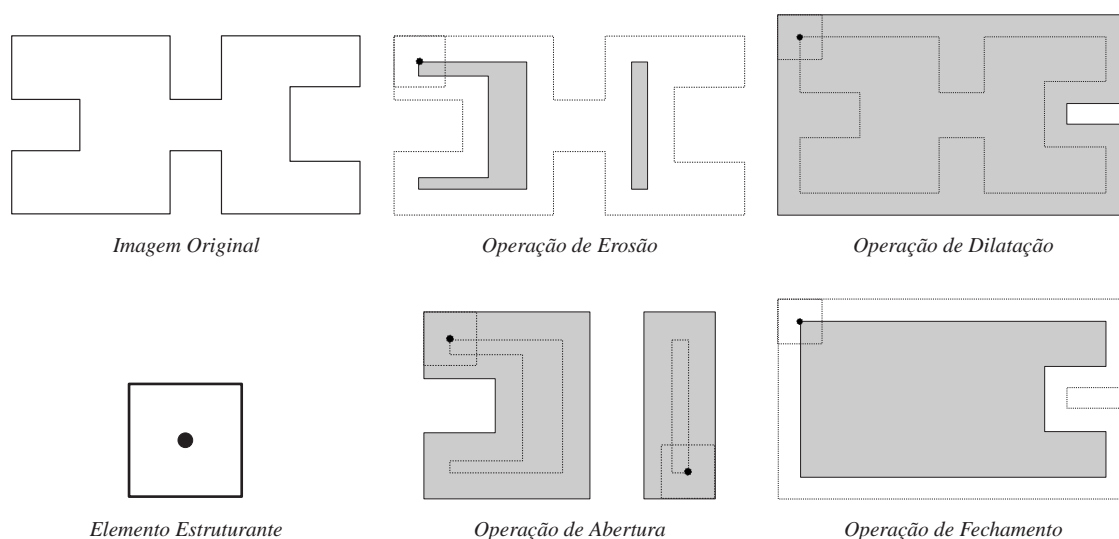


Figura A.47: Princípio de funcionamento de operadores morfológicos.

Fonte: Gonzalez and Woods [123].

Os algoritmos de segmentação baseiam-se principalmente em duas propriedades do nível de intensidade luminosa das imagens: a **descontinuidade** e a **similaridade**. Quanto à descontinuidade, a idéia está em dividir a imagem em regiões de acordo com as mudanças abruptas do nível de intensidade luminosa em seus pontos, por exemplo, cantos e arestas de objetos na imagem. Já por similaridade, a imagem é dividida em regiões de acordo com algum padrão de similaridade entre estas regiões, como por exemplo, o nível de intensidade luminosa, a cor e a textura.

Dentre as técnicas de segmentação mais conhecidas destacam-se a detecção de descontinuidades, a detecção de limiares (*thresholding*), a segmentação baseada em regiões e a segmentação por divisores de água (*watersheds*). Os princípios de funcionamento de cada uma destas técnicas são introduzidos a seguir, baseados em [123]. Demais informações podem ser encontradas em [121, 122, 123, 124, 128, 129, 145, 146, 147, 155, 157, 158].

Detecção de Descontinuidades

A segmentação por detecção de descontinuidades procura regiões de transição abrupta do nível de intensidade luminosa dos pontos da imagem para realizar as divisões. Dentre as descontinuidades mais comuns encontram-se pontos, linhas e bordas. Estas técnicas de detecção de descontinuidades fazem uso extenso das técnicas de pré-processamento de imagens, em especial a filtragem para enfatização de características (*sharpening filters*), tanto no domínio espacial quanto frequencial. Existem inúmeras configurações padrões de máscaras de convolução próprias para a detecção de cada uma destas características, como pode ser visto na figura A.48.

Para a detecção de pontos de descontinuidade na imagem, são muito utilizadas as configurações

$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$
<i>Sobel Horizontal</i>	<i>Prewitt Horizontal</i>	<i>Linha Horizontal</i>	<i>Laplace</i>
$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$
<i>Sobel Vertical</i>	<i>Prewitt Vertical</i>	<i>Linha Vertical</i>	<i>Laplace</i>
$\begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
<i>Sobel Diagonal</i>	<i>Prewitt Diagonal</i>	<i>Linha Diagonal</i>	<i>Roberts</i>

Figura A.48: Diversas configurações de máscaras para a detecção de descontinuidades.

de máscaras de laplace, que dão maior ênfase para o ponto centrado na máscara e reduz a influência de seus vizinhos. Já para detecção de linhas pode se usar máscaras especiais para ênfase de linhas horizontais, verticais ou na diagonal, que funcionam analogamente à detecção de pontos, reduzindo a influência de pontos vizinhos à linha. Na detecção de bordas de objetos, várias são as possibilidades usadas, sendo as mais comuns apresentadas por Roberts, Prewitt e Sobel, que são operadores baseados no conceito de gradiente. Esta estratégia se faz necessária tendo em vista que as bordas não costumam ser abruptas (mudança radical no nível de intensidade luminosa), mas sim suaves e contínuas (semelhantes ao sinal de uma rampa). Desta forma, um filtro do tipo gradiente procura enfatizar esta mudança gradual e suave das bordas dos objetos. De forma análoga à detecção de linhas, pode-se utilizar um filtro específico para valorizar bordas horizontais, verticais ou diagonais. A figura A.49 ilustra as operações de detecção linhas e bordas.

Detecção de Limiares (*Thresholding*)

A detecção de limiares é uma das técnicas de segmentação mais simples e fáceis de aplicar, sendo usado constantemente em qualquer aplicação de processamento de imagens. A técnica procura agrupar os diferentes objetos e regiões da imagem conforme a similaridade de tonalidades (nível de intensidade luminosa) entre os mesmos.

A operação de limiarização simples corresponde à definição de um valor T de limiar para o nível de intensidade luminosa ao qual deseja-se realizar o ponto de corte (binarização) da imagem. Em uma imagem de 256 tons de cinza, caso $T = 50$, todas as tonalidades entre 0 e 50 ($f(x,y) < T$) tornar-se-iam informação de fundo da imagem (valor 0 binário, ou cor preta). Já os demais valores a partir deste limiar ($f(x,y) > T$) tornar-se-iam informação correspondente aos objetos da imagem

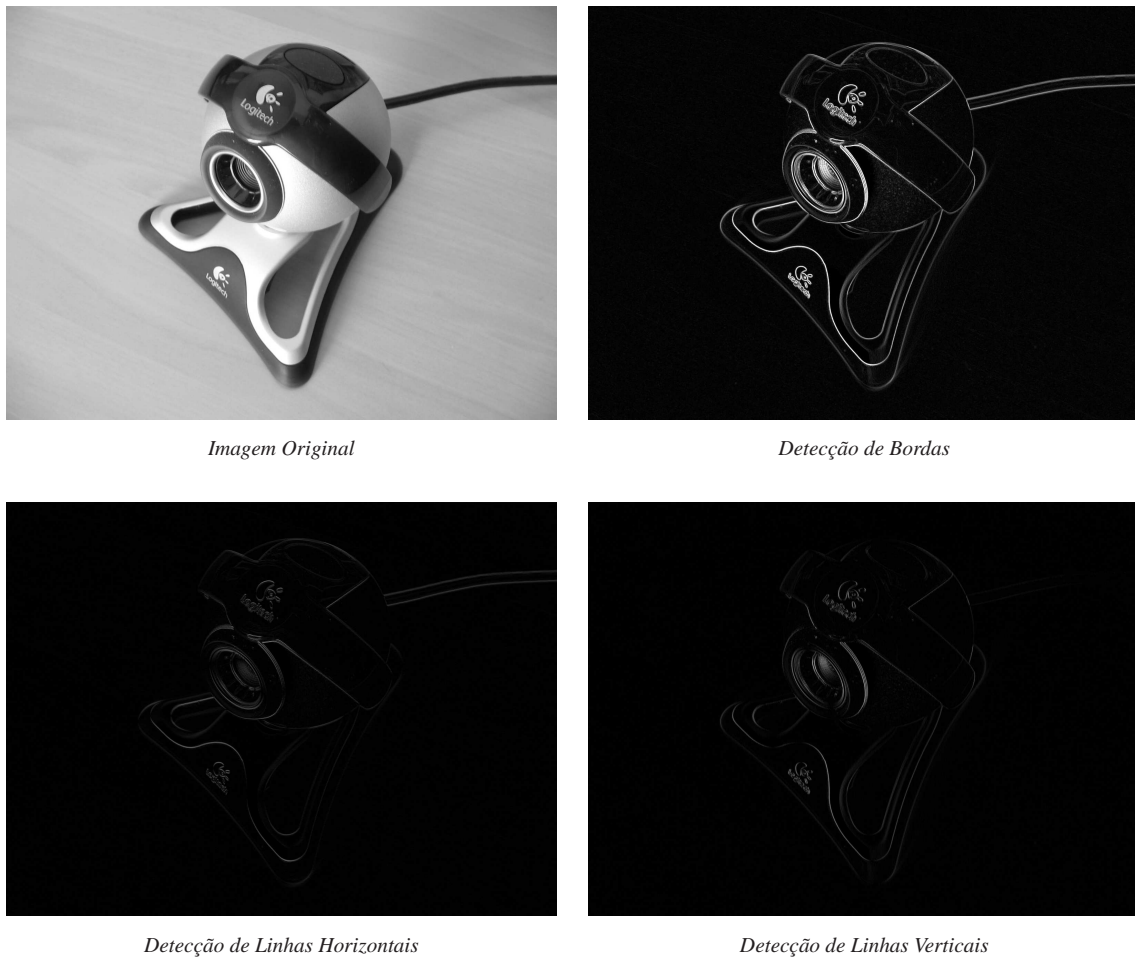


Imagem Original

Detecção de Bordas

Detecção de Linhas Horizontais

Detecção de Linhas Verticais

Figura A.49: Detecção de pontos, linhas e bordas numa imagem.

(valor 1 binário, ou cor branca). Desta forma, a simples definição de um valor de limiar ou de corte já é suficiente para dividir a imagem em duas regiões: fundo e objetos, sendo útil quando já existe bom contraste entre estas regiões e apresentando resultados pobres em situações mais adversas.

É possível ainda definir múltiplos limiares de corte (*multilevel thresholding*), e definir faixas de valores de intensidade luminosa para cada entidade da imagem. Por exemplo, caso existam para uma imagem $f(x,y)$ dois valores distintos de limiar (T_1 e T_2), define-se que todos os valores em que $f(x,y) < t_1$ correspondem ao fundo da imagem, enquanto os valores em que $T_1 > f(x,y) > T_2$ correspondem a um determinado objeto, e quando $f(x,y) > T_2$ há um outro objeto correspondente na cena. É possível definir mais valores de limiar, porém, situações que demandam diferentes valores de limiar para realizar sua segmentação são normalmente melhor solucionadas por técnicas de segmentação baseadas em regiões.

A figura A.50 ilustra estas duas situações descritas acima. Nota-se a clareza de informações passada pelos histogramas das imagens em relação à escolha dos pontos de limiar.

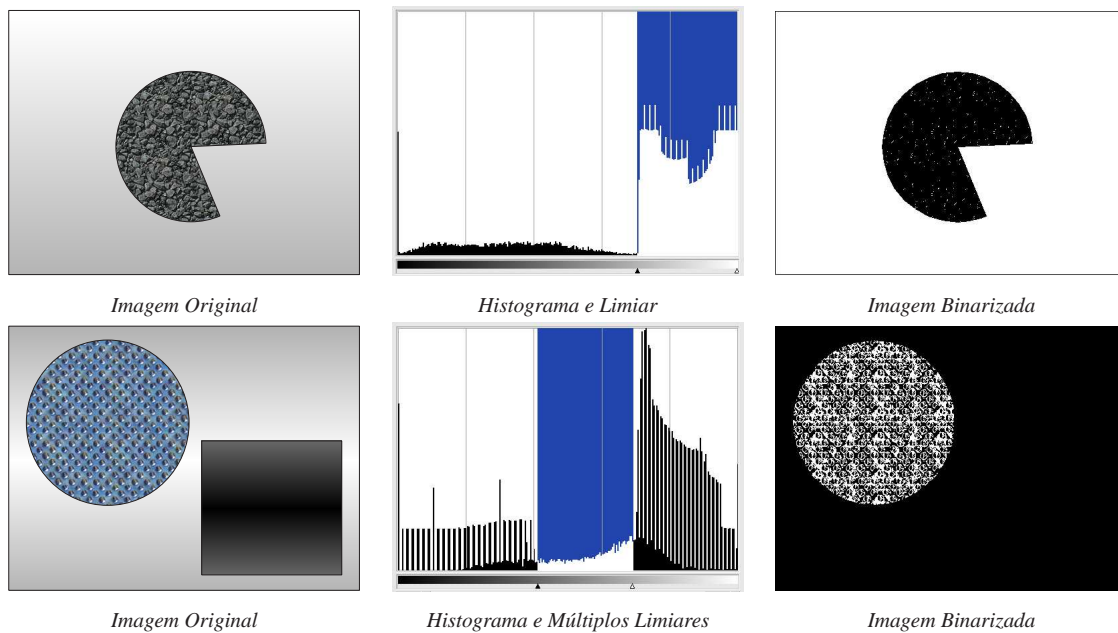


Figura A.50: *Simple ilustração de técnicas de detecção de limiares.*

Formalmente definimos a limiarização como uma operação de testes contra uma variável T :

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (\text{A.13})$$

onde $f(x, y)$ representa a intensidade luminosa de um ponto e $p(x, y)$ representa uma propriedade local deste ponto na imagem, como por exemplo, a média de intensidade luminosa de seus vizinhos. A partir desta expressão, define-se uma imagem limiarizada (binarizada por um limiar):

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) > T \\ 0 & \text{if } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Assim, pontos da imagem rotulados com o valor 1 representam objetos da imagem, e pontos rotulados com o valor 0 representam o fundo da imagem. Quando a expressão de T depende apenas de $f(x, y)$ (nível de intensidade luminosa), diz-se que a operação corresponde a uma **limiarização global**. Se T depende também de $p(x, y)$, este é chamado de **limiarização local**. Caso T ainda dependa das coordenadas espaciais x e y , além de f e p , este é chamado de **limiarização dinâmica ou adaptativa** [123]. Cada um destes tipos de limiarização possuem uma abordagem e implementação levemente diferente, porém, não serão detalhados mais a fundo neste trabalho.

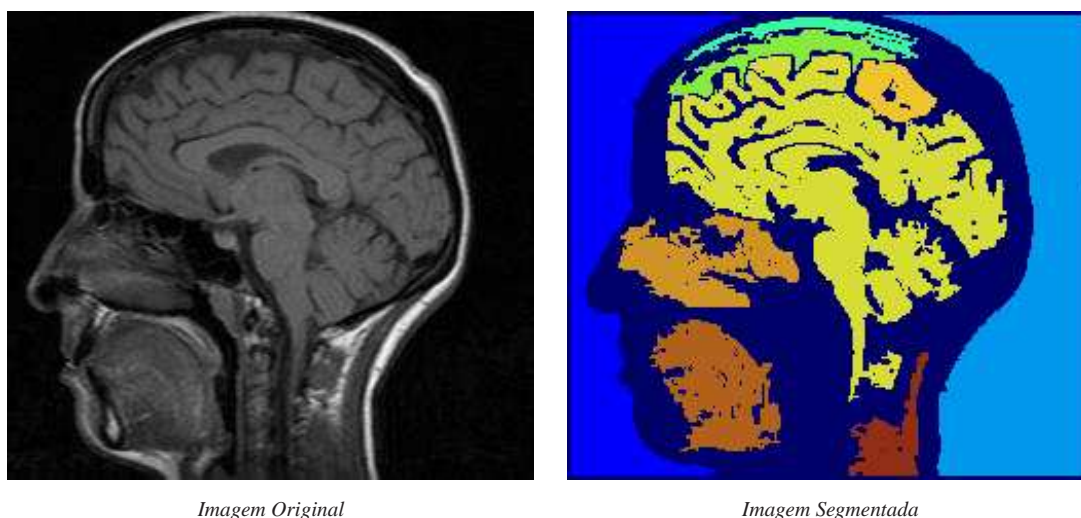


Figura A.51: *Processo de segmentação por crescimento de regiões.*

Fonte: <http://www.comp.leeds.ac.uk/ai21/examples/images/rgrow.html>

Segmentação Baseada em Regiões

Este tipo de segmentação divide a imagem procurando por regiões que atendam a algum tipo de similaridade. Em geral, uma imagem segmentada é formada por um número n de regiões de pontos na imagem (como visto na sub-seção A.2.1), sendo que a união destas regiões compõe a imagem completa. As regiões devem sempre ser disjuntas e atender a um determinado critério para o agrupamento de seus pontos. Duas técnicas são bem conhecidas: segmentação por crescimento de regiões (*region growing*) e por divisão e agrupamento de regiões (*split and merge*).

A **segmentação por crescimento de regiões** é um procedimento que agrupa pontos e pequenas sub-regiões da imagem em maiores regiões, de acordo com um critério de semelhança pré-definido. Em geral, parte-se de um conjunto de pontos ditos “sementes”, e a partir destes pontos inicia-se um processo de crescimento de regiões, agrupando todos os pontos vizinhos que respeitem o critério de semelhança com a semente. É comum que para cada aplicação tenha-se uma ligeira noção de que pontos serviriam como boas sementes para o início do algoritmo (normalmente faixas específicas de intensidade luminosa na imagem).

A escolha pelo critério de similaridade entre os pontos varia conforme a aplicação e o tipo de imagem sendo usada. Dentre os critérios mais utilizados destacam-se a intensidade luminosa, a textura, e a cor dos pontos. Alguns outros critérios fornecem ao algoritmo uma certa inteligência para a reunião dos pontos, como analisar as propriedades de adjacência e conectividade dos mesmos enquanto forma-se a região. Critérios para a parada do algoritmo costumam ser o tamanho e a forma das regiões formadas, assim como a similaridade de características de novos pontos para adentrar uma determinada região. A segmentação por crescimento de regiões é ilustrado na figura A.51.

Já a **segmentação por divisão e agrupamento** aborda uma solução diferente para classificar e agrupar regiões da imagem. A idéia consiste em iniciar uma série de divisões sistemáticas a partir da imagem original, até alcançar inúmeras divisões distintas que realmente formem regiões na imagem. Ou seja, nestas divisões todos os pontos devem obedecer a um critério de similaridade para poderem manter-se agrupados. A estrutura de dados mais utilizada para representar as divisões na imagem são as árvores do tipo *quadtree*, que divide sempre a imagem em quatro partes iguais. Após uma divisão, caso a condição de similaridade não se verifique para todas as partes separadas, cada parte prossegue sendo dividida obedecendo esta mesma estrutura até atingir diversas regiões, que reunidas formam a imagem completa.

Quando não há mais possibilidade de realizar divisões, ou seja, todas as divisões já formam regiões distintas, inicia-se o processo de agrupamento das regiões vizinhas que atendam ao mesmo critério de similaridade de agrupamento dos pontos, para realmente formar um grupo de regiões maiores que caracterizem de maneira mais visível as diferentes informações da imagem. O procedimento termina quando não é mais possível agrupar nenhuma região da imagem. O processo de segmentação por divisão e agrupamento é ilustrado na figura A.52.

Segmentação por Divisores de Água (*Watersheds*)

A segmentação por divisores de água abrange conceitos de todas as demais técnicas de segmentação para realizar a divisão da imagem em partes distintas. O nome dado à técnica provém do seu princípio de funcionamento, que consiste em visualizar qualquer imagem em uma representação tri-dimensional da mesma, considerando as coordenadas espaciais x e y nos planos horizontal e vertical, respectivamente, e ainda o nível de intensidade luminosa dos pontos nestas coordenadas no plano perpendicular aos demais, provendo a idéia de profundidade na imagem.

De acordo com esta representação “topográfica” da imagem, consideram-se três elementos: (a) pontos da imagem que pertençam a um mínimo local, (b) pontos intermediários, em que se colocada uma gota d’água sobre o ponto, esta escorreria em direção de um mínimo local, e (c) pontos que pertençam a máximos locais, nos quais, se colocada uma gota d’água sobre o ponto, a gota teria a possibilidade de escorrer para mais de um mínimo local. Os pontos que satisfazem a condição (b) na imagem são chamados de represa ou divisores de águas. Já os pontos que satisfazem a condição (c) são chamados de linhas divisórias de águas, e o algoritmo está interessado justamente em encontrar estas linhas divisórias, pois elas limitam e representam as bordas de objetos na imagem.

O algoritmo funciona da seguinte maneira: primeiramente, supõe-se que junto aos pontos de mínimo local (em geral pontos de baixa intensidade luminosa) abrem-se tubulações para que água possa adentrar em uma taxa constante. Enquanto a água não atinge algum ponto de máximo local,

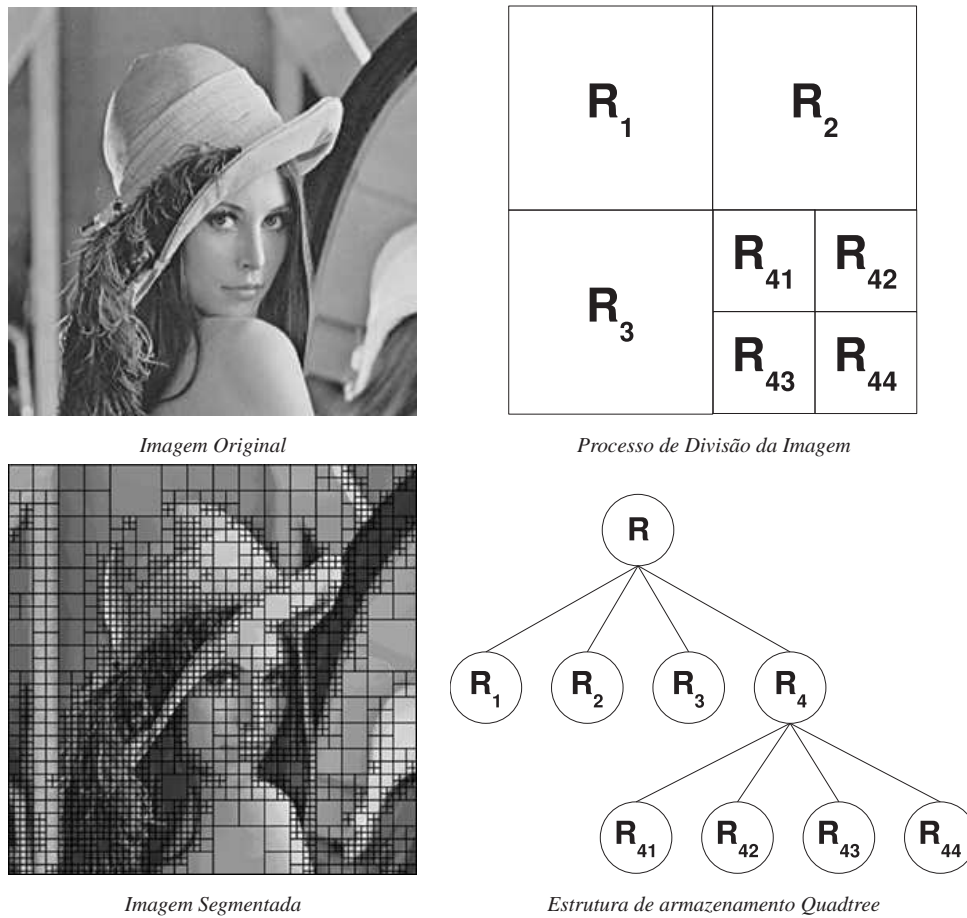


Figura A.52: Processo de segmentação por divisão e agrupamento.

ou seja, não consegue escapar e não vasa para outra região, ela continua entrando e cobrindo a região, sendo limitada pelos pontos divisores de água. No momento em que algum ponto de máximo local é alcançado e a água está próxima de vazar e unir duas regiões distintas, é construída uma barragem para impedir esta união. Vai haver um momento em que em todos os pontos de máximo local será construída esta barragem, e apenas o topo desta barragem mantém-se visível junto às águas. Neste momento o algoritmo para, pois estes pontos que correspondem à barragem são as linhas divisórias de águas, que representam as bordas dos objetos na imagem.

O processo de divisão de águas é ilustrado na figura A.53. Em geral este algoritmo é aplicado para a extração e separação de objetos de características ligeiramente uniformes do fundo da imagem. É muito comum inclusive aplicar este tipo de algoritmo ao gradiente das imagens, ao invés delas próprias, pois isto facilita a identificação de regiões de baixos valores de gradiente.

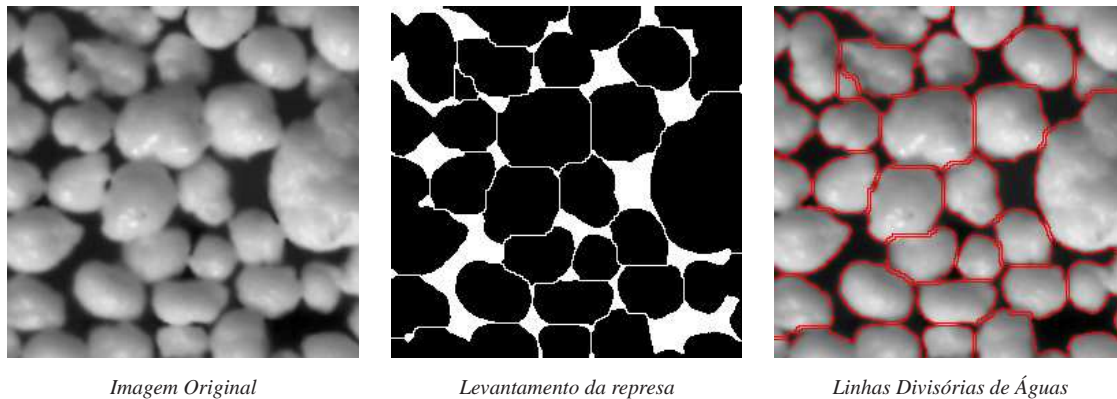


Figura A.53: Processo de segmentação por divisores de águas.

Fonte: <http://www.reindeergraphics.com/tutorial/chap6/binary04.html>

A.2.5 Inteligência Artificial aplicada à Visão

Os algoritmos de inteligência artificial tem ganhado vasto campo de aplicação na área de processamento de imagens, sendo utilizados para diversas tarefas de alto nível (conforme seção 4.1). São normalmente empregados em tomadas de decisão e processamento inteligente, podendo receber desde imagens em sua entrada, como também dados ou características provenientes da saída de algum outro algoritmo de processamento de imagens para realizar seu processamento.

Dentre as técnicas mais comuns empregadas de inteligência artificial presentes na área de visão estão as Redes Neurais, os Algoritmos Genéticos e a Lógica Nebulosa. O embasamento e os conceitos necessários para boa compreensão destas técnicas são muito extensos e fogem do escopo deste trabalho. Informações aprofundadas no assunto podem ser vistas em [127, 145, 150, 157, 158, 163, 164].

Algumas aplicações na qual se empregam tais técnicas seriam: na classificação inteligente de padrões, na tomada de decisões a partir de um conjunto de regras, na procura por melhores pontos “semente” para algoritmos de segmentação, dentre outros.

Apêndice B

A Biblioteca S2iLib e o Projeto Harpia

O grupo S2i iniciou o desenvolvimento de uma biblioteca de *software* para trabalhar com a tecnologia de visão quando observou-se que as plataformas de *software* de dois de seus projetos na área de visão apresentavam módulos muito semelhantes, especialmente na parte de processamento de sinais e imagens e manipulação de *hardware* de visão [28]. Desta forma, convinha organizar e padronizar os trabalhos realizados em uma biblioteca computacional genérica, que abrangesse ao menos duas plataformas operacionais distintas (Windows e GNU/Linux) para prover maior flexibilidade e abrangência no desenvolvimento de aplicações nas áreas pesquisadas.

Participando de atividades junto à comunidade de *software* livre, o grupo decidiu adotar a filosofia e tornar esta biblioteca livre, contribuindo para o crescimento e desenvolvimento da área, criando assim a S2ILIB. Havendo uma necessidade por “nacionalizar” a tecnologia de visão e prover um ambiente de simulação e prototipagem rápida destes sistemas, o grupo teve sucesso em aprovar junto ao Finep em 2003 um projeto que visa a implementação de uma interface gráfica orientada a diagramas de bloco, que facilitará a manipulação de *hardware* e simulação de soluções com sistemas de visão e processamento de imagens. Assim foi criado o projeto HARPIA, apoiando-se na base provida pela biblioteca S2ILIB, também sob a concepção de um *software* livre.

B.1 Objetivos com o Desenvolvimento de *Software* Livre

O desenvolvimento de aplicações na área de sistemas de visão dentro do grupo S2i sofreu forte influência das parcerias que foram formadas ao longo dos anos de sua existência. Como as soluções implementadas junto com os parceiros não podiam ser abertas publicamente por questões de sigilo, o grupo considerou necessária a criação de suas próprias bibliotecas computacionais para processamento de imagens e sistemas de visão, como forma de organizar e nacionalizar os conhecimentos

adquiridos nas pesquisas realizadas, abrindo-as ao domínio público. Desta forma, os objetivos do desenvolvimento da biblioteca S2iLIB e do projeto HARPIA podem ser resumidos a seguir:

- Criar uma biblioteca de processamento de sinais e imagens e manipulação de *hardware* de sistemas de visão orientada a objetos, sob a concepção de *software* livre, compatível com as plataformas operacionais Windows e GNU/Linux.
- Manter compatibilidade com o *hardware* dos principais fabricantes de sistemas de visão.
- Tornar a biblioteca robusta, eficiente e confiável para ser usada em soluções de tempo real.
- O código fonte da biblioteca deve ser claro e bem documentado. Os módulos da biblioteca devem ser organizados de forma a tornar o código reutilizável. As interfaces dos módulos devem ser padronizadas e intuitivas, para permitir seu aprendizado didático por novos usuários/desenvolvedores da comunidade de *software* livre.
- Criar um ambiente gráfico orientado a diagramas de bloco para rápida prototipagem de aplicações, facilitando a tarefa do projeto de um sistema de visão até para pessoas sem muita experiência na área. O ambiente deve ser intuitivo e didático para permitir que a ferramenta sirva não apenas para uso no setor industrial, mas também para o setor acadêmico, como forma de aprendizado e difusão da tecnologia.
- “Nacionalizar” a tecnologia de sistemas de visão, gerando documentação completa sobre as diversas áreas do conhecimento envolvidas, pelo fato de esta ainda encontrar-se muito pobre na língua portuguesa. A documentação seria voltada para o meio industrial, na qualificação de funcionários de empresas, como para o meio acadêmico, na formação de recursos humanos.

B.2 A Biblioteca S2iLIB

A biblioteca S2iLIB teve seu início de desenvolvimento no final do ano de 2000. Construir uma biblioteca de processamento de sinais desde o início é uma tarefa árdua e requer tempo e recursos demasiados. Desta forma, a S2iLIB em sua concepção baseou-se fortemente em outras bibliotecas livres de processamento de imagens [2, 3], como a OPENCV¹ e a VXL², e também em bibliotecas de manipulação de dispositivos de aquisição de imagens, como a V4L³ e a SANE⁴.

¹<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>

²<http://sourceforge.net/projects/vxl/>

³<http://www.exploits.org/v4l/> e <http://linux.bytesex.org/v4l2/>

⁴<http://www.sane-project.org/>

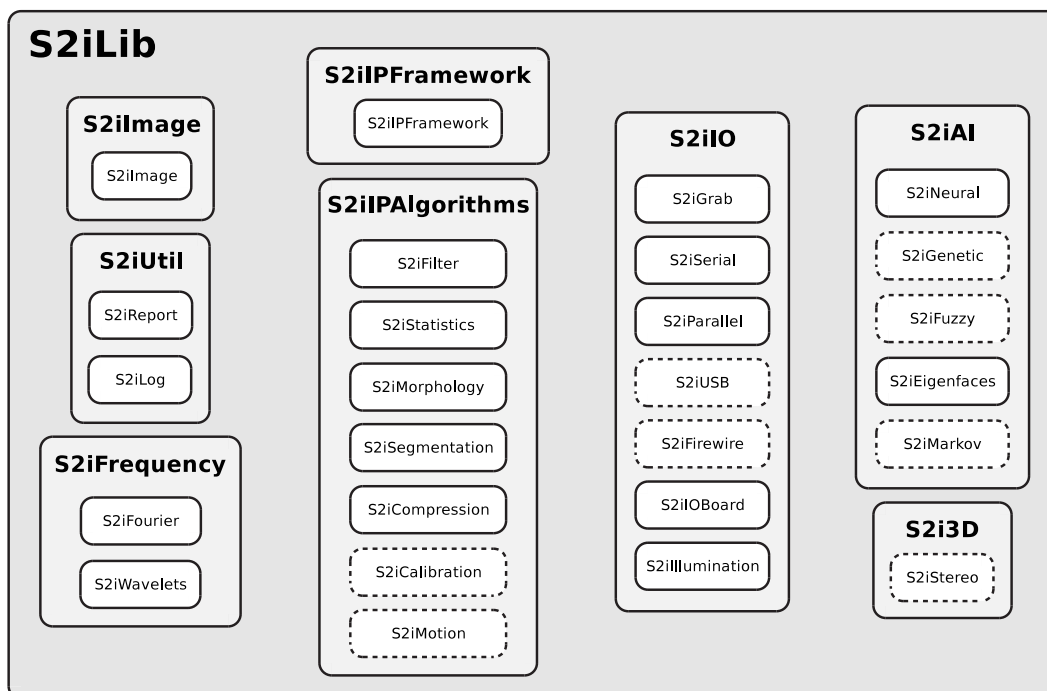


Figura B.1: Módulos da biblioteca S2ILIB.

A biblioteca OPENCV é uma biblioteca estruturada na linguagem C e foi desenvolvida inicialmente pela Intel⁵, que a princípio abriu o código e liberou a utilização da biblioteca. Posteriormente a Intel elaborou uma série de modificações na biblioteca, criando novos módulos para que esta rodasse de forma otimizada em seus microprocessadores, fechando o novo código produzido. A parte do código da OPENCV que permaneceu livre passou a ser administrada pela comunidade de desenvolvedores de *software* da área. Já a VXL é uma biblioteca implementada na linguagem C++ criada pela TargetJr⁶ baseada fortemente no padrão ANSI/ISO C++.

Desta forma, a S2ILIB herdou muitas das funcionalidades já presentes nestas duas bibliotecas para a implementação de alguns de seus módulos. A figura B.1 ilustra a série de módulos já implementados (linhas cheias) ou ainda em desenvolvimento (linhas tracejadas) na biblioteca S2ILIB.

B.2.1 Módulos da S2ILIB

Segue uma descrição das funcionalidades de cada módulo da biblioteca [2, 3, 28]:

- **S2iImage:** Fornece estruturas básicas para a representação e manipulação básica de imagens, como por exemplo, operações aritméticas, carregar e salvar imagens em diferentes formatos, criação de ROIs, rotação e translação, dentre outros.

⁵<http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>

⁶<http://www.esat.kuleuven.ac.be/~targetjr/>

- **S2iUtil** Fornece estruturas de utilidades gerais necessárias para a supervisão de aplicativos:
 - S2iReport:** Interface de criação de relatórios padronizados, para serem incluídos em interfaces gráficas de aplicativos, como forma de apresentação de resultados em diversos formatos diferentes, como por exemplo, html, ps, pdf, dentre outros.
 - S2iLog:** Interface de criação de logs de operações de um sistema, para viabilizar o monitoramento das atividades das aplicações.
- **S2iFrequency:** Fornece estruturas para manipulação e condicionamentos de sinais adquiridos no domínio da frequência:
 - S2iFourier:** Cálculo da Transformada Rápida de Fourier de sinais uni ou bidimensionais.
 - S2iWavelets:** Cálculo da Transformada de *Wavelets* de sinais uni ou bidimensionais.
- **S2iIPFramework:** Fornece um encapsulamento das diversas operações de processamento de imagens e manipulação de dispositivos de visão na forma de blocos, para possibilitar um processamento encadeado das imagens, pela conexão de blocos de processamento.
- **S2iIPAlgorithms:** Fornece diversos algoritmos para o pré-processamento, processamento, análise e compressão de imagens:
 - S2iFilter:** Fornece a interface para diversas técnicas de filtragem, como por exemplo, técnicas de realce, suavização e restauração de imagens.
 - S2iMorphology:** Fornece a interface para diversas operações morfológicas, como por exemplo, erosão, dilatação, abertura e fechamento.
 - S2iSegmentation:** Fornece a interface para diferentes técnicas de segmentação, como por exemplo, segmentação por contornos, por região, por textura e por limiarização.
 - S2iStatistics:** Fornece a interface para apresentação de dados estatísticos referentes às características das imagens, como por exemplo, histogramas.
 - S2iCompression:** Fornece a interface para a compressão de imagens em formatos conhecidos.
 - S2iCalibration:** Fornece a interface para a calibração automática de um sistema de visão.
 - S2iMotion:** Fornece estruturas para o desenvolvimento de aplicações de rastreamento de padrões e movimento em imagens.
- **S2iIO:** Fornece a interface de comunicação com as portas de entrada/saída do computador:

S2iGrab: Fornece a interface de comunicação com os dispositivos de aquisição de imagens, como por exemplo, placas de aquisição, câmeras Firewire, *webcams* e *scanners*.

S2iSerial: Interface de comunicação com a porta serial do computador.

S2iParallel: Interface de comunicação com a porta paralela do computador.

S2iUSB: Interface de comunicação com a porta USB do computador.

S2iFirewire: Interface de comunicação com Firewire do computador.

S2iIOBoard: Interface de comunicação com placas de E/S.

S2iIllumination: Interface para comunicação com um módulo de iluminação de LEDs, baseando seu acionamento no controle de alguma porta ou placa de E/S.

- **S2iAI:** Fornece estruturas para a manipulação e condicionamento de sinais a partir de técnicas de inteligência artificial:

S2iNeural: Interface para o processamento de dados por meio de Redes Neurais.

S2iGenetic: Interface para o processamento de dados por meio de Algoritmos Genéticos.

S2iFuzzy: Interface para o processamento de dados por meio de Lógica Nebulosa.

S2iEigenfaces: Interface para o processamento de dados por meio de *Eigenfaces*.

S2iMarkov: Interface para o processamento de dados por meio de Redes de Markov.

- **S2i3D:** Fornece estruturas para o desenvolvimento de aplicações com imagens 3D:

S2iStereo: Interface para manipulação de imagens 3D por técnicas de visão estéreo.

O acesso à biblioteca S2ILIB para desenvolvimento é feito por CVS a partir do servidor do Departamento de Automação e Sistemas da UFSC: `cvs.das.ufsc.br`. O modo de acesso é *ext* e a variável CVSROOT deve ser passada como `:ext:user@cvs.das.ufsc.br:/usr/cvs/s2i/`. O acesso para utilização de versões beta da biblioteca pode ser feito a partir de seu sítio no domínio SourceForge: <http://sourceforge.net/projects/s2ilib/>.

B.3 Projeto HARPIA

Apesar de já contar com certa infraestrutura de *software* para a área de sistemas de visão, era necessário criar uma ferramenta para acelerar a produção e gerenciamento de projetos voltados para a área de visão. Assim surgiu a idéia para o desenvolvimento de uma interface gráfica para gerenciar



Ave Harpia

Logotipo do Projeto

Figura B.2: Ilustração do mascote do projeto HARPIA e o logotipo.

e facilitar o manuseio dos diversos módulos de *software* já disponibilizados pela biblioteca S2iLIB, tornando o processo de elaboração de um novo projeto de visão mais claro e intuitivo, através de um interfaceamento por diagramas de blocos, totalmente orientado a fluxos de processamento.

O projeto HARPIA seria criado com estes fundamentos, na concepção de *software* livre, eliminando a necessidade do desenvolvedor do sistema de ser um profundo conhecedor das tecnologias empregadas no projeto e implementação de um sistema de visão. Todas as tarefas e operações desempenhadas pelo sistema de visão seriam representadas e montadas por blocos, tornando o processo de planejamento e elaboração da aplicação intuitivo.

A escolha do nome e logotipo do projeto vem de uma ave da fauna brasileira de mesmo nome, que porta uma visão excepcional, sendo um dos mais fortes espécimes da classe das aves.

A estrutura de interfaceamento por diagramas de blocos propicia a utilização de uma estrutura modular de *software*, permitindo maior reusabilidade. As tarefas desempenhadas por cada módulo de *software* são encapsuladas em um bloco, e estes blocos devem ter uma interface padrão e simples para facilitar a implementação de novos blocos de *software* para serem integrados ao sistema.

Deste ponto de vista, podemos assemelhar a funcionalidade e operação do HARPIA a *softwares* comerciais já bem populares, como por exemplo o Simulink/Matlab e o LabView, onde o usuário além de utilizar os recursos já fornecidos pelo aplicativo, tem ainda a liberdade de desenvolver novas ferramentas usando a mesma interface de blocos e integrá-la ao sistema.

Produtos com idéias similares as do HARPIA já existem no mercado, como por exemplo o DVT Framework⁷, o Coreco WIT⁸ (ilustrado na figura B.3) e o Khoros⁹. Apesar de utilizarem a mesma idéia de diagramas de blocos, são todas soluções proprietárias, fechadas, de tecnologia estrangeira, sendo sua licença normalmente muito cara. Eles têm ainda um grande problema: são dependentes do

⁷<http://www.dvtsensors.com/products/FrameWorkManager.php>

⁸<http://www.wit-igraph.com/default.htm>

⁹<http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/khoros/>

hardware do fabricante. Ou seja, deve ser comprado um pacote completo e custoso de *hardware* e *software* do fabricante para se montar uma aplicação de visão.

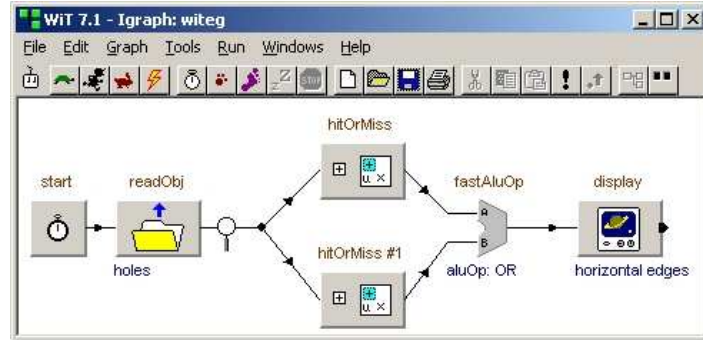


Figura B.3: Interface gráfica do ambiente de desenvolvimento de aplicações do WIT.

Uma característica importante do HARPIA é sua estrutura cliente-servidor, que permite o gerenciamento de um sistema de visão de maneira remota. Nesta estrutura, a interface gráfica, responsável pelos desenhos e diagramação do sistema, se comportaria como o cliente, e o coração do sistema, responsável pelo processamento das informações e baseando-se na biblioteca S2iLib, seria o servidor. A figura B.4 ilustra um *screenshot beta* da interface gráfica do HARPIA.

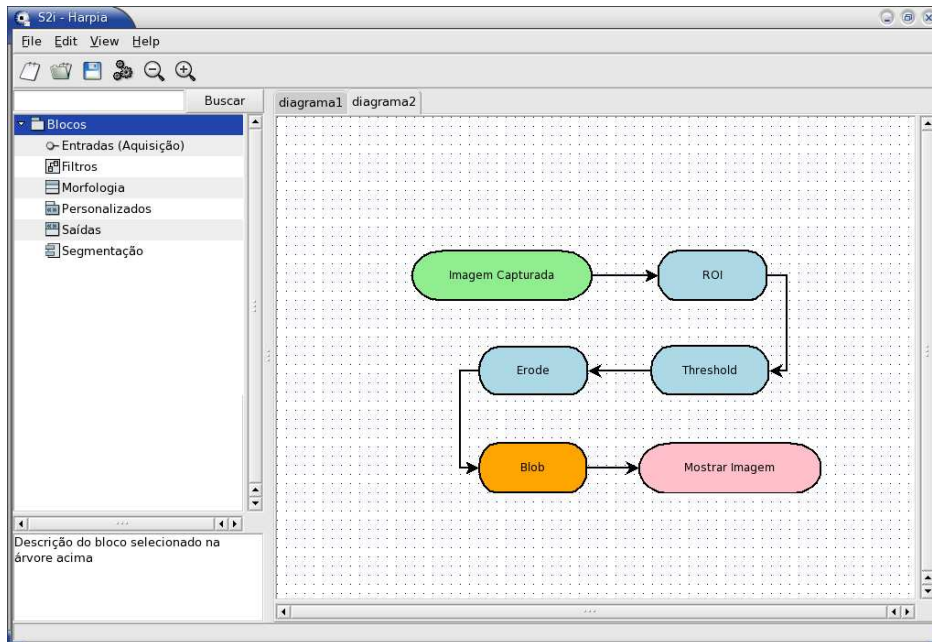


Figura B.4: Versão beta da interface gráfica do HARPIA.

O projeto HARPIA conta com um site próprio (em desenvolvimento) para divulgação na internet – <http://s2i.das.ufsc.br/harpia/>, que servirá como tutorial do sistema, fornecerá o código fonte e os binários para instalação do *software* e contará com informações sobre a equipe desenvolvedora, possibilitando uma troca de informações entre usuários do sistema e desenvolvedores.

Referências Bibliográficas

- [1] Alberto Xavier Pavim. *Development of a Machine Vision Application for Automated Tool Wear Measurement*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2003.
- [2] Alexandre Orth. *Desenvolvimento de um Sistema de Visão para medir o Desgaste de Flanco de Ferramentas de Corte*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis - SC - Brasil, 2001.
- [3] Fernando Deschamps. *Contribuições para o Desenvolvimento de um Sistema de Visão aplicado ao Monitoramento do Desgaste de Ferramentas de Corte - O Sistema ToolSpy*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis - SC - Brasil, 2004.
- [4] Caspar Erich Stemmer. *Ferramentas de Corte I*. Editora da UFSC, Florianópolis - SC - Brasil, 4 edition, 1995.
- [5] C. Bradley and Y. S. Wong. Surface Texture Indicators of Tool Wear - A Machine Vision Approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 435–443, 2001.
- [6] D. Choi, W. T. Kwon, and C. N. Chu. Real-Time Monitoring of Tool Fracture in Turning using Sensor Fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15: 305–310, 1999.
- [7] M. Lanzetta. A New Flexible High-Resolution Vision Sensor for Tool Condition Monitoring. *Journal of Materials Processing Technology*, 119:73–82, 2001.
- [8] Xiaoli Li. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42:157–165, 2002.
- [9] X. Li, S. Dong, and P. K. Venuvinod. Hybrid Learning for Tool Wear Monitoring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16:303–307, 2000.

- [10] M. G. Mehrabi and E. Kannatey-Asibu, Jr. Mapping Theory: A New Approach to Design of Multi-Sensor Monitoring of Reconfigurable Machining Systems (RMS). *Journal of Manufacturing Systems*, 20(5):297–304, 2001.
- [11] Tilo Pfeifer and L. Wieggers. Reliable Tool Wear Monitoring by Optimized Image and Illumination Control in Machine Vision. *Measurement*, 28:209–218, 2000.
- [12] Robert Schmitt, René Hermes, Daniel Gomes de Moraes, Marcelo Ricardo Stemmer, Alberto Xavier Pavim, and Fernando Deschamps. Machine Vision Prototype for Flank Wear measurement on Milling Tools. In *Proceedings of the 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2005.
- [13] Marcelo Ricardo Stemmer, Alberto Xavier Pavim, Marcelo Pires Adur, Fernando Deschamps, Robert Schmitt, and René Hermes. Machine Vision and Neural Networks applied to Wear Classification on Cutting Tools. In *Proceedings of the EOS Conference on Industrial Imaging and Machine Vision*, volume 1, pages 139–142, Munique - Alemanha, 2005.
- [14] Tugrul Özel and Abhijit Nadgir. Prediction of Flank Wear by using Back Propagation Neural Network Modelling when cutting Hardened H-13 Steel with Chamfered and Honed CBN Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42:287–297, 2002.
- [15] Marzely Gorges. *Monitoramento de Processos de Fabricação*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis - SC - Brasil, 1992.
- [16] Peter Norman. *Monitoring and Control of Highspeed Milling*. Dissertação de mestrado, Luleal University of Technology - Master of Science Programme, 2003.
- [17] Garret O'Donnell, Paul Young, Kevin Kelly, and Gerry Byrne. Towards the Improvement of Tool Condition Monitoring Systems in the Manufacturing Environment. *Journal of Materials Processing Technology*, 119:133–139, 2001.
- [18] Bernhard Sick. On-Line and Indirect Tool Wear Monitoring in Turning with Artificial Neural Networks: A Review of more than a Decade of Research. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(4):487–546, 2002.
- [19] Dimla E. Dimla Snr. Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations - A Review of Methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40:1073–1098, 2000.

- [20] Litao Wang, Elijah Kannatey-Asibu, Jr., and Mostafa G. Mehrabi. A Method for Sensor Selection in Reconfigurable Process Monitoring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003.
- [21] Sonderforschungsbereich (SFB) 368 Autonome Produktionszellen. Arbeits und Ergebnisbericht 2000/2001/2002. 2003.
- [22] Mário Lucio Roloff. *Desenvolvimento de uma Ferramenta de Configuração, Monitoração e Testes para uma Rede de Sensores/Atuadores em uma Célula Autônoma de Manufatura*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis - SC - Brasil, 2002.
- [23] Marcelo Pires Adur. *Optimization of a Machine Vision System for Tool Wear Measurement and Classification*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2005.
- [24] Daniel Gomes de Moraes. *Integration and Optimisation of a Machine Vision System for Tool Wear Measurement*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2005.
- [25] Fernando Deschamps. *Automated Parameter Optimization for an Image-Processing System in Application of Automated Tool Wear Control in Autonomous Production Cells*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2002.
- [26] Antônio Lopes Emydgio. *Integration Concept for an Automated Tool Wear Measuring System into a Machine Tool*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2003.
- [27] Marcelo Minasi, Fernando Deschamps, and Marcelo Ricardo Stemmer. Eigenfaces - Uma Proposta para o Reconhecimento do Desgaste de Ferramentas. In *Anais do II Simpósio Catarinense de Processamento Digital de Imagens - SCPDI*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2002.
- [28] Marcelo Minasi, Alexandre Orth, and Marcelo Ricardo Stemmer. S2iLib: Uma Biblioteca Orientada a Objetos para Sistemas de Visão. In *Anais do I Simpósio Catarinense de Processamento Digital de Imagens - SCPDI*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2001.
- [29] Alexandre Orth, Tilo Pfeifer, Dominic Sack, Mário Lucio Roloff, and Marcelo Ricardo Stemmer. Measuring Flank Tool Wear on Cutting Tools with Machine Vision - A Case Solution. In *Proceedings of the Mechatronics and Machine Vision in Practice - M2VIP*, volume 1, Tailândia, 2002.
- [30] Alexandre Orth, Tilo Pfeifer, Dominic Sack, and Marcelo Ricardo Stemmer. Sensor/Actuator Network - The Nervous System of a New Production Concept: The Autonomous Production

- Cells. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática - SBA*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2000.
- [31] Alexandre Orth and Marcelo Ricardo Stemmer. Sistema de Visão aplicado ao Monitoramento do Desgaste de Ferramentas de Corte: Uma Estratégia para a Medição do Desgaste de Flanco (VB). In *Anais do I Simpósio Catarinense de Processamento Digital de Imagens - SCPDI*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2001.
- [32] Mário Lucio Roloff and Marcelo Ricardo Stemmer. Sensoriamento Remoto Usando uma Interface Java Native Interface para aplicação em Sistemas Industriais de Visão. In *Anais do I Simpósio Catarinense de Processamento Digital de Imagens - SCPDI*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2001.
- [33] Alberto Xavier Pavim. Seminário em Sistemas de Visão: Aplicações no Controle de Qualidade e Rastreabilidade. 2002.
- [34] Thomas Blum, Ippei Suzuki, and Ichiro Inasaki. Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tool using an Acoustic Emission Sensor. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 22(4):301–308, 1988.
- [35] João Eduardo Borelli, Aldo Branghini, Jr., Reginaldo Teixeira Coelho, and Adilson Gonzaga. Diagnóstico de Estados de Ferramenta nos Processos de Usinagem de Alto Desempenho com o uso de Lógica Fuzzy e Imagens Infravermelho. In *Anais da Feira e Congresso de Usinagem*, Bad Nauheim, 2000.
- [36] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ktteler, W. König, and R. Teti. Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Applications. In *Annals of the CIRP*, pages 541–567, 1994.
- [37] R. Du, M. A. Elbestawi, and S. M. Wu. Automated Monitoring of Manufacturing Processes, Part 1: Monitoring Methods. *Journal of Engineering for Industry*, 117(2):121–132, 1995.
- [38] R. Du, M. A. Elbestawi, and S. M. Wu. Automated Monitoring of Manufacturing Processes, Part 2: Applications. *Journal of Engineering for Industry*, 117(2):133–141, 1995.
- [39] F. Giusti, M. Santochi, and G. Tantussi. On-Line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tools. In *Annals of the CIRP*, volume 36, pages 41–44, 1987.
- [40] K. Jemielniak. Commercial Tool Condition Monitoring Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:711–721, 1999.

- [41] S. Kurada and C. Bradley. A Machine Vision System for Tool Wear Assessment. *Tribology International*, 30:295–304, 1997.
- [42] Fernando Deschamps, Alexandre Orth, and Marcelo Ricardo Stemmer. RAP - Um Sistema de Visão para Robôs Inteligentes Baseado na Interpretação dos Coeficientes de Fourier. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática - SBA*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2000.
- [43] Alexandre Orth. *Desenvolvimento e Implementação de um Sistema Inteligente baseado em Redes Neurais Artificiais para o Reconhecimento Automático de Peças*. Relatório de estágio curricular, Florianópolis - SC - Brasil, 1999.
- [44] Alexandre Orth and Marcelo Ricardo Stemmer. Desenvolvimento e Implementação de um Sistema para Reconhecer Automaticamente Peças Mecânicas - Projeto RAP. In *Sociedade Brasileira de Computação - SBC*, volume 1, Belo Horizonte - MG - Brasil, 1998.
- [45] Torben Postel. *Ansteuerung einer flexiblen Beleuchtungseinheit für die automatisierte Messung von Werkzeugverschleiss an Fräsern*. Studienarbeit, Aachen - Alemanha, 2004.
- [46] R. S. Pressman. *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. McGraw Hill, 4 edition, 1996.
- [47] Rolf Bertrand Schroeter and Walter Lindolfo Weigaertner. *Processos de Fabricação Metal-Mecânica: Parte 2 - Tecnologia da Usinagem*. 2002.
- [48] Fritz Klocke and Wilfried König. *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer, 7 edition, 2002.
- [49] G. Spur and T. Stöferle. *Handbuch der Fertigungstechnik: Spanen*. Carl Hansen Verlag, 5 edition, 1979.
- [50] Sandvik Coromant. *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. Suécia, 1 edition, 1994.
- [51] Friedrich Rothhaupt, Erwin Meissner, and Hans Schenkel. *Einführung in die Produktionstechnik*, volume 1. Veb Verlag Technik Berlin, Leipzig, 1 edition, 1963.
- [52] Milton C. Shaw. *Metal Cutting Principles*. M.I.T. Press, Estados Unidos, 3 edition, 1968.
- [53] Caspar Erich Stemmer. *Ferramentas de Corte II*. Editora da UFSC, Florianópolis - SC - Brasil, 2 edition, 1995.
- [54] Dominic Deutges. *Automatisierte Werkzeugverschleiß-messung und -klassifizierung durch 2D-Auflicht-Sichtprüfung*. Tese de doutorado, Universidade Técnica de Aachen - RWTH, Aachen - Alemanha, 2005.

- [55] Paul H. Black. *Theory of Metal Cutting*. McGraw-Hill, Estados Unidos, 1 edition, 1961.
- [56] Eduardo Blanpain. *Teoria y Practica da las Herramientas de Corte*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1 edition, 1962.
- [57] The American Society of Mechanical Engineers. *Manual on Cutting of Metals*. ASME, Estados Unidos, 2 edition, 1952.
- [58] Alexandre Orth. *Projeto da Rede de Sensores e Atuadores de uma Célula de Produção e Desenvolvimento de um Exemplo de Aplicação empregando o Sistema Fieldbus CAN*. Projeto de fim de curso, Florianópolis - SC - Brasil, 2000.
- [59] André João de Souza. *Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis - SC - Brasil, 2004.
- [60] H. K. Tonshöff, J. P. Wulfsberg, H. J. J. Kals, and W. König. Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes. In *Annals of the CIRP*, volume 37, pages 611–622, 1988.
- [61] Dong-Woo Cho, Sang Jo Lee, and Chong Nam Chu. The State of Machining Process Monitoring Research in Korea. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39: 1697–1715, 1999.
- [62] Manuel Martins Barata. *Monitorização e Prognóstico de Anomalias em Processos de Fabricação com Máquinas Industriais: Um Sistema de Supervisão baseado em Aprendizagem Artificial*. Tese de doutorado, Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa - Portugal, 1996.
- [63] Linguo Gong and Kwei Tang. Monitoring Machine Operations using On-Line Sensors. *European Journal of Operational Research*, 96:479–492, 1997.
- [64] Larry P. Heck. Signal Processing Research in Automatic Tool Wear Monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing - ICASSP-93*, volume 1, pages 55–58, Minneapolis - MN - EUA, 1993.
- [65] Krzysztof Jemielniak and Jan Kosmol. Tool and Process Monitoring - State of Art and Future Prospects. In *Proceedings of the VI CIRP Workshop of Supervising and Diagnostics of Machining Systems*, volume 1, pages 90–112, 1995.

- [66] Toshimichi Moriwaki. Sensing and Prediction of Cutting Tool Failure. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 18(2):90–96, 1984.
- [67] Alexandre Orth. Seminário de Usinagem: Técnicas de Monitoramento do Desgaste de Ferramentas. 2000.
- [68] S. Kurada and C. Bradley. A Review of Machine Vision Sensors for Tool Condition Monitoring. *Computers in Industry*, 34:55–72, 1997.
- [69] Dae Kyun Baek, Tae Jo Ko, and Hee Sool Kim. Real Time Monitoring of Tool Breakage in a Milling Operation using a Digital Signal Processor. *Journal of Materials Processing Technology*, 100:266–272, 2000.
- [70] Marek Balazinski, Ernest Czogala, Krzysztof Jemielniak, and Jacek Leski. Tool Condition Monitoring using Artificial Intelligence Methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15:73–80, 2002.
- [71] Marek Balazinski and Krzysztof Jemielniak. Tool Conditions Monitoring using Fuzzy Decision Support System. In *Proceedings of V CIRP International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing*, Miedzeszyn, 1998.
- [72] Y. Choi, R. Narayanaswami, and A. Chandra. Tool Wear Monitoring in Ramp Cuts in End Milling using the Wavelet Transform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23:419–428, 2004.
- [73] H. M. Ertunc and K. A. Loparo. A Decision Fusion Algorithm for Tool Wear Condition Monitoring in Drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41:1347–1362, 2001.
- [74] A. Ghasemipoor, J. Jeswiet, and T. N. Moore. Real Time Implementation of On-Line Tool Condition Monitoring in Turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39:1883–1902, 1999.
- [75] Robert G. Landers and A. Galip Ulsoy. Model-Based Machining Force Control. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, 122:521–527, 2000.
- [76] Xiaoli Li, Alexandar Djordjevich, and Patri K. Venunod. Current-Sensor-Based Feed Cutting Force Intelligent Estimation and Tool Wear Condition Monitoring. In *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volume 47, pages 697–702, 2000.

- [77] Xiaoli Li, Shiu Kit Tso, and Jun Wang. Real-Time Condition Monitoring using Wavelet Transforms and Fuzzy Techniques. In *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 30, pages 352–357, 2000.
- [78] Qiang Liu and Yusuf Altintas. On-Line Monitoring of Flank Wear in Turning with Multilayered Feed-Forward Neural Network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39: 1945–1959, 1999.
- [79] Abhijit Nadgir and Tugrul Özel. Neural Network Modeling of Flank Wear for Tool Condition Monitoring in Orthogonal Cutting of Hardened Steels. In *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Design and Automation*, Orlando - FL - EUA, 2000.
- [80] Bernhard Sick. Classifying the Wear on Turning Tools with Neural Networks. In *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Network*, pages 1059–1064, 1997.
- [81] Bernhard Sick. Online Tool Wear Monitoring in Turning using Time-Delay Neural Networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 1, pages 445–448, Seattle - WA - EUA, 1998.
- [82] Les Atlas, Mari Ostendorf, and Gary D. Bernard. Hidden Markov Models for Monitoring Machining Tool-Wear. pages 3887–3890, 2000.
- [83] L. P. Heck and J. H. McClellan. Mechanical System Monitoring using Hidden Markov Models. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 3, pages 1697–1700, Toronto - Ont. - Canada, 1991.
- [84] J. Kopac and S. Sali. Tool Wear Monitoring during the Turning Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 113:312–316, 2001.
- [85] Siva Bala Narayanan, Jing Fang, Gary Bernard, and Les Atlas. Feature Representations for Monitoring of Tool Wear. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 6, pages 137–140, 1994.
- [86] Lane M. D. Owsley, Les E. Atlas, and Gary D. Bernard. Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring. In *Proceedings of the IEEE Transactions on Signal Processing*, volume 45, pages 2787–2798, 1997.
- [87] Chen XiaoQi, Zeng Hao, and Dietmar Wildermuth. *In-Process Tool Monitoring through Acoustic Emission Sensing*. Simtech technical report (at/01/014/amp), 2001.

- [88] Yingxue Yao, Xiaoli Li, and Zhejun Yuan. Tool Wear Detection with Fuzzy Classification and Wavelet Fuzzy Neural Network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39: 1525–1538, 1999.
- [89] Ming-Chyuan Lu and Elijah Kannatey-Asibu, Jr. Analysis of Sound Signal Generation due to Flank Wear in Turning. In *Proceedings of the International ME2000 Congress and Exposition*, Orlando - FL - EUA, 2000.
- [90] G. H. Lim. Tool-Wear Monitoring in Machine Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 51:25–36, 1995.
- [91] Litao Wang, Mostafa G. Mehrabi, and Elijah Kannatey-Asibu, Jr. Hidden Markov Model-Based Tool Wear Monitoring in Turning. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(3):651–658, 2002.
- [92] Amin Al-Habaibeh and Robert Parkin. An Autonomous Low-Cost Infrared System for the On-Line Monitoring of Manufacturing Processes using Novelty Detection. *The International Journal on Advanced Manufacturing Technology*, 22:249–258, 2003.
- [93] C. E. Costa. *Monitoramento do Processo de Torneamento de Desbaste via Corrente Elétrica do Motor Principal da Máquina e via Vibração da Ferramenta*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - Mestrado em Engenharia Mecânica, Campinas - SP - Brasil, 1995.
- [94] A. E. Diniz. *A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento, Critério de Fim de Vida da Ferramenta e Fatores de Influência*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas - Doutorado em Engenharia Mecânica, Campinas - SP - Brasil, 1989.
- [95] A. A. Kassim, Zhu Mian, and M. A. Mannan. Texture Analysis using Fractals for Tool Wear Monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 105–108, 2002.
- [96] H. K. Tönshoff, B. Karpuschewski, and C. Regent. Process Monitoring in Grinding using Micromagnetic Techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:694–698, 1999.
- [97] E. Catillo-Castañeda. On-Line Wear Detection of Milling Tools using a Displacement Fiber Optic Sensor. *Journal of Applied Research and Technology*, 1(2):164–174, 2002.

- [98] O. Ryabov and K. Mori. Laser Sensor for Imaging and Detection of Cutting Tool Wear. In *Proceedings of the ISA/IEEE Sensors for Industry Conference*, pages 44–46, Houston - Texas - EUA, 2002.
- [99] S. M. Ji, L. B. Zhang, J. L. Yuan, Y. H. Wan, X. Zhang, L. Zhang, and G. J. Bao. Method of Monitoring Wearing and Breakage States of Cutting Tools based on Mahalanobis Distance Features. *Journal of Materials Processing Technology*, 129:114–117, 2002.
- [100] M. A. Mannan, Ashraf A. Kassim, and Ma Jing. Application of Image and Sound Analysis Techniques to Monitor the Condition of Cutting Tools. *Pattern Recognition Letters*, 21:969–979, 2000.
- [101] T. Otto and L. Kurik. A Digital Measuring Module for Tool Wear Estimation. In *Annals of DAAAM International Symposium for Intelligent Manufacturing and Automation*, 2002.
- [102] A. Karthik, S. Chandra, B. Ramamoorthy, and S. Das. 3D Tool Wear Measurement and Visualisation using Stereo Imaging. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(11):1573–1581, 1997.
- [103] K. Niranjana Prasad and B. Ramamoorthy. Tool Wear Evaluation by Stereo Vision and Prediction by Artificial Neural Network. *Journal of Materials Processing Technology*, 112:43–52, 2001.
- [104] Min yang Yang and Oh dal Kwon. Crater Wear Measurement using Computer Vision and Automatic Focusing. *Journal of Materials Processing Technology*, 58:362–367, 1996.
- [105] Min yang Yang and Oh dal Kwon. A Tool Condition Recognition System using Image Processing. *Control Engineering Practice*, 6:1389–1395, 1998.
- [106] D. C. D. Oguamanam, H. Raafat, and S. M. Taboun. A Machine Vision System for Wear Monitoring and Breakage Detection of Single-Point Cutting Tools. *Computers and Industrial Engineering*, 26(3):575–598, 1994.
- [107] Kjeld Bruno Pedersen. Wear Measurement of Cutting Tools by Computer Vision. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 30(1):131–139, 1990.
- [108] Tilo Pfeifer and Lorenz Wiegers. Verfahren zur Wissensunabhängigen Automatischen Bildoptimierung in der Technischen Sichtprüfung. In *Sensor-Tagung*, Bad Nannheim, 1998.
- [109] Toshio Teshima, Toshiroh Shibusaka, and Masanori Takuma and Akio Yamamoto. Estimation of Cutting Tool Life by Processing Tool Image Data with Neural Network. In *Annals of the CIRP*, volume 42, pages 59–62, 1993.

- [110] Wolfgang Weis. Tool Wear Measurement on Basis of Optical Sensors, Vision Systems and Neuronal Networks (Application Milling). In *WESCON/'93 Conference Record*, pages 134–138, San Francisco - CA - EUA, 1993.
- [111] Wolfgang Weis. Processing of Optical Sensor Data for Tool Monitoring with Neural Networks. In *WESCON Conference Proceedings*, pages 351–355, Los Angeles - CA - EUA, 1994.
- [112] Marcelo Teixeira dos Santos, Ailson Rosetti de Almeida, and Carlos Chien Ching Tu. Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Monitoramento da Condição de Ferramentas de Corte utilizando Algoritmo de Extração das Características SFS. In *Anais do IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pages 292–297, São José dos Campos - SP - Brasil, 1999.
- [113] Nouri Levy, MengChu Zhou, and Yu Quan. Real-Time Tool Wear Identification using Sensor Integration with Neural Networks. In *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, pages 1050–1051, Lake Buena Vista - FL - EUA, 1994.
- [114] G. Littlefair, M. A. Javed, and G. T. Smith. Fusion of Integrated Multisensor Data for Tool Wear Monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995.
- [115] Y. M. Niu, Y. S. Wong, and G. S. Hong. An Intelligent Sensor System Approach for Reliable Tool Flank Wear Recognition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14:77–84, 1998.
- [116] Bernhard Sick. Fusion of Hard and Soft Computing Techniques in Indirect, Online Tool Wear Monitoring. In *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 32, 2002.
- [117] Kurapati Venkatesh, MengChu Zhou, and Reggie Caudill. Monitoring of Tool Wear using Artificial Neural Networks. In *Proceedings of the Americas Control Conference*, pages 2565–2569, Baltimore - Maryland, 1994.
- [118] R. J. Kuo and P. H. Cohen. Multi-Sensor Integration for On-Line Tool Wear Estimation through Radial Basis Function Networks and Fuzzy Neural Network. *Neural Networks*, 12:355–370, 1999.
- [119] Lei Ming, Yang Xiaohong, and Yang Shuzi. Tool Wear Length Estimation with a Self-Learning Fuzzy Inference Algorithm in Finish Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:537–545, 1999.

- [120] Sofiane Achiche, Marek Balazinski, Luc Baron, and Krzysztof Jemielniak. Tool Wear Monitoring using Genetically-Generated Fuzzy Knowledge Bases. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15:303–314, 2002.
- [121] E. R. Davies. *Machine Vision - Theory Algorithms Practicalities*. Elsevier - Morgan Kaufmann, 3 edition, 2005.
- [122] John C. Russ. *The Image Processing Handbook*. CRC Press - IEEE Press, 3 edition, 1998.
- [123] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Pearson Education, 2 edition, 2002.
- [124] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, and Brian G. Schunck. *Machine Vision*. McGraw Hill, 1 edition, 1995.
- [125] A. Erhardt-Ferron. *Theory and Applications of Digital Image Processing*. University of Applied Sciences Offenburg, 1 edition, 2000.
- [126] Bernd Jähne, Horst Haussecker, and Peter Geissler. *Handbook of Computer Vision and Applications - Sensors and Imaging*, volume 1. Academic Press, San Diego - CA, 1 edition, 1999.
- [127] Bernd Jähne, Horst Haussecker, and Peter Geissler. *Handbook of Computer Vision and Applications - Systems and Applications*, volume 3. Academic Press, San Diego - CA, 1 edition, 1999.
- [128] S. J. Sangwine and R. E. N. Horne. *The Colour Image Processing Handbook*. Chapman and Hall, 1 edition, 1998.
- [129] Linda Shapiro and George Stockman. *Computer Vision*. Prentice Hall, 1 edition, 2000.
- [130] K. Matshushima, T. Kawabata, and T. Sata. Recognition and Control of the Morphology of Tool Failures. In *Annals of the CIRP*, volume 28, pages 43–47, 1979.
- [131] D. Cuppini, G. D’Errico, and G. Rutelli. Tool Image Processing with Applications to Unmanned Metal-Cutting: A Computer Vision System for Wear Sensing and Failure Detection. *SPIE*, 701:416–422, 1986.
- [132] Y. H. Lee, P. Bandyopadhyay, and B. D. Kaminski. Cutting Tool Wear Measurement using Computer Vision. In *Proceedings of Sensor ’86 Conference*, pages 195–212, 1986.

- [133] Y. Maeda, H. Uchida, and A. Yamamoto. Estimation of Wear Land Width of Cutting Tool Flank with the Aid of Digital Image Processing Techniques. 21(3):211–213, 1987.
- [134] J. U. Jeon and S. W. Kim. Optical Flank Wear Monitoring of Cutting Tools by Image Processing. *Wear*, 127(2):207–217, 1988.
- [135] J. J. Park and A. G. Ulsoy. On-line Flank Wear Estimation using an Adaptive Observer and Computer Vision. *Journal of Engineering for Industry*, 115:37–43, 1993.
- [136] R. Du, B. Zhang, W. Hungerford, and T. Pryor. Tool Condition Monitoring and Compensation in Finish Turning using Optical Sensor. In *Proceedings of the 1993 ASME Winter Annual Meeting (Symposium of Mechatronics)*, 1993.
- [137] Bruce Eckel. *Thinking in C++ - Introduction to Standard C++*, volume 1. Prentice Hall, New Jersey, 2 edition, 2000.
- [138] Bruce Eckel and Chuck Allison. *Thinking in C++ - Practical Programming*, volume 2. Prentice Hall, New Jersey, 1 edition, 2003.
- [139] N. M. Josuttis. *The C++ Standard Library: A Tutorial and Reference*. Addison-Wesley, 1 edition, 1999.
- [140] Victorine Viviane Mizrahi. *Treinamento em Linguagem C++ - Módulo 1*, volume 1. Makron Books, São Paulo - SP - Brasil, 1 edition, 1995.
- [141] Victorine Viviane Mizrahi. *Treinamento em Linguagem C++ - Módulo 2*, volume 2. Makron Books, São Paulo - SP - Brasil, 1 edition, 1995.
- [142] Bjarne Stroustrup. *The C++ Programming Language - Special Edition*. Addison Wesley, 3 - special edition, 2000.
- [143] Grady Booch, James Rumbaugh, and Ivar Jacobson. *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison Wesley, 1 edition, 1999.
- [144] M. Fowler and K. Scott. *UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*. Addison Wesley, 1 edition, 1999.
- [145] J. R. Parker. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley, Estados Unidos, 1 edition, 1996.
- [146] William K. Pratt. *Digital Image Processing: PIKS Inside*. John Wiley and Sons, Estados Unidos, 3 edition, 2001.

- [147] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. PWS Publishing, Estados Unidos, 2 edition, 1998.
- [148] *Intel Image Processing Library - Reference Manual*. Intel Corporation, Estados Unidos, 2000.
- [149] *Open Source Computer Vision Library - Reference Manual*. Intel Corporation, Estados Unidos, 2001.
- [150] James A. Freeman and David M. Skapura. *Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Addison Wesley, 1 edition, 1991.
- [151] *Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools*. International Organization for Standardization - ISO, 1993.
- [152] *Optics and Optical Instruments Catalog*. Edmund Industrial Optics, Estados Unidos, 2005.
- [153] *Catalog 2002*. Linos, 2002.
- [154] *The Practical Application of Light*. Melles Griot, Estados Unidos, 1999.
- [155] David A. Forsyth and Jean Ponce. *Computer Vision: A Modern Approach*. Prentice Hall, 1 edition, 2002.
- [156] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Alemanha, 4 edition, 1997.
- [157] Gerhard X. Ritter and Joseph N. Wilson. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. CRC Press, 1 edition, 1996.
- [158] Bernd Jähne, Horst Haussecker, and Peter Geissler. *Handbook of Computer Vision and Applications - Signal Processing and Pattern Recognition*, volume 2. Academic Press, San Diego - CA, 1 edition, 1999.
- [159] Michael Seul, Lawrence O’Gorman, and Michael J. Sammon. *Practical Algorithms for Image Analysis - Description, Examples, and Code*. Cambridge, Estados Unidos, 1 edition, 2001.
- [160] Eduardo Pigozzi Cabral, Fernando Deschamps, and Marcelo Ricardo Stemmer. Algumas Aplicações da Transformada Discreta de Fourier no Processamento Digital de Imagens. In *Anais do II Simpósio Catarinense de Processamento Digital de Imagens - SCPDI*, volume 1, Florianópolis - SC - Brasil, 2002.
- [161] Erwin Kreyszig. *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley and Sons, Estados Unidos, 8 edition, 1999.

-
- [162] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab. *Signals and Systems*. Prentice Hall, Estados Unidos, 2 edition, 1997.
- [163] Guilherme Bittencourt. *Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias*. Editora da UFSC, 1 edition, 1998.
- [164] Z. L. Kovács. *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações*. Collegium Cognito, 2 edition, 1996.

