

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA COMPUTAÇÃO

CALIBRAÇÃO ANEMOMÉTRICA DE
AERONAVES USANDO PROCESSAMENTO DE
IMAGENS DIGITAIS

LUIZ EDUARDO GUARINO DE VASCONCELOS

Itajubá, dezembro 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA COMPUTAÇÃO

LUIZ EDUARDO GUARINO DE VASCONCELOS

CALIBRAÇÃO ANEMOMÉTRICA DE
AERONAVES USANDO PROCESSAMENTO DE
IMAGENS DIGITAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia da Computação como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em
Ciência e Tecnologia da Computação

Área de concentração: Sistemas de Computação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro

Co-orientador: Prof. Dr. Otávio Augusto Salgado Carpinteiro

Dezembro de 2011
Itajubá - MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

V331c

Vasconcelos, Luiz Eduardo Guarino de
Calibração Anemométrica de Aeronaves usando Processamento de Imagens Digitais / Luiz Eduardo Guarino de Vasconcelos. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2011.
121 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro.
Coorientador: Prof. Dr. Otávio Augusto Salgado Carpinteiro.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Processamento de Imagens. 2. Visão Computacional. 3. Ensaio em Voo. 4. Calibração Anemométrica. I. Pinheiro, Carlos Alberto Murari, orient. II. Carpinteiro, Otávio Augusto Salgado, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico todo este trabalho à minha eterna amiga Aline R. G. Rodrigues, que se privou de vários momentos, para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Também de maneira muito especial devo dedicar este trabalho aos meus pais e meu irmão que durante toda a vida me deram condições, apoio e incentivo para que eu pudesse progredir.

AGRADECIMENTOS

A Deus que nos orienta e mostra os caminhos que devemos seguir.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro, pela confiança atribuída a mim na elaboração deste trabalho e por sempre estar à disposição. Ao meu co-orientador professor Dr. Otávio Augusto Salgado Carpinteiro que desde a primeira entrevista para o programa de mestrado acreditou no meu potencial. Ao amigo Dr. Nelson Paiva Oliveira Leite pelo irrestrito apoio, pelos ensinamentos e oportunidades inesquecíveis. Com diretrizes seguras e muita paciência, estes três mestres, deram-me condições de desenvolver e finalizar este trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV) e a Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Guaratinguetá que acreditaram e apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos do IPEV e da FATEC pelo apoio, estímulo, ensinamentos e paciência, durante os anos de desenvolvimento deste trabalho.

À FUNCATE (Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais) e à UNIFEI pelo apoio financeiro nas viagens realizadas para apresentar os artigos gerados por este trabalho.

Aos amigos Jorge Tadano e André Y. Kusumoto pelas inúmeras conversas e sugestões, por permitirem o desenvolvimento deste trabalho e por contribuírem para o meu aperfeiçoamento.

Aos amigos Ferrucio F. Rosa, Luiza M. C. Bezerra e Lucas B. R. Souza por confiarem em mim e por enviarem as cartas de referência para meu ingresso na UNIFEI.

À minha cunhada Tálita Cristina pelo apoio nas traduções dos artigos publicados. Ao meu irmão Leandro Guarino de Vasconcelos pelas diversas horas de estudo compartilhadas, pelas discussões técnicas, pelos trabalhos realizados, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos.

Aos meus pais, Luiz Antonio e Margaret, que sempre me apóiam nos projetos importantes da vida e são exemplos de esperança, união e honestidade.

Minha gratidão à eterna companheira Aline R. G. Rodrigues, por sua amizade, incentivo, compreensão e apoio incondicional durante esses anos. Sem você esse trabalho não seria possível.

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação de técnicas de inteligência artificial nos ensaios em voo de calibração anemométrica de aeronaves. A primeira campanha de ensaios em voo realizada em uma aeronave experimental é a calibração anemométrica. Nesta campanha, as medidas de altitude e velocidade são providas pelo sistema anemométrico da aeronave e são informações primordiais para a segurança do voo. As medições dessas informações podem conter determinados erros que corrompem as medidas do sistema anemométrico, necessitando-se de um processo de medição independente que sirva para estimar a aferição do sistema. Para esta medição, um aplicativo foi desenvolvido usando técnicas de processamento de imagens e câmeras digitais comerciais. A avaliação deste aplicativo foi realizada com ensaios reais em aeronaves completamente instrumentadas de asas fixas e asas rotativas. Os resultados foram satisfatórios ao serem comparados com o método atual que usa instrumentação de ensaios, telemetria e sistema de navegação global por satélites.

Palavras-chave: Processamento de Imagens, Visão Computacional, Ensaios em Voo, Calibração Anemométrica.

ABSTRACT

This work presents the use of artificial intelligence techniques in Air Data System Calibration Flight Test Campaign (FTC). The first FTC carried out for an experimental aircraft is the calibration of its Air Data System. In this case, the measure of altitude and airspeed of the aircraft are provided by both anemometric along with the Flight Tests Instrumentation (FTI) systems that are corrupted by installation errors. Therefore, to improve efficiency, safety and effectiveness for this FTC, an application was developed using techniques image processing and digital cameras, in order to minimize these errors. The application detects the aircraft and reference points, calculates altitude and airspeed of the aircraft and determines validity of test point in FTC. Tests results demonstrated satisfactory performance for this application compared to Ground Telemetry System (GTS) and Global Navigation Satellite System (GNSS).

Keywords: Image Processing, Computational Vision, Flight Tests, Air Data System Calibration.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS	10
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. PROCESSAMENTO DE IMAGENS	19
2.1. Imagens Digitais.....	19
2.2. Etapas do Processamento de Imagem	19
2.3. Níveis de Quantização.....	22
2.4. Aquisição da Imagem.....	23
2.4.1. Câmeras Digitais	28
2.4.1.1. Sensores CCD.....	28
2.4.1.2. Sensores CMOS	29
2.5. Pré-processamento da Imagem.....	30
2.5.1. Realce ponto a ponto	30
2.5.1.1. Alargamento de contraste.....	30
2.5.1.2. Processamento de histograma	31
2.5.1.3. Equalização de histograma.....	32
2.5.1.4. Subtração de imagens.....	34
2.5.1.5. Imagens coloridas.....	35
2.6. Segmentação da Imagem.....	36
2.6.1 Detecção de descontinuidades.....	37
2.6.1.1. Detectores de pontos de interesse	38
2.6.1.2. Detectores de linhas.....	39
2.6.1.3. Detecção de bordas.....	40
2.6.1.4. Operadores de gradiente.....	41
2.6.2. Detecção de similaridades	46
2.6.2.1. Limiarização por histograma.....	46
2.6.2.2. Detecção de movimento	49
2.7. Morfologia Matemática.....	50

2.7.1.	Elemento estruturante.....	51
2.7.2.	Componentes Conectados	52
2.7.3.	Operações em morfologia matemática	54
2.7.3.1.	Algumas definições básicas.....	54
2.7.3.2.	Dilatação (\oplus) e Erosão (\ominus)	55
3.	ENSAIOS EM VOO	57
3.1.	Aquisição de Dados de Ensaios.....	60
3.2.	Calibração Anemométrica.....	63
3.2.1.	Requisitos para calibração anemométrica	68
4.	APLICATIVO	70
4.1.	Calibração das Câmeras	70
4.2.	Cenário da Campanha de Ensaio de Calibração Anemométrica.....	77
4.3.	Algoritmos desenvolvidos.....	81
4.3.1.	Detecção dos Pontos de Referência.....	81
4.3.2.	Detecção do Eixo Central da Pista	82
4.3.3.	Detecção da Aeronave.....	82
4.3.4.	Cálculo do TSPI	86
4.3.5.	Validação do Ponto de Ensaio.....	88
4.4.	Experimentos e Resultados	88
4.4.1.	Experimentos com a câmera HSC.....	91
4.4.2.	Experimentos com a câmera LSC CCD	99
4.4.3.	Experimentos com a câmera LSC CMOS.....	101
	CONCLUSÃO.....	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	ANEXO I.....	115

LISTA DE FIGURAS

1.1	Altitude da aeronave recebida pela ET.....	16
1.2	Velocidade da aeronave recebida pela ET	16
1.3	Altitude recebida pela ET em passagem da aeronave sobre a pista do aeroporto da cidade de São José dos Campos, mas com parâmetro indicando altitude inferior à pista.....	17
2.1	Etapas fundamentais em processamento de imagens digitais	20
2.2	Efeito da redução da resolução espacial (em <i>pixels</i>) (a) 1024x1024, (b) 512x512, (c) 256x256, (d) 128x128, (e) 64x64, (f) 32x32	22
2.3	Efeito da diminuição dos tons de cinza (bits): 256,128,64,32 e 16,8,4,2.....	23
2.4	Calibração da Câmera	24
2.5	Câmera <i>PinHole</i>	25
2.6	Projeção de uma imagem por uma câmera Pinhole	25
2.7	Distorção radial	25
2.8	Padrão Xadrez	26
2.9	Alargamento de contraste, forma de uma função de transformação	31
2.10	Luminosidade elevada (imagem clara)	31
2.11	Luminosidade baixa (imagem escura)	32
2.12	Imagem original	34
2.13	Imagem equalizada	34
2.14	Planos independentes de imagem coloridas	35
2.15	Mapa de cores para transformação de imagem RGB em tons de cinza	36
2.16	Máscara 3 x 3 genérica	37
2.17	Uma máscara usada para a detecção de pontos isolados a partir de um fundo constante	37
2.18	Horizontal	39
2.19	Vertical	39
2.20	Diagonal +45°	39
2.21	Diagonal -45°	39
2.22	Exemplos de bordas. (a) Degrau, (b) Linha, (c) Junção	40
2.23	Operador vertical de Prewitt	43
2.24	Operador horizontal de Prewitt	43
2.25	Operador vertical de Sobel	44
2.26	Operador horizontal de Sobel	44
2.27	Operadores de Roberts	44

2.28	Aplicação de algoritmos de detecção de bordas: (a) Imagem Original; (b) Operador de Prewitt; (c) Operador de Sobel; (d) Operador de Roberts; (e) Operador de Canny	45
2.29	Exemplo de histograma bimodal de uma digital (<i>fingerprint</i>)	47
2.30	Exemplo de histograma multimodal (Lena)	48
2.31	Elemento estruturante com vizinhança de 4 pixels (N_4)	51
2.32	Retículas como vizinhança (Marchand-Maillet e Sharaiha, 2000)	52
2.33	Representação matricial de uma imagem <i>Ib</i> . Em branco, o conjunto <i>B</i> e em cinza o conjunto <i>F</i>	53
2.34	Imagem <i>Ib</i> após rotulação	54
3.1	Fases da campanha de ensaios em voo	59
3.2	Arquitetura para aquisição de dados	60
3.3	Arquitetura da Estação de Telemetria no IPEV	62
3.4	Diagrama de Bloco da Calibração Anemométrica	65
3.5	Método Tower-Fly-By	66
3.6	Exemplo de Ponto de Ensaio com baixa altitude	67
3.7	Arquitetura do SALEV	68
4.1	Placa de calibração	70
4.2	HSC	71
4.3	LSC CMOS	71
4.4	LSC CCD	71
4.5	Conjunto de imagens usadas na calibração da câmera LSC CCD	71
4.6	Vértices externos selecionados na primeira imagem do conjunto de imagens	72
4.7	Vértices internos selecionados na segunda imagem do conjunto de imagens	73
4.8	Re-projeção dos Erros para a oitava imagem do conjunto	74
4.9	Re-projeção dos Erros	74
4.10	Parâmetros extrínsecos	75
4.11	Modelo Completo de Distorção	76
4.12	Erro de re-projeção sem otimização	76
4.13	Erro de re-projeção com otimização	76
4.14	Ponto de Ensaio Válido com a aeronave XAT-26	78
4.15	Ponto de Ensaios válido com helicóptero H-55	78
4.16	Local da Campanha de Calibração Anemométrica	78
4.17	Pontos de Ensaio com contraste/iluminação diferentes	79
4.18	Ponto de Referência Original (PR).....	79

4.19	Ponto de Referência provido pela Câmera HSC. Neste caso, 6 x 6 <i>pixels</i>	79
4.20	Tela de configuração do aplicativo	81
4.21	Arquitetura do aplicativo	81
4.22	Pista e ponto de referência destacados na imagem após aplicação do algoritmo.....	82
4.23	Imagem de um ponto de ensaio com o XAT-26	83
4.24	Exemplo de imagem de fundo de um ponto de ensaio	83
4.25	Imagem de um ponto de ensaio com o H-55	83
4.26	Exemplo de imagem de fundo de um ponto de ensaio	83
4.27	Imagem Residual com Método de Sobel	84
4.28	Exemplo de CCL da aeronave XAT-26	85
4.29	<i>Pixels</i> do Perímetro da Aeronave XAT-26.....	85
4.30	Exemplo de CCL do helicóptero H-55.....	85
4.31	<i>Pixels</i> do Perímetro do helicóptero H-55	85
4.32	Exemplo da cauda como ponto de referência na aeronave	86
4.33	Exemplo de posição do Centróide (ponto azul) e variação da área do helicóptero em função do movimento das pás do rotor principal	87
4.34	Cálculo da altitude.....	87
4.35	HELIBRAS Esquilo (HB-350-1)	89
4.36	EMBRAER Xavante jet (XAT-26)	89
4.37	Exemplo de Trajetória do Voo não alinhada ao Eixo Central da Pista.....	90
4.38	Exemplo de ponto de ensaio com aeronave EMBRAER XAT-26	91
4.39	Exemplo de ponto de ensaio com helicóptero HELIBRAS H-55	91
4.40	Posição do GPS na aeronave	92
4.41	Custo computacional dos algoritmos	93
4.42	Altitude de referência e calculada pelo aplicativo para a aeronave H-55 usando o centróide como ponto de referência na aeronave	93
4.43	Altitude de referência e calculada pelo aplicativo para a aeronave H-55 usando a cauda como ponto de referência na aeronave	94
4.44	Exemplo de quadro com dois CCLs para o helicóptero.....	94
4.45	Altitude calculada pelo aplicativo e medida no GPS para a aeronave XAT-26	95
4.46	Altitude calculada pelo aplicativo e pela ET com o helicóptero H-55	95
4.47	Altitude calculada pelo aplicativo, ET e GPS com a aeronave XAT-26	96
4.48	Incerteza associada à altitude com H-55	96
4.49	Incerteza associada à altitude com XAT-26	97

4.50	Velocidade calculada pelo aplicativo e pela ET para a aeronave H-55	97
4.51	Velocidade calculada pelo aplicativo e pela ET para a aeronave XAT-26	98
4.52	Comportamento típico da velocidade recebida pela ET	98
4.53	Altitude de referência e calculada pelo ALG#1 para a aeronave H-55	99
4.54	Altitude de referência e calculada pelo ALG#2 para a aeronave H-55	99
4.55	ALG#1 e ALG#2 no mesmo gráfico para cálculo da altitude.....	100
4.56	Incerteza associada do ALG#1	100
4.57	Incerteza associada do ALG#2	100
4.58	Altitude calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET	100
4.59	Altitude calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET	100
4.60	Velocidade calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.....	101
4.61	Velocidade calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.....	101
4.62	Medida de Referência e Altitude Calculada com ALG#1.....	102
4.63	Medida de Referência e Altitude Calculada com ALG#2.....	102
4.64	Altitude calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET	102
4.65	Altitude calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET	102
4.66	Incerteza associada ao ALG#1	102
4.67	Incerteza associada ao ALG#2	102
4.68	Velocidade calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.....	103
4.69	Velocidade calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.....	103
4.70	Custo computacional do ALG#2.....	103
4.71	Altitude calculada pelo ALG#2 e pelo GPS.....	104
4.72	Altitude calculada pelo ALG#2, pela ET e pelo GPS	104

TABELAS

4.1	Erros para posição dos <i>pixels</i> após calibração das câmeras	77
4.2	Padrão de cores e frequência de aquisição das câmeras.....	80

1. INTRODUÇÃO

A representação e processamento de informações visuais têm um papel fundamental em várias áreas das atividades humanas. Desde tempos remotos, as imagens apresentam diferentes funções no nosso cotidiano, tanto em representações gráficas que auxiliam o entendimento e o registro de informações para posterior recordação, como em aplicações práticas como a automação de tarefas repetitivas ou mesmo perigosas, e nas manifestações artísticas que expressam diversos sentimentos e manifestações humanas.

O advento das tecnologias da informação trouxe ferramentas poderosas para o tratamento das imagens, colaborando para avanço científico-tecnológico em diversos campos, além de fornecer a capacidade de criação de novas possibilidades de aplicações. Métodos de processamento de imagens digitais são utilizados para melhoria da informação visual para a interpretação humana e/ou para processamento de dados para sistemas automatizados.

Quando uma imagem é processada para interpretação visual, o observador é quem decidirá sobre a qualidade do desempenho de um método particular, sendo esta avaliação um processo altamente qualitativo. Quando o problema envolve o processamento de imagens para percepção por máquinas a tarefa de avaliação pode ser mais quantitativa. Entretanto, mesmo em situações em que um critério de desempenho possa ser definido para o problema, o analista usualmente terá de realizar diversas tentativas antes de poder estabelecer uma abordagem adequada de processamento.

Atualmente existem centenas de milhares de trabalhos utilizando técnicas de processamento de imagens nas mais diversas áreas do conhecimento. Na área aeroespacial, as imagens têm sido usadas como fonte de informação para interpretação visual, por exemplo, para campanhas de ensaio em voo. As atividades de ensaios em voo são um dos pilares para o aperfeiçoamento do desenvolvimento da capacidade aeroespacial de uma nação.

A campanha de ensaios em voo é uma atividade da engenharia aeronáutica que tem por finalidade determinar as reais características de uma aeronave e/ou de um sistema aeronáutico qualquer. A primeira campanha de ensaios em voo a ser realizada em uma aeronave experimental é a calibração anemométrica. Nesta campanha, a aeronave tem as medidas de altitude e velocidade providas pelo sistema anemométrico através da Instrumentação de Ensaios em Voo (*Flight Test Instrumentation* - FTI). Estas medidas podem ser corrompidas e apresentar determinados erros. Este fenômeno é conhecido como Erro de Posição. As causas dos erros são decorrentes da influência aerodinâmica que a aeronave causa

na atmosfera. Assim, tais erros são conhecidos e podem ser modelados e minimizados. O processo de minimização deste erro de posição utiliza um modelo, cuja curva relaciona o Erro de Posição em Função do Número de Mach Básico. Os coeficientes do polinômio ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados desta curva são determinados experimentalmente pela Campanha de Ensaio em Voo de Calibração Anemométrica. Estes erros devem ser corrigidos comparando-os com medidas de referência que podem ser providas por múltiplos sensores, tais como: estação meteorológica (WRS); sistema de telemetria (ET) e/ou sistema de posicionamento global diferencial (DGPS).

O método mais usado na campanha de ensaios em voo é por passagem pela torre (i.e. *tower fly-by*) (EDWARDS, 1966) que necessita do conhecimento exato da altitude de referência da aeronave. Este método calcula os erros comparando as medidas obtidas pelo sistema *pitot*-estático da aeronave com as medidas de referência que são obtidas pelo WRS e transladadas para a altura da passagem. A determinação desta diferença de pressão (geralmente conhecida como erro de posição do sistema estático) é realizada abrangendo todas as condições de voo possíveis da aeronave (i.e. envelope de voo). Este é um procedimento complexo que consome tempo de planejamento e execução, além de ser custoso. Durante as campanhas de ensaio, os dados da instrumentação são recebidos em tempo-real pelo sistema de telemetria e estão relacionados com medidas complementares oriundas de outros sensores (por exemplo, WRS). A telemetria é constituída por uma estação de monitoramento onde os dados recebidos são apresentados para que sejam observadas violações dos parâmetros críticos para a segurança de voo do ensaio. Eventuais ruídos presentes no sinal medido e perdas de informações são características inerentes ao canal de comunicação da telemetria. Isto limita a confiabilidade da telemetria prejudicando a segurança do voo. Além disso, toda redução de dados requer um longo tempo de processamento, e desta forma são realizadas em operações após o término da execução dos ensaios. Assim, em geral, a eficiência não é ótima e a segurança de voo é comprometida neste tipo de ensaio.

O comportamento típico de sensores instalados em uma aeronave instrumentada com os dados recebidos e processados pela FTI na ET é mostrado nas Figuras 1.1 e 1.2. As informações exibidas, respectivamente, são a altitude da aeronave (EMBRAER XAT-26) em pés e a velocidade da aeronave em *knots*. Neste ensaio a aeronave encontra-se estacionada com motor ligado na pista do aeroporto (de São José dos Campos). Neste caso, o sinal recebido pela telemetria apresenta uma variação de 14 pés (i.e. ~4,26 m) na altitude, e aproximadamente 4

knots (i.e. $\sim 7,4$ km/h) na velocidade. A principal fonte dos erros apresentados nas figuras é causada pela resolução das medidas da FTI.

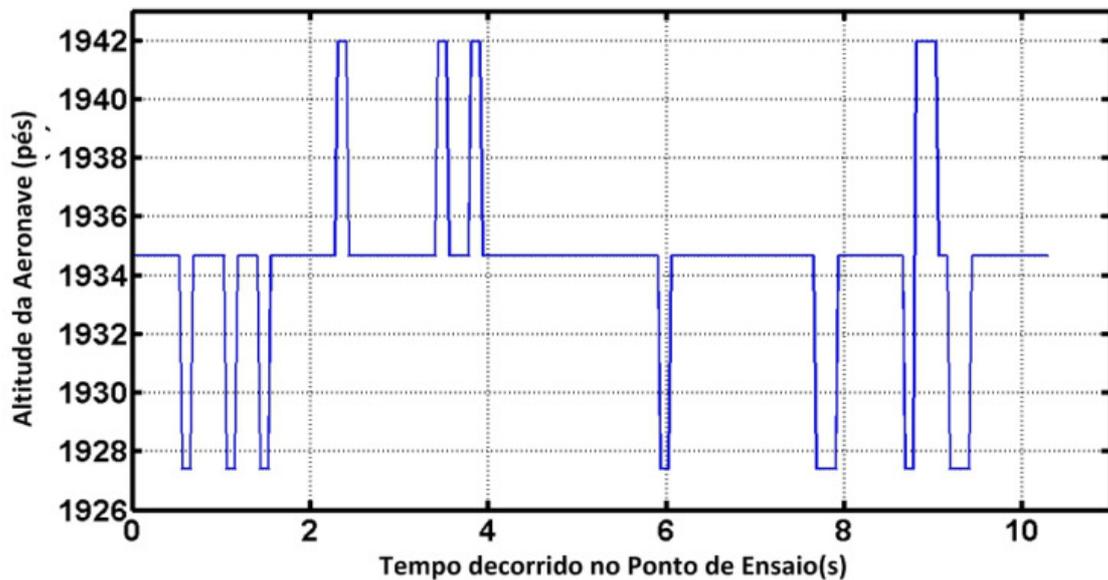


FIGURA 1.1 – Altitude da aeronave recebida pela ET.

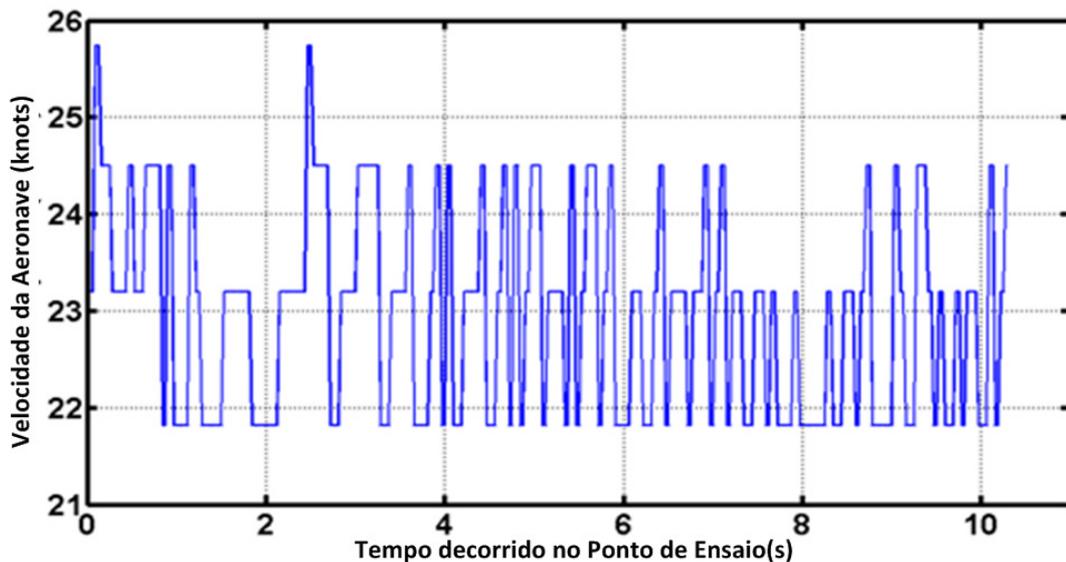


FIGURA 1.2 – Velocidade da aeronave recebida pela ET.

A Figura 1.3 ilustra a informação da altitude recebida pela ET num voo da aeronave em alta velocidade (e.g. mais que 400 *knots* i.e. 740,8 km/h), e baixa altitude (e.g. 27,7 pés i.e. 8,45 m) passando sobre a pista do aeroporto, que está a aproximadamente 1934 pés (i.e. $\sim 589,5$ m) em relação ao nível do mar. Nota-se que a altitude medida pela FTI é inferior à altitude da pista do aeroporto em quase 500 pés (i.e. 152,4 m), situação indesejada. Estas condições operacionais são extremamente perigosas podendo levar a um desastre, gerando a

necessidade do uso de sistemas de medições adequados em tempo-real para acompanhamento do voo.

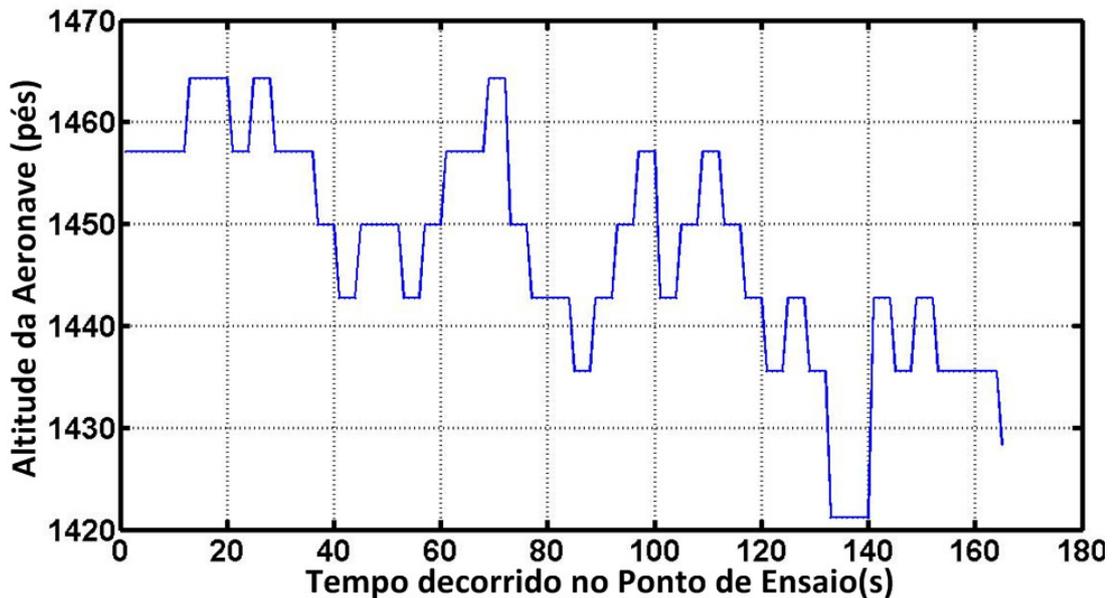


FIGURA 1.3 – Altitude recebida pela ET em passagem da aeronave XAT-26 sobre a pista do aeroporto da cidade de São José dos Campos, com indicação de altitude inferior a da pista.

A utilização de informações de imagens para o propósito de estimação da aferição da instrumentação de voo constituía uma atividade complexa devido ao uso de imagens em movimento, influenciadas por alguns fatores como resolução, sensibilidade, velocidade de aquisição e processamento. Atualmente, com o desenvolvimento da eletrônica, uma câmera de vídeo digital pode produzir imagens em alta resolução, em alta taxa de amostragem e com boa sensibilidade. Isto possibilita a utilização de técnicas de processamento de imagens em ensaios de calibração anemométrica.

Para melhorar a eficiência de sistemas de telemetria, o Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV) juntamente com Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER) desenvolveu um novo conceito, no qual os dados são processados de imagens reais de aeronaves (LEITE et al, 2009) e os resultados finais e relatórios dos ensaios são gerados no final de cada ponto de ensaio válido (LEITE, LOPES e WALTER, 2009). Uma das aplicações desenvolvidas foi para o ensaio de calibração anemométrica. Esta aplicação calcula apenas a altitude da aeronave a partir das imagens dos pontos de ensaio da calibração anemométrica. O procedimento utiliza câmeras digitais de alta taxa de amostragem e o processamento das imagens resultantes é realizado após o ensaio de voo ser concluído. Este aplicativo não calcula a velocidade da aeronave e não valida o ponto de ensaio em tempo real. Isto limita a segurança e a eficiência deste tipo de ensaio.

O objetivo deste trabalho é aumentar a eficácia, eficiência, exatidão das informações e segurança deste tipo de ensaio. Para isso foi proposto o uso de uma câmera digital de vídeo com a finalidade de gravar integralmente cada ponto de ensaio desse tipo de campanha e o desenvolvimento de um aplicativo específico usando processamento de imagens.

Foram usadas dois tipos de câmeras digitais: uma de alta taxa de amostragem (e.g. 400 amostras por segundo) e duas câmeras convencionais (e.g. baixo custo, 30 amostras por segundo). Usando a câmera de alta taxa de amostragem é possível coletar e analisar mais informações que as outras duas fontes de informação, telemetria e GPS (i.e. telemetria possui 32 amostras por segundo e GPS possui 10 amostras por segundo). Isto aumenta a segurança deste tipo de ensaio. Ao usar câmeras convencionais é possível reduzir os custos operacionais deste tipo de ensaio além de ser uma alternativa para quando a câmera de alta taxa de amostragem não estiver disponível devido a outros ensaios que podem ser realizados simultaneamente em outras localidades.

Um ponto de ensaio tem a duração menor que 6 segundos. Isto chega a gerar 1 Gigabyte de vídeo para o ponto de ensaio. Além disso, as condições meteorológicas entre os pontos de ensaio podem variar rapidamente o que dificulta a percepção automática por máquinas.

O aplicativo desenvolvido necessita de uma prévia configuração pelo utilizador no início da campanha de ensaio e todo o restante do processamento é feito usando percepção automática por máquinas. O aplicativo processa os quadros das imagens do vídeo e determina a validade do ponto de ensaio em quase tempo-real. Isto aumenta a segurança e a eficiência dos ensaios. Técnicas de processamento de imagens são utilizadas com a finalidade de extrair as informações pertinentes ao ensaio realizado.

Foram realizados testes em 269 pontos de ensaios e 444.628 quadros. Os resultados do aplicativo foram comparados aos resultados gerados pela telemetria e pelo GPS e foram satisfatórios. O aumento da exatidão das informações é conseguido pelo baixo erro que o aplicativo gera, além de ser mais uma fonte de informação para este tipo de ensaio.

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira. No capítulo 2 são detalhadas as técnicas de processamento de imagens utilizadas no desenvolvimento do trabalho. O capítulo 3 detalha o cenário de ensaios em voo e a campanha de calibração anemométrica. O capítulo 4 mostra a arquitetura da aplicação proposta, os algoritmos desenvolvidos e os testes realizados. Por fim, o trabalho é concluído com a descrição dos resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros.

2. PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Este capítulo aborda os principais conceitos e técnicas de processamento de imagens digitais utilizadas neste trabalho.

2.1. Imagens Digitais

Segundo Jain (1989), uma imagem digital é uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por $f(x, y)$, em que o valor ou amplitude da função nas coordenadas espaciais fornece a intensidade (brilho ou níveis de cinza) naquele ponto. Como a informação luminosa é uma forma de energia, a função em questão deve ser positiva e finita (1).

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

A imagem digital pode ser considerada uma matriz cujos índices de linhas e colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz são chamados de *pixels* ou *pels*, que são abreviações da palavra *picture elements*.

2.2. Etapas do Processamento de Imagem

O processamento de imagens digitais abrange equipamentos, aplicativos e processamentos associados conforme ilustrado na Figura 2.1.

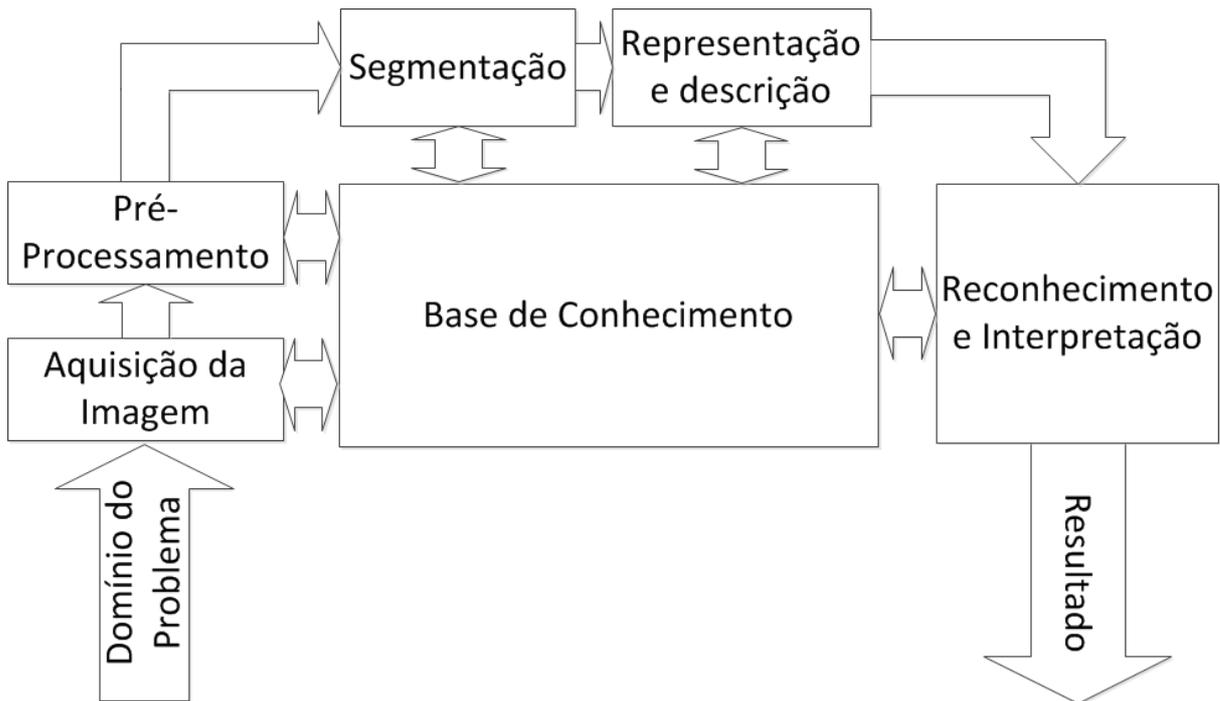


FIGURA 2.1 – Etapas fundamentais em processamento de imagens digitais (Gonzales e Woods, 2000)

A primeira etapa consiste na aquisição da imagem digital. Para isto, é necessário um sensor de imageamento sensível a uma banda do espectro de energia eletromagnética (e.g. luz visível, infravermelha, ultravioleta) que produza um sinal elétrico de saída proporcional ao nível de energia recebida. Além disso, é necessário um processo de quantização para digitalizar o sinal produzido pelo sensor. A natureza do sensor e da imagem que ele produz é determinada pela aplicação desejada.

Após a obtenção de uma imagem digital, o próximo passo será realizar o pré-processamento da imagem adquirida. O objetivo é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances para o sucesso dos processos seguintes. Basicamente, existem duas grandes categorias para realce de imagens: métodos no domínio espacial e métodos no domínio da frequência. As técnicas espaciais referem-se ao próprio plano da imagem, e as abordagens dessa categoria são baseadas na manipulação direta dos *pixels* das imagens. Técnicas de processamento no domínio da frequência são baseadas em transformadas de Fourier das imagens e necessitam transformar imagens do domínio espacial para o domínio da frequência através de operações de convolução (SEARA, 1998). Estas transformações e operações demandam alto custo computacional e não são recomendadas para aplicações em tempo-real, desta forma, apenas as técnicas do domínio espacial serão abordadas nesse trabalho.

O próximo estágio é a segmentação. Para Carvalho (2006), “segmentação é um processo que tipicamente divide em partições o domínio espacial de uma imagem em subconjuntos mutuamente exclusivos, chamados segmentos ou regiões.” Cada região é homogênea e uniforme considerando-se algumas propriedades como tom ou textura e cujos valores diferem em alguns aspectos e significados, das propriedades de cada região vizinha, ou seja, a segmentação é o processo de subdividir uma imagem em suas partes ou objetos constituintes. Segundo Gonzales e Woods (2000), a segmentação automática é uma das tarefas mais difíceis no processamento de imagens digitais e para Ziou e Tabbone (1998), um bom método de segmentação pode encontrar os objetos de interesse com pouco esforço computacional.

As principais técnicas de segmentação de imagens em escala de cinza se baseiam nas propriedades de descontinuidade ou similaridade dos valores de intensidade dos *pixels*. Existem também as técnicas que utilizam a variação da posição dos objetos em função do tempo para executar ou aprimorar o processo de segmentação. Técnicas de morfologia matemática também são freqüentemente utilizadas para segmentação. Estas técnicas analisam a estrutura geométrica inerente ao objeto de interesse e assim são capazes de extrair objetos com formatos semelhantes em um determinado cenário. Estas técnicas são excelentes para o caso de segmentação de objetos claramente distinguíveis através de sua forma.

A finalização do estágio de segmentação é constituída tipicamente por dados em forma de *pixels*, correspondendo tanto à fronteira de uma região como a todos os pontos dentro da mesma. Desta forma, a primeira tarefa é determinar se os dados devem ser representados como fronteiras e/ou regiões completas. A representação por fronteira é adequada quando o interesse se concentra nas características da forma externa. A representação por regiões é adequada quando o interesse se concentra em propriedades internas. Outra tarefa é determinar um método para descrever os dados, de forma que as características de interesse sejam enfatizadas. O processo de seleção de características procura extrair dados que resultem em alguma informação qualitativa de interesse, ou que sejam básicas para a discriminação entre classes de objetos.

O último estágio é o reconhecimento e interpretação. Reconhecimento é o processo que atribui um rótulo a um objeto, baseada na informação fornecida pelo seu descritor. Enquanto que a interpretação envolve a atribuição de significado a um conjunto de objetos reconhecidos.

O conhecimento sobre o domínio do problema está codificado em um sistema de processamento de imagens na forma de uma base de conhecimento que guia a operação de

cada módulo de processamento e controla a interação entre os módulos. Em alguns casos, a existência de todos os módulos não é obrigatória, como, por exemplo, o realce de imagens para interpretação humana que não passa do estágio de pré-processamento.

2.3. Níveis de Quantização

A projeção da imagem no plano xy do elemento sensor (e.g. Filme, Semicondutor CMOS) será resolvida em $M \times N$ elementos cujas coordenadas são x_M e y_N . Este processo é chamado de digitalização de uma imagem. A intensidade luminosa incidente em cada um dos $M \times N$ elementos de uma imagem digitalizada é quantizada em k níveis de cinza e/ou em cores. Assim, para um elemento sensor de área S , o aumento da resolução de uma imagem em função do aumento da densidade de pontos (i.e. Z pixels/cm²) do processo de digitalização melhora a definição de uma imagem. Por outro lado, o aumento dos níveis de quantização de uma imagem melhora a sensibilidade luminosa. Além disso, o aumento da resolução e dos níveis de quantização influenciam no armazenamento de dados e no processamento relacionado que também serão aumentados. À medida que a resolução espacial e a quantização de níveis de cinza diminuem, a imagem digital é degradada na sua representação equivalente. Se a resolução cai de n para $n-1$, a densidade de pixels cai de n^2 para $(n-1)^2$. Os *pixels* em imagens de menor resolução são replicados produzindo o efeito xadrez (Figura 2.2).

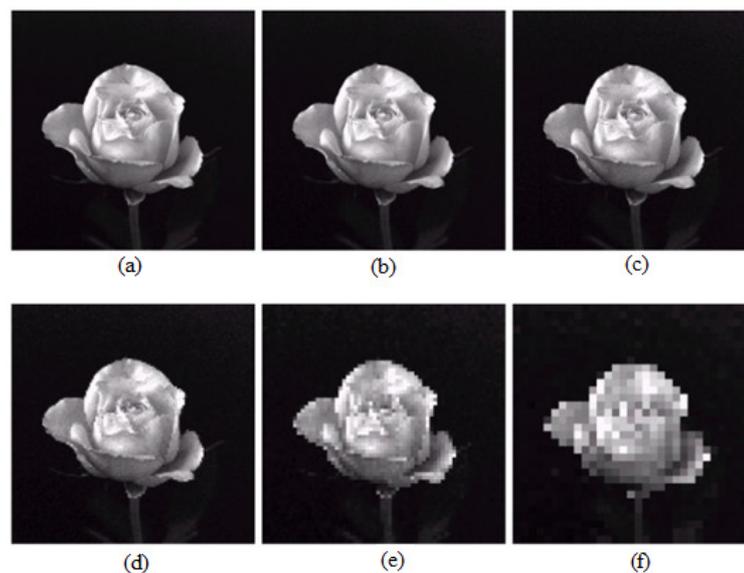


FIGURA 2.2 - Efeito da redução da resolução espacial (em *pixels*) (a) 1024x1024, (b) 512x512, (c) 256x256, (d) 128x128, (e) 64x64, (f) 32x32.

Ao manter a resolução espacial e diminuir o número de bits utilizados para representar o número de níveis de cinza em uma imagem, ocorre a degradação da sensibilidade luminosa da imagem, porém, as imagens serão visualmente idênticas em relação à forma e área. O uso desta técnica pode produzir o efeito denominado falso contorno que é visível normalmente em imagens que usam 16 ou menos níveis de cinza, como pode ser visto no experimento de Huang (1975) ilustrado na Figura 2.3.

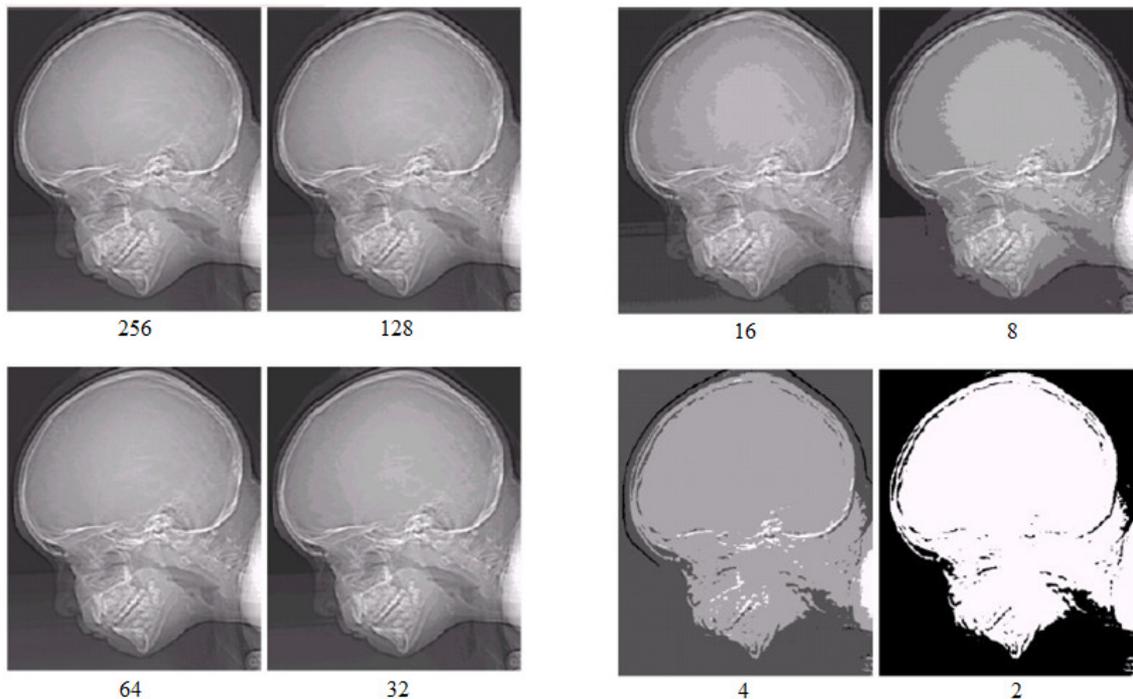


FIGURA 2.3 - Efeito da diminuição dos tons de cinza (número de bits).

Determinar a melhor resolução espacial e a quantização de níveis de cinza é importante para que imagens possam ser obtidas com a qualidade e desempenho necessários para cada tipo de aplicação.

2.4. Aquisição da Imagem

Dois elementos são essenciais para aquisição de imagens digitais. O primeiro é um dispositivo físico que seja sensível a uma banda do espectro de energia eletromagnética, e que produza um sinal elétrico de saída proporcional a energia percebida. O segundo, chamado, digitalizador, é um processo de conversão da saída elétrica de um dispositivo de sensoramento físico para a forma digital correspondente.

A técnica que permite extrair de fotografias informações como medidas, dimensões e posição dos objetos nas imagens é chamada de fotogrametria. Fotogrametria é a arte, ciência,

e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre os objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões da energia eletromagnética radiante e outros fenômenos (SLAMA, THEURER, HENRIKSEN, 1980). Em processos de fotogrametria é necessário conhecer os parâmetros de calibração de câmeras, visto que os mesmos são de fundamental importância na obtenção das medidas em imagens. Wolf (1983) afirma que, em termos de exatidão, o conhecimento do grupo de parâmetros necessários à reconstrução do feixe perspectivo gerador da imagem fotográfica no instante da exposição, é de fundamental importância, sendo que tais parâmetros são obtidos por processos de calibração.

Merchand (1979) afirma que em processos de calibração de câmeras, a maioria dos métodos utilizados é analítica, tornando a utilização da tecnologia computacional essencial para o processamento dos dados. O processo envolve uma grande quantidade de dados matriciais que em função da tecnologia utilizada para processamento, tem diminuído o tempo necessário para esta finalidade e agilizado o processo resultante. A calibração da câmera consiste no processo de determinar dados geométricos digitais e óticos da câmera, admitindo que seja conhecido um conjunto de pares de pontos bidimensionais (2D) em uma imagem e seus respectivos pontos tridimensionais (3D) conforme ilustrado na Figura 2.4. O processo de calibração de qualquer elemento (e.g. Lentes) tem como objetivo determinar um modelo para minimização dos erros sistemáticos. Maiores detalhes podem ser vistos em Carvalho et al. (2005).

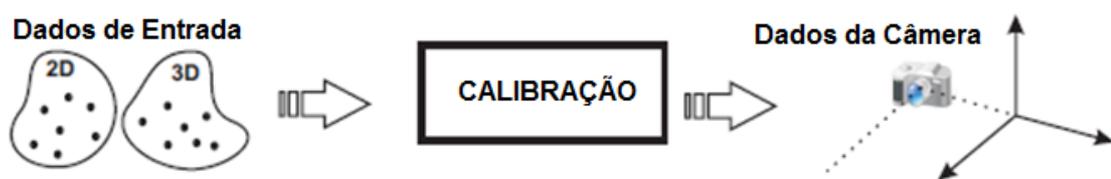


FIGURA 2.4 - Calibração da Câmera

Em uma câmera sem lente contendo apenas um orifício por onde a luz é captada para o interior da câmera, denominada de câmera *PinHole*, a imagem formada é determinada pela intersecção dos raios luminosos com o fundo da câmera (Figura 2.5).

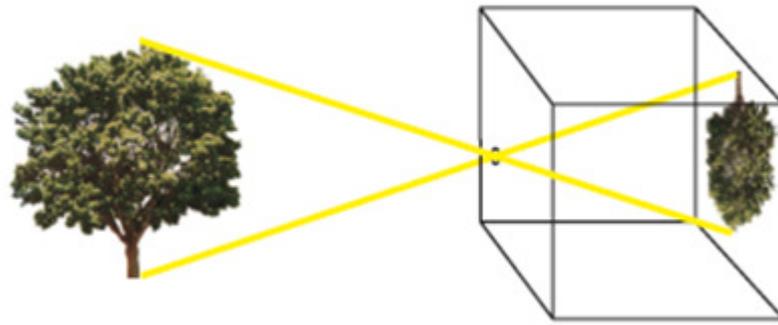


FIGURA 2.5 - Câmera *PinHole*.

A câmera *PinHole* produz um processo de calibração ideal, onde é associado a cada ponto “P” do espaço tridimensional ao ponto “p” correspondente do espaço bidimensional no plano de formação da imagem (Figura 2.6). Para produzir uma imagem nítida a abertura do orifício deve ser pequena o suficiente, o que provocaria uma intensidade de luz baixa, já que poucos raios seriam captados pela câmera.

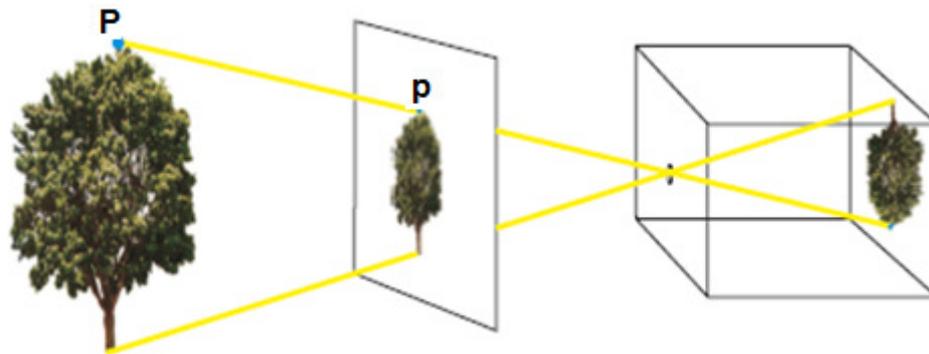


FIGURA 2.6 - Projeção de uma imagem por uma câmera *Pinhole*.

Este problema pode ser solucionado através do uso de lentes, onde o orifício possui uma abertura maior permitindo uma maior intensidade de luz na formação da imagem. Em contrapartida, a modelagem exata do comportamento das lentes se torna impraticável devido a sua complexidade. Além disso, distorções podem ser apresentadas devido às irregularidades das lentes. Um exemplo de distorção é a distorção radial que provoca uma curvatura nas bordas das imagens (Figura 2.7).

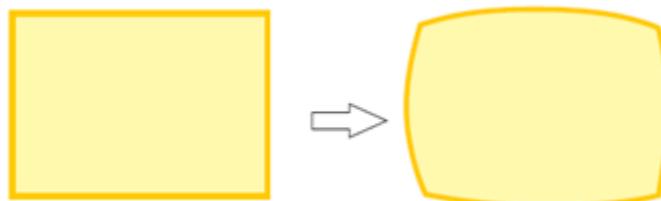


FIGURA 2.7 - Distorção radial.

Com as distorções, o processo de calibração de câmera torna-se um sistema de equações não-lineares que pode ser resolvido através de um procedimento de otimização não-linear.

A maioria dos métodos de calibração funciona através da captura de imagens de um padrão de calibração. O padrão é construído de forma que seja relativamente fácil determinar pontos cujas coordenadas sejam conhecidas. O padrão mais conhecido e utilizado é o Padrão Xadrez (Figura 2.8), devido à simplicidade de obter as coordenadas de seus pontos.

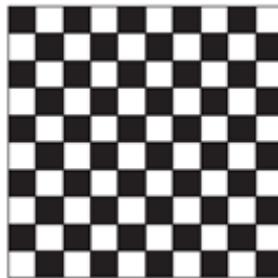


FIGURA 2.8 - Padrão Xadrez.

O conjunto de pontos 2D é extraído de uma imagem padrão adquirida pela câmera a ser calibrada. As imagens são utilizadas para fazer a correspondência entre os pares de pontos 2D e 3D, e dependendo do método podem ser utilizadas várias imagens de ângulos diferentes. A partir do padrão e das imagens obtidas, é necessário algum método para obter os pares de pontos correspondentes que serão utilizados na calibração.

Para simplificar o problema de calibração de câmeras, várias considerações podem ser feitas, como por exemplo:

- Ignorar a distorção das lentes;
- Considerar que os *pixels* são quadrados;
- Assumir pontos coplanares;
- Considerar que a projeção do centro óptico coincide com o centro da imagem.

Desta forma, vários métodos podem ser propostos. Em geral, os métodos consistem em resolver um problema de otimização não-linear, quando se consideram as distorções das lentes, e utilizam pontos tridimensionais de um padrão e suas respectivas projeções em imagens.

Existem diversos métodos de calibração de câmera sendo que os mais conhecidos são os descritos em Tsai (1987), Heikkilä (1997), Bakstein (1999) e Zhang (2000).

Olivas (1980) define alguns critérios para a escolha do processo de calibração:

- Ser aquele que melhor atenda os atuais conceitos de calibração de sistemas de mensuração;

- Exigir o menor tempo de retenção do equipamento a ser calibrado;
- Permitir o controle estatístico dos resultados;
- Não exigir a importação de equipamentos;
- Permitir seu aperfeiçoamento.

O método utilizado para calibração das câmeras neste trabalho é o de Heikkilä (1997). Este método foi escolhido levando em consideração os critérios citados por Olivas (1980) e a afirmação de Herbst (2003) que indica o método como “extremamente exato”. Este método é classificado como múltiplos passos e utiliza o seguinte procedimento para calibrar uma câmera:

- Determinar uma solução analítica, também chamada de *closed-form solution*, dos parâmetros da câmera. Esta solução usa aproximação linear que permite obter uma aproximação inicial dos parâmetros intrínsecos/extrínsecos da câmera, através do modelo *PinHole* e pontos de calibração não coplanares. Esta solução não inclui as distorções das lentes;
- Realizar a estimação não-linear dos parâmetros através do método dos Mínimos Quadrados para minimização dos resíduos entre o modelo e as “N” observações utilizadas (minimizando o erro de re-projeção total). Esta técnica leva em consideração a distorção radial e tangencial da lente;
- Realizar a correção e posterior extração de pontos de calibração na imagem devido à distorção do padrão de calibração (que contém os pontos de calibração, por exemplo: vértices de quadrados, centros de circunferências, entre outros) causada pela projeção perspectiva; e
- Realizar a correção das coordenadas das imagens distorcidas a partir de um modelo inverso empírico que compensa a distorção radial e tangencial da lente.

Os parâmetros extrínsecos estão relacionados à posição e orientação externa da câmera em relação a um sistema de coordenadas global (ou terrestre), enquanto os parâmetros intrínsecos definem características óticas e geométricas internas da câmera (como distorções). A distorção radial causa deslocamentos nas imagens. Os principais motivos das distorções dos sistemas óticos estão atribuídos, primeiro, à impossibilidade prática de se construir lente na forma ideal, que é dada por uma parabolóide de revolução. Ao invés disso, a construção da lente é aproximada por uma superfície esférica, que gera nas imagens a quinta aberração monocromática de Seidel, também conhecida como distorção radial e simétrica (Jenkins, 1976). Os cinco tipos de aberrações cromáticas foram definidas por Seidel, e são: a esférica,

coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção, sendo a última classificada como a “quinta aberração de Seidel” e representa o primeiro tipo de distorção considerada no processo de calibração de câmeras. O segundo problema é resultante da impossibilidade do fabricante em alinhar os eixos óticos das lentes que compõe a objetiva. O modelo matemático para essa distorção é demonstrado em Brown (1966). Geralmente, modelos matemáticos levam em consideração além das distorções citadas, distorções causadas por deformações nos filmes e aquelas devido à refração atmosférica. Esses dois tipos de distorções não foram abordados neste trabalho por não serem do escopo do mesmo, e podem ser vistos em Andrade (1998).

Considerando que o processo de calibração envolve um número considerável de observações, normalmente é feito um ajuste das observações com o método dos mínimos quadrados. O processo consiste basicamente em estimar variáveis estocásticas “X” e seus respectivos parâmetros de distribuição Σ_X , a partir de amostras “L” observadas com exatidão Σ_L (Dalmolim, 2002). O objetivo é obter os erros da geometria interna da câmera para posterior correção geométrica das imagens adquiridas.

2.4.1. Câmeras Digitais

Nas câmeras analógicas o processo de aquisição de imagens é realizado através do registro das informações em filmes fotossensíveis localizados no plano focal da câmera, necessitando de processamento em laboratório para revelação ou confecção de cópias. As câmeras digitais atuais são caracterizadas por utilizarem sensores sensíveis à luz com condutores de estado sólido. Estes sensores realizam o registro das imagens e podem ser do tipo CCD (*Charged Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Estes sensores são tipicamente construídos no formato retangular ou na forma de uma linha única (*line scan*) com sensores discretos equidistantes, chamados de fotocélulas, formando uma matriz de *pixels*. Estas fotocélulas operam como conversores ótico-eletrônicos, recebendo luminosidade por um período de tempo e gerando uma carga elétrica proporcional à intensidade de luz e ao tempo de exposição.

2.4.1.1. Sensores CCD

As fotocélulas são montadas em uma matriz com os sensores acoplados, desta forma a imagem pode ser obtida diretamente desta matriz já na forma digital.

Segundo Boyle (1970), o funcionamento básico do CCD é baseado num cristal semicondutor, que libera elétrons quando há incidência de fótons (radiação luminosa) sobre os átomos do semicondutor. Os eletrodos de metal são separados do semicondutor por uma base isolante. Uma tensão positiva é aplicada aos eletrodos excitando as cargas elétricas negativas do semicondutor com os fótons incidentes.

Este processo ocorre em cada *pixel* da matriz que forma a imagem. A quantidade de elétrons liberados é proporcional à intensidade da radiação incidente definindo a cor do *pixel*. Um sensor CCD transporta a carga através do *chip* e a lê em um valor da matriz. Um conversor analógico digital (A/D) realiza a quantização binária da intensidade luminosa captada por cada um dos $M \times N$ diodos fotossensíveis que formam a imagem.

2.4.1.2. Sensores CMOS

Estes sensores diferem dos sensores CCD na forma em que são fabricados e na forma como a imagem é adquirida da matriz de fotocélulas.

Sensores CMOS, assim como os CCD, são formados por uma grade de células fotoelétricas e acumuladores de cargas associados a cada *pixel*. Os sensores CMOS usam diversos transistores em cada *pixel* para amplificar e mover a carga usando fios condutores de eletricidade. O sinal CMOS é digital e possui o conversor A/D incorporado no *chip*.

Segundo Mehta (2006), com a evolução da miniaturização dos *chips*, os sensores CMOS começaram a ter vantagens em relação aos sensores CCD. A primeira vantagem dos sensores CMOS é que estes são fabricados em linhas padrão de semicondutores, enquanto que os sensores CCD requerem uma linha de produção dedicada. Isto permite que os fabricantes de sensores CMOS possam estar constantemente melhorando as suas linhas de produção, reduzindo custos, e permitindo a integração de mecanismos de processamento de sinais nos próprios sensores. No entanto, essa adição de circuitos no *chip* pode causar interferência eletromagnética e gerar ruídos nas imagens.

Outra vantagem da estrutura dos sensores CMOS é que cada uma das suas fotocélulas possui o seu próprio amplificador e circuito de saída. Isto permite que cada fotocélula seja lida independentemente das demais, eliminando a necessidade do acoplamento de carga que ocorre no CCD. Isto faz com que os sensores CMOS possam ser integrados a dispositivos microprocessadores, permitindo a criação de câmeras com processadores internos. Além disso, os sensores CCD podem consumir até 100 vezes mais energia do que os sensores CMOS. O maior consumo de energia pode levar a problemas de calor na câmera, interferindo

negativamente na qualidade da imagem, aumentando o custo e o impacto ambiental do produto.

Tradicionalmente, sensores CCD tinham vantagens em relação aos sensores CMOS, como uma melhor sensibilidade à luz e menos ruídos. Entretanto, nos dias atuais, estas diferenças desapareceram (AXIS, 2010).

2.5. Pré-processamento da Imagem

O objetivo principal das técnicas utilizadas nesta etapa é processar uma imagem de modo que o resultado seja o mais apropriado para uma aplicação específica em relação à imagem original. Serão abordados nesse trabalho os métodos baseados no domínio espacial. Segundo Gonzales (1986), domínio espacial refere-se ao agregado de *pixels* que compõem uma imagem e os procedimentos que operam diretamente sobre estes *pixels* são chamados de métodos.

Funções de processamento de imagens no domínio espacial podem ser expressas por (2), onde $f(x, y)$ é a imagem de entrada, $g(x, y)$ é a imagem processada e T é um operador sobre f , definido sobre alguma vizinhança de (x, y) .

$$g(x, y) = T(f(x, y)) \quad (2)$$

2.5.1. Realce Ponto a Ponto

Inicialmente foram considerados os métodos baseados apenas na intensidade de *pixels* isolados (ponto a ponto), cuja conceituação será vista posteriormente.

2.5.1.1. Alargamento de Contraste

Imagens de baixo contraste podem resultar de iluminação insuficiente, limitações da escala dinâmica no sensor de imageamento, ou mesmo do incorreto estabelecimento da abertura da lente durante a aquisição da imagem. Segundo Mukhopadhyay e Chanda (2000), o objetivo consiste no aumento da escala dinâmica dos níveis de cinza na imagem que está sendo processada. O alargamento de contraste pode ser visto como a aplicação de um polinômio do 1º Grau, no qual $y = ax + b$, sendo: a o ganho e b o deslocamento. A Figura 2.9 mostra uma transformação típica usada para alargamento de contraste.

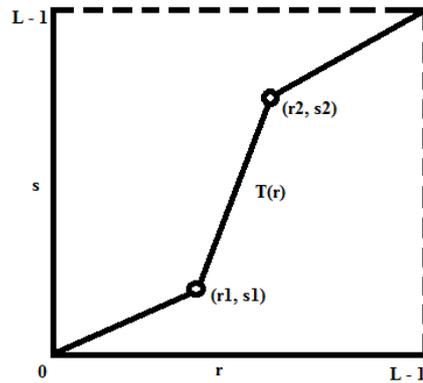


FIGURA 2.9 – Alargamento de contraste: forma de uma função de transformação.

L é o número de níveis de cinza. As posições dos pontos (r_1, s_1) e (r_2, s_2) controlam a forma da função de transformação. Se $r_1 = r_2$, $s_1 = 0$ e $s_2 = L - 1$, a transformação será uma função de limiarização que cria uma imagem binária. Em geral, assume-se $r_1 \leq r_2$ e $s_1 \leq s_2$ de modo que a função seja univariada e monotonicamente crescente. Essa condição preserva a ordem dos níveis de cinza, impedindo assim a criação de artefatos na intensidade da imagem processada.

2.5.1.2. Processamento de Histograma

Segundo Hall et al. (1971), o histograma de uma imagem digital com níveis de cinza no intervalo $[0, L - 1]$ é uma função discreta $p(r_k) = \frac{n_k}{n}$, em que r_k é o k -ésimo nível de cinza, n_k é o número de *pixels* na imagem com esse nível de cinza, n é o número total de *pixels* na imagem e $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$.

As Figuras 2.10 e 2.11 mostram o comportamento típico de histograma, respectivamente, para imagem clara e escura, com elevada e baixa luminosidade.

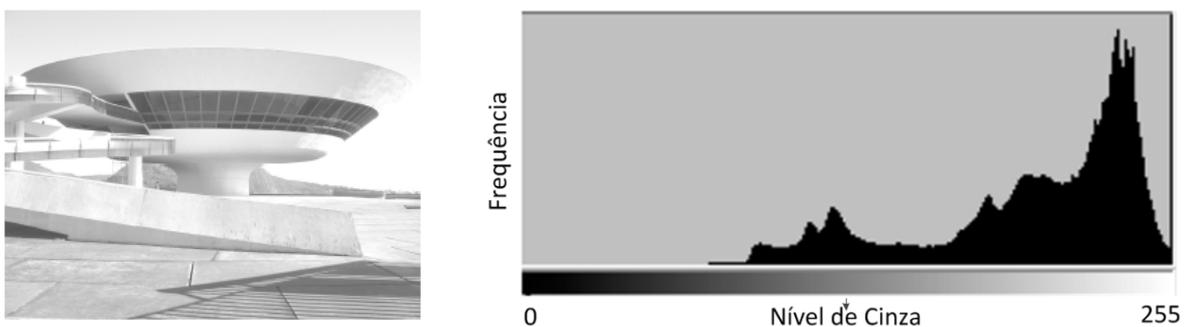


FIGURA 2.10 - Luminosidade elevada (imagem clara).

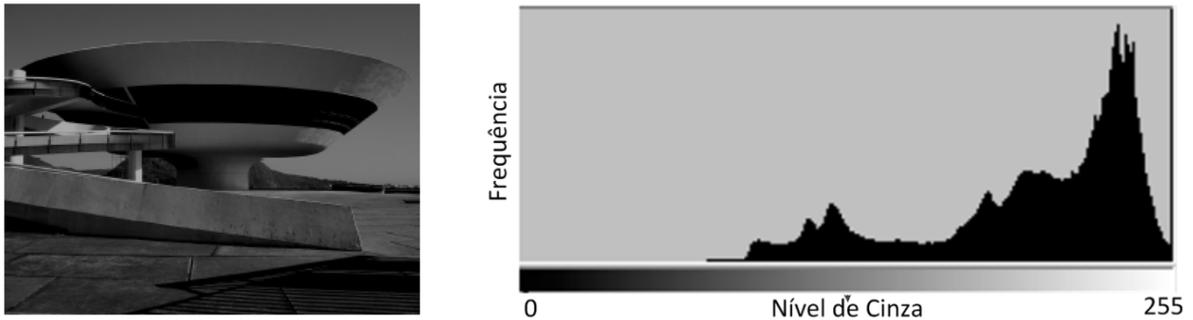


FIGURA 2.11 - Luminosidade baixa (imagem escura).

A forma do histograma de uma imagem nos fornece informação útil sobre a possibilidade de realce do contraste. A conceituação a seguir aborda um método de processamento de histograma global no sentido de que os *pixels* são modificados através de uma função de transformação baseada na distribuição dos níveis de cinza sobre uma imagem completa.

2.5.1.3. Equalização de Histograma

Segundo Gonzales e Fittes (1977), seja r a variável que representa os níveis de cinza de uma imagem a ser realçada. Para qualquer r no intervalo $[0, 1]$, tem-se (3).

$$s = T(r) \quad (3)$$

A qual produz um nível s para todo o valor de *pixel* r na imagem original. Essa função de transformação satisfaz as condições:

- (a) $T(r)$ é univariada e monotonicamente crescente no intervalo $0 \leq r \leq 1$;
- (b) $0 \leq T(r) \leq 1$ para $0 \leq r \leq 1$.

A condição (a) preserva a ordem de preto para branco na escala de cinza, enquanto a condição (b) garante um mapeamento que seja consistente com o intervalo permitido de valores de *pixels*.

A transformação inversa de s para r é dada por (4), assumindo que $T^{-1}(s)$ também satisfaz as condições (a) e (b) com relação à s .

$$r = T^{-1}(s) \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (4)$$

Os níveis de cinza numa imagem podem ser vistos como quantidades randômicas no intervalo $[0, 1]$. Se eles forem variáveis contínuas, os níveis de cinza originais e os transformados podem ser caracterizados por suas funções de densidade de probabilidade $p_r(r)$ e $p_s(s)$, respectivamente.

Da teoria das probabilidades, se $p_r(r)$ e $T(r)$ são conhecidas e $T^{-1}(s)$ satisfaz a condição (a), a função densidade de probabilidade dos níveis de cinza transformados é dada por (5).

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)} \quad (5)$$

As técnicas de realce seguintes baseiam-se na modificação da aparência de uma imagem através do controle da função densidade de probabilidade dos níveis de cinza via função de transformação $T(r)$.

Considere a função de transformação (6) em que w é uma variável de integração. O lado direito da equação Eq. 6 é reconhecido como uma função de distribuição acumulada (CDF) de r . As condições (a) e (b) são satisfeitas por essa função de transformação, porque a CDF aumenta monotonicamente de 0 a 1 em função de r .

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)dw \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (6)$$

De (6) a derivada de s com relação a r é dada por (7).

$$\frac{ds}{dr} = p_r(r) \quad (7)$$

Substituindo-se $\frac{dr}{ds}$ na equação (5), resulta em (8) que é uma densidade uniforme no intervalo da definição da variável transformada s . Este resultado independe da função de transformação inversa, o que é importante, porque a obtenção de $T^{-1}(s)$ analiticamente nem sempre é fácil.

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{1}{p_r(r)} \right]_{r=T^{-1}(s)} \quad (8)$$

O desenvolvimento mostrado indica que o uso de uma função de transformação igual à distribuição acumulada de r produz uma imagem cujos níveis de cinza possuem uma densidade uniforme. Em termos de realce, esse resultado implica num aumento da escala dinâmica dos *pixels*, o que pode ter um efeito considerável sobre a aparência da imagem. Um exemplo de equalização de histograma pode ser visualizado nas Figuras 2.12 e 2.13.



FIGURA 2.12 - Imagem original.

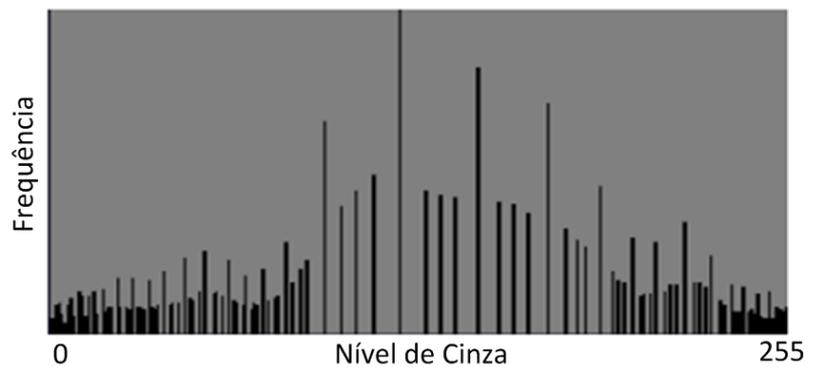


FIGURA 2.13 - Imagem equalizada.

2.5.1.4. Subtração de Imagens

A diferença entre duas imagens $f(x, y)$ e $h(x, y)$ é expressa pela equação (9).

$$g(x, y) = f(x, y) - h(x, y) \quad (9)$$

Obtida através do cômputo da diferença entre todos os pares de *pixels* correspondentes de f e h . A subtração de imagens tem numerosas aplicações em segmentação e realce e é uma técnica utilizada para detecção de mudanças (Schalkoff, 1989). A técnica de subtração será detalhada na Seção 2.6.2.2.

2.5.1.5. Imagens Coloridas

Basicamente, as cores que os seres humanos percebem num objeto são determinadas pela natureza da luz refletida do objeto. A luz visível é compreendida numa banda estreita do espectro de energia eletromagnética. A luz cromática abrange o espectro de energia eletromagnética desde aproximadamente 400 até 700 [nm]. Três valores básicos são usados para descrever a qualidade de uma fonte de luz cromática: radiância, luminância e brilho. Radiância é a quantidade total de energia que flui de uma fonte de luz, sendo usualmente medida em *watt* (W). Luminância, medida em lúmen (lm), fornece uma medida da quantidade de energia que um observador percebe de uma fonte de luz. Finalmente, o brilho é um descritor subjetivo, que é praticamente impossível de ser medido. Ele incorpora a noção acromática de intensidade, sendo um dos fatores chave na descrição da sensação de cores.

Devido à estrutura do olho humano, todas as cores são vistas como combinações variáveis das chamadas cores primárias: vermelho (*Red*, R), verde (*Green*, G) e azul (*Blue*, B). As características normalmente usadas para distinguir uma cor da outra são brilho, matiz e saturação. Matiz é um atributo associado com o comprimento de onda dominante em uma mistura de ondas de luz. Assim, o matiz representa a cor dominante como percebida por um observador. A saturação refere-se à pureza relativa ou quantidade de luz branca misturada com um matiz. Imagens no modelo de cores RGB consistem em três planos de imagem independentes, um para cada cor primária (Figura 2.14).

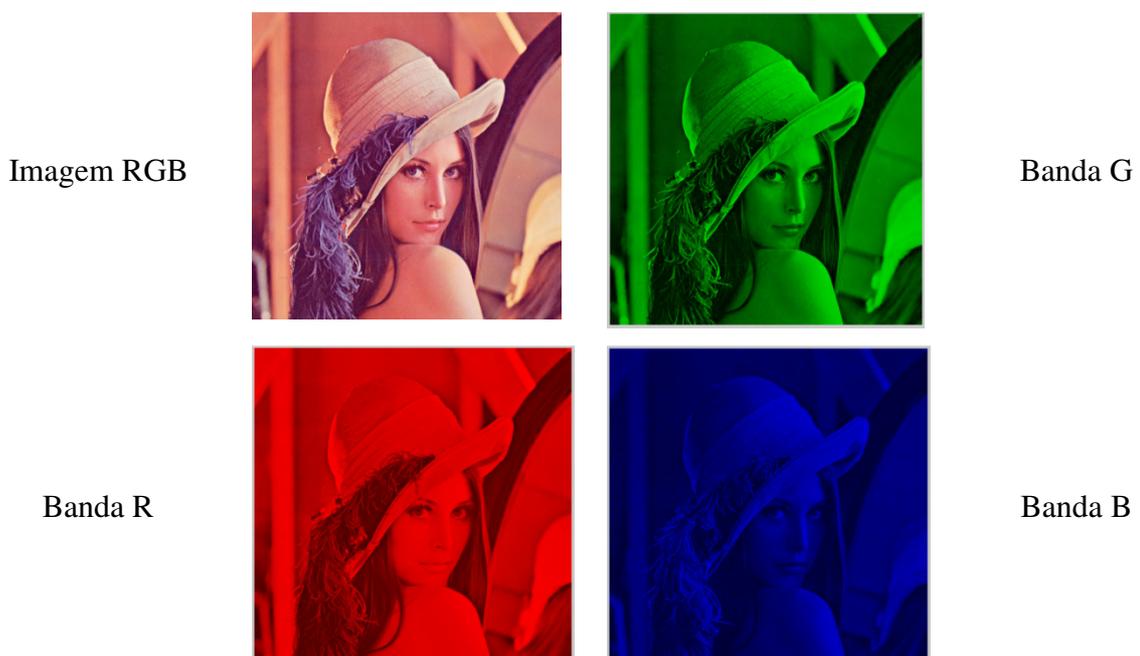


FIGURA 2.14 – Planos independentes de imagem coloridas.

Por causa da presença de três imagens e porque a equalização de histograma lida apenas com valores de intensidade, a abordagem óbvia seria sujeitar cada plano da imagem à equalização de histograma separadamente. Este fato e a necessidade de desempenho em aplicações em tempo-real recomenda que as imagens no modelo de cores RGB, devam ser convertidas para o sistema de cores níveis de cinza, também denominada de transformação radiométrica. Esta transformação permite representar a imagem de forma simplificada, usando apenas a informação de intensidade do *pixel* e um mapa de cores (Figura 2.15), tornando assim o processamento mais rápido e eficiente. (WALSH, 1958 e KIVER, 1965).

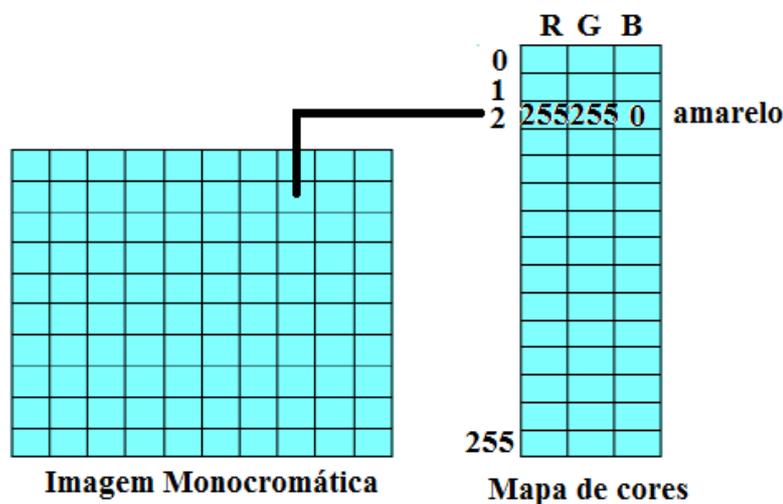


FIGURA 2.15 – Mapa de cores para transformação de imagem RGB em tons de cinza.

Este modelo de cores é o mais utilizado para monitores coloridos e uma ampla classe de câmeras de vídeo a cores. Além desse modelo, existem os modelos CMY (ciano, magenta, amarelo) muito utilizado em impressoras coloridas, e o YIQ utilizado na transmissão de TV colorida. O Y representa a luminância e é definido por $0,3R + 0,59G + 0,11B$ e I e Q são componentes cromáticos. O sinal I é definido por $0,6R - 0,28G - 0,23B$ e o sinal Q definido por $0,21R - 0,52G + 0,31B$. Nesse trabalho, as câmeras utilizadas permitiam aquisição das imagens no modelo RGB e em escala de cinza.

2.6. Segmentação da Imagem

Geralmente a primeira etapa em análise de imagens é a segmentação de imagens. A segmentação subdivide uma imagem em suas partes ou objetos constituintes e o nível dessa

subdivisão depende do problema a ser resolvido. Segundo Gonzales e Woods (2000), a segmentação efetiva quase sempre garante sucesso no reconhecimento.

Os algoritmos de segmentação para imagens monocromáticas são geralmente baseados em uma das seguintes propriedades básicas de valores de níveis de cinza: descontinuidade ou similaridade. Na primeira categoria a abordagem é particionar a imagem baseado em mudanças bruscas nos níveis de cinza. As principais áreas de interesse são a detecção de pontos isolados e detecção de linhas e bordas. A segunda categoria baseia-se na limiarização, crescimento de regiões e divisão e fusão de regiões.

2.6.1. Detecção de Descontinuidades

Os três tipos básicos de detecção de descontinuidades em imagens digitais são: ponto, linhas e bordas. O modo mais apropriado é a varredura da imagem por uma máscara. Máscaras do tipo $J \times J$ analisam $(J \times J - 1)$ *pixels* ao redor do *pixel* de interesse. Máscaras 3×3 (Figuras 2.16 e 2.17) analisam todos os circunvizinhos do *pixel* analisado, sendo que esta máscara é a mais utilizada nos algoritmos de segmentação. As máscaras de detecção de descontinuidades devem possuir a soma de seus coeficientes igual a zero (0), com valores positivos para os pixels que se deseja destacar, e valores negativos para o seu complemento.

$$\begin{array}{ccc} w1 & w2 & w3 \\ w4 & w5 & w6 \\ w7 & w8 & w9 \end{array}$$

FIGURA 2.16 - Máscara 3×3 genérica.

$$\begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

FIGURA 2.17 - Máscara para a detecção de pontos isolados a partir de um fundo constante.

No exemplo de máscaras 3×3 , cada *pixel* da imagem é avaliado juntamente com seus oito *pixels* vizinhos. Esse procedimento envolve a soma dos produtos dos coeficientes pelos níveis de cinza obtidos na região englobada pela máscara, ou seja, a resposta da máscara em qualquer ponto da imagem é definida por (10).

$$R = w_1z_1 + w_2z_2 + \dots + w_9z_9 \quad (10)$$

$$= \sum_{i=1}^9 w_i z_i$$

Onde z_i é o nível de cinza do *pixel* associado com o coeficiente w_i da máscara. O valor de saída é então comparado com um valor limiar para determinar quais *pixels* são mais prováveis de fazerem parte de uma linha ou de um ponto, por exemplo. A correta determinação do valor de limiarização é importante na utilização de máscaras de detecção de descontinuidades. Valores muito baixos poderão produzir uma imagem de saída muito borrada, e valores muito altos poderão perder detalhes significantes para a segmentação (ROBINSON, 1976).

2.6.1.1. Detectores de Pontos de Interesse

A detecção de pontos isolados em uma imagem pode ser obtida pela máscara da Figura 2.17. Cada *pixel* é considerado parte de um ponto se a saída $|R|$ é maior que o valor de limiarização T (11).

$$|R| > T \tag{11}$$

Esta formulação mede as diferenças ponderadas entre o ponto central e seus vizinhos. O objetivo é que um ponto isolado seja completamente diferente do nível de cinza de seus vizinhos. Regiões homogêneas no nível de intensidade produzirão saídas próximas de zero. O resultado é uma imagem binária onde os *pixels* brancos revelam a presença dos pontos detectados e, *pixels* pretos no plano de fundo. Para cada translação da máscara, a comparação expressa por (12) é realizada, onde T é o limiar escolhido, $R_1(x, y)$ o valor de saída após a aplicação da máscara de detecção de pontos e $R_2(x, y)$ o valor de saída após a limiarização. Desta forma, pequenos desvios na intensidade do tom não são notados, ou seja, apenas as diferenças grandes o bastante (determinado por T) para serem considerados pontos isolados em uma imagem são de interesse.

$$R_2(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } R_1(x, y) > T \\ 0 & \text{se } R_1(x, y) \leq T \end{cases} \tag{12}$$

2.6.1.2. Detectores de Linhas

A extração de estruturas em linhas em imagens digitais é uma importante operação em visão computacional. Segundo Stieger (1998) existem três categorias de processos de extração de linhas:

1. Detecção de linhas considerando os valores de cinza na imagem. As linhas são detectadas usando critérios locais, com a diferença de níveis de cinza (e.g. Detector de Canny (Canny, 1986));
2. Detecção de linhas através de filtros especiais como em Koller et al. (1995). A desvantagem deste método é que a implementação computacional é dispendiosa.
3. A imagem é considerada como uma função $f(x,y)$ e as linhas são detectadas como picos do tipo *cume* nesta função localmente aproximada por polinômios de Taylor de segunda ou terceira ordem. Os coeficientes desse polinômio são determinados por um ajustamento pelos mínimos quadrados usando dados da imagem numa janela de tamanho definido. A direção da linha é definida por uma matriz Hessiana de polinômios de Taylor (Detector de Stieger, 1998).

Para Koundinya e Chanda (1994), o procedimento utilizado para a detecção de pontos é semelhante para a detecção de linhas, porém, as máscaras passam a ser definidas para identificar linhas horizontais (Figura 2.18), verticais (Figura 2.19) e diagonais (Figuras 2.20 e 2.21). No caso máscara horizontal, um valor máximo de $|R|$ é alcançado quando a linha do meio da máscara sobrepõe os *pixels* de uma linha horizontal na imagem original.

$$\begin{matrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

FIGURA 2.18 – Horizontal.

$$\begin{matrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{matrix}$$

FIGURA 2.19 – Vertical.

$$\begin{matrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{matrix}$$

FIGURA 2.20 – Diagonal +45°.

$$\begin{matrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{matrix}$$

FIGURA 2.21 – Diagonal -45°.

Um bom método de detecção é aquele que não identifica falsas linhas e nem perde linhas verdadeiras. As características dos contornos das imagens que se deseja analisar determinam a melhor máscara a ser utilizada. É possível também combinar duas ou mais máscaras, conseguindo a segmentação em mais de um sentido em uma mesma imagem.

2.6.1.3. Detecção de Bordas

Segundo Gonzales e Woods (2000), uma borda corresponde ao limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas em níveis de cinza. A detecção de bordas é um dos processos mais comuns e essenciais na análise de imagens digitais (MIRANDA e NETO, 2007). Isto ocorre porque as bordas definem o contorno dos objetos encontrados na imagem, correspondendo às regiões de transição, definindo as fronteiras entre os objetos. A detecção de bordas, entretanto, não determina quais *pixels* fazem parte do objeto e quais *pixels* fazem parte do plano de fundo, ela apenas determina o limite entre as regiões identificadas (PARKER, 1996).

Para Ziou e Tabbone (1998), a partir das bordas é possível determinar as propriedades do objeto que incluem características fotométricas, geométricas e físicas. Estas informações são providas pelas variações e/ou descontinuidades dos níveis de cinza da imagem. As descontinuidades mais comuns são do tipo degrau, linha e junção (Figura 2.22).

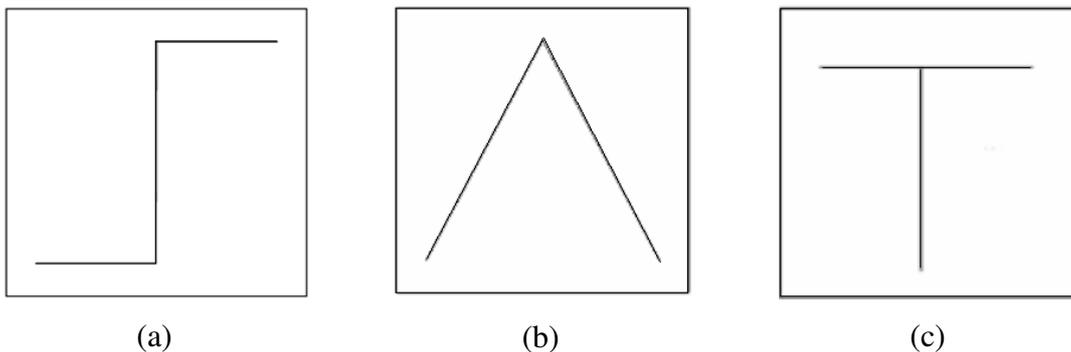


FIGURA 2.22 – Exemplos de bordas. (a) Degrau, (b) Linha, (c) Junção (Ziou e Tabbone, 1998).

Uma variedade de detectores de bordas tem sido desenvolvida visando diferentes propósitos, com formulações matemáticas diferenciadas e propriedades algorítmicas distintas como em Roberts (1965), Prewitt (1970), Kirsh (1971), Robinson (1976), Fram e Deutsch (1975).

Matematicamente, as bordas correspondem a regiões da imagem onde ocorre uma mudança de intensidade em certo intervalo do espaço e em certa direção. Isto corresponde a regiões de alto valor da derivada espacial da função $f(x, y)$ que expressa intensidade de *pixels* em uma imagem. Com esta informação, pode-se concluir que os pontos onde esta derivada é alta correspondem a *pixels* pertencentes às bordas em uma determinada imagem.

De uma forma geral, nenhum algoritmo detector de bordas resume características que o tornam eficiente para a resolução de qualquer problema em sistemas de processamento de imagens. As características das imagens orientam a escolha do melhor método de detecção a ser utilizado na aplicação de interesse. O importante é que o método satisfaça aos critérios de baixa taxa de erro e exata tradução da localização da borda na imagem para o mapa dos contornos dos objetos. Por uma taxa de erro nula entende-se que ruídos e outros fenômenos de iluminação adversos não serão confundidos com verdadeiras bordas, e que todas as bordas verdadeiras serão detectadas. Também é importante que uma mesma borda não produza múltiplos sinais de saída. Canny (1986) faz uma análise matemática detalhada destes critérios.

Os processos tradicionais para detecção de bordas e linhas normalmente seguem uma seqüência, tal qual apresentam Paine e Lodwick (1989) que sugerem as seguintes etapas:

1. Suavização (*Smoothing*): objetivo de reduzir variações exageradas que produzem bordas falsas na imagem (necessidade de utilização de filtros de suavização, porém, com máxima preservação de bordas);
2. Detecção de Bordas (*Edge Detection*): Consiste na aplicação de um detector de bordas que, normalmente, é baseado na aplicação de operadores de detecção de variação de brilho na imagem;
3. Limiarização (*Thresholding*): Utilizado para eliminar algumas bordas detectadas, e que, por apresentarem baixas magnitudes, devem ser desconsideradas, a fim de simplificar o processamento posterior;
4. Afinamento de Bordas (*Thinning*): As bordas precisam ser afinadas para uma melhor definição de sua verdadeira localização.

2.6.1.4. Operadores de Gradiente

O uso da função gradiente permite a solução de alguns problemas em segmentação de imagens. Neste contexto, o termo gradiente é usado para caracterizar uma mudança gradual de cor na imagem. O gradiente morfológico é uma operação, que em imagens em tons de cinza, destaca as transições relevantes dos diversos níveis. Como os *pixels* pertencentes ao contorno dos objetos apresentam uma mudança brusca na intensidade de cor da imagem, eles podem ser detectados através de um elevado valor do gradiente. Vários autores apresentam técnicas diferentes para cálculo do gradiente (CHAUDHURI; CHANDA, 1984). O gradiente de uma imagem $f(x, y)$ na posição (x, y) é dado pelo vetor expresso pela equação 13.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (13)$$

O método do gradiente é mais comum de diferenciação em aplicações de processamento de imagens, permitindo o realce das mesmas. Em detecção de bordas, a magnitude desse vetor é uma quantidade importante, geralmente chamada de gradiente e denotada pela equação 14.

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (14)$$

Essa quantidade equivale à taxa de aumento de $f(x, y)$ por unidade de distância na direção de ∇f . Comumente, aproxima-se o gradiente com valores absolutos que é muito mais simples de ser realizado, como em (15).

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (15)$$

A direção do vetor gradiente é também uma quantidade importante. Seja $\alpha(x, y)$ o ângulo da direção do vetor ∇f na posição (x, y) . Então, a partir de análise vetorial, tem-se (16) em que o ângulo é medido em relação ao eixo x.

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{G_x}{G_y} \right) \quad (16)$$

O computo do gradiente de uma imagem baseia-se na obtenção das derivadas parciais $\partial f/\partial x$ e $\partial f/\partial y$ na posição de cada *pixel*. A derivação pode ser realizada digitalmente de diferentes formas. Computacionalmente, usa-se um par de máscaras, geralmente 3 X 3, onde uma máscara avalia o gradiente ao longo do eixo “x” (17), e a outra, avalia o gradiente na direção do eixo “y” (18), onde G_x e G_y representam os gradientes nas direções dos eixos x e y, respectivamente, e dx e dy medem a distância, também ao longo dos eixos x e y.

$$G_x = \Delta_x = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = \frac{f(x+dx,y) - f(x,y)}{dx} \quad (17)$$

$$G_y = \Delta_y = \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \frac{f(x,dy+y) - f(x,y)}{dy} \quad (18)$$

Como imagens digitais são representadas em espaços discretos, pode-se considerar dx e dy , em termos numéricos igual ao valor unitário como sendo a distância entre dois *pixels* vizinhos. A combinação dos dois gradientes Δx e Δy resultam no gradiente da função ∇f . Na maioria das implementações, o valor de ∇f é então comparado a um limiar para se identificar os *pixels* que apresentam elevada taxa de mudança na função da imagem. A imagem resultante de algoritmos de detecção de bordas representa um mapa dos contornos dos objetos denominado *edge map*.

Para uma máscara 3 x 3 (Figura 2.16) a derivação poderia ser implementada como se verifica na equação (19), onde G_x é representado pela diferença entre a terceira e a primeira linha, aproximando a derivada na direção do eixo x, e G_y , pela diferença entre a terceira e a primeira coluna, aproximando a derivada na direção do eixo y (GONZALES; WOODS, 2000).

$$\Delta f \approx |(w_7 + w_8 + w_9) - (w_1 + w_2 + w_3)| + |(w_3 + w_6 + w_9) - (w_1 + w_4 + w_7)| \quad (19)$$

As máscaras utilizadas para computar G_x e G_y usando os operadores de Prewitt (PREWITT, 1970) são ilustradas pelas Figuras 2.23 e 2.24, respectivamente. Para realizar a detecção de bordas utilizando estes operadores aplicam-se as duas máscaras separadamente sobre a imagem original e, posteriormente, sobrepõem-se os dois resultados.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = (w_3 + w_6 + w_9) - (w_1 + w_4 + w_7)$$

FIGURA 2.23 - Operador vertical de Prewitt.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad G_x = (w_7 + w_8 + w_9) - (w_1 + 2w_2 + w_3)$$

FIGURA 2.24 - Operador horizontal de Prewitt.

No caso do operador de Sobel, outro operador muito conhecido na literatura, também por utilizar o conceito de gradiente da função, as máscaras podem ser visualizadas nas Figuras 2.25 e 2.26. A detecção de bordas é obtida pela limiarização do gradiente. Com um limiar baixo, muitos pontos são marcados na imagem, as bordas ficam grossas ou com muitos pontos

de bordas isoladas. Com um limiar alto, segmentos aparecerão finos e quebrados sem continuidade de borda.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = (w_3 + 2w_6 + w_9) - (w_1 + 2w_4 + w_7)$$

FIGURA 2.25 - Operador vertical de Sobel.

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad G_x = (w_7 + 2w_8 + w_9) - (w_1 + 2w_2 + w_3)$$

FIGURA 2.26 - Operador horizontal de Sobel.

Segundo Gonzales e Woods (2000), esta pequena diferença em relação ao operador de Prewitt têm maior capacidade de suavizar eventuais ruídos ao mesmo tempo em que detecta as bordas da imagem. Embora, implementado por uma máscara 2 x 2, o operador de Roberts (ROBERTS, 1965) é um exemplo de um operador de 4 *pixels* na vizinhança (N_4). Este operador também é muito utilizado para derivação (Figura 2.27).

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_x = (w_9 - w_5) \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad G_y = (w_8 - w_6)$$

FIGURA 2.27 - Operadores de Roberts.

No operador Canny (1986), a imagem é suavizada com as derivadas de primeira ordem de um filtro Gaussiano na direção do gradiente local, seguido pela detecção de bordas por dois limiares (Boaventura e Gonzaga, 2007). As bordas fracas são incluídas na imagem de saída apenas se estas estão conectadas às bordas fortes. Desta forma, este processo é menos suscetível a ruídos e mais coerente com as bordas fracas, além de fragmentar menos essas bordas. A Figura 2.28 ilustra a aplicação dos quatro operadores citados.



(a) Imagem Original



(b) Operador de Prewitt



(c) Operador de Sobel



(d) Operador de Roberts



(e) Ajuste de Limiar de Canny

FIGURA 2.28 – Aplicação de algoritmos de detecção de bordas: (a) Imagem Original; (b) Operador de Prewitt; (c) Operador de Sobel; (d) Operador de Roberts; (e) Ajuste de Limiar de Canny.

Uma vantagem do uso dos operadores de Sobel é que ele fornece, ao mesmo tempo, os efeitos de diferenciação e suavização. Uma vez que a derivação aumenta o ruído, o efeito de suavização é uma característica particularmente atrativa dos operadores de Sobel.

2.6.2. Detecção de Similaridades

Os métodos de detecção de similaridades procuram reunir *pixels* em uma imagem de acordo com algum critério de similaridade ou homogeneidade. Entretanto, apesar destas técnicas compartilharem o conceito essencial de homogeneidade, elas diferem no modo como realizam o processo de segmentação (MUÑOZ et al., 2003).

Semelhantemente a um processo de classificação, as técnicas de segmentação por detecção de similaridades procuram definir se um *pixel* pertence a uma determinada região. Geralmente, um valor limiar irá definir a qual região o *pixel* pertence. Portanto, o resultado da segmentação depende de uma boa escolha destes valores. Existem diversos métodos para a escolha de um valor de limiar ótimo. Schouten et al. (1994) apresentam um estudo sobre a escolha do valor de limiar baseado na complexidade dos métodos.

2.6.2.1. Limiarização por Histograma

Segundo Gonzales e Woods (2000), limiarização é uma das mais importantes abordagens para a segmentação de imagens. O histograma de uma imagem revela a distribuição dos níveis de cinza ou a distribuição de cada componente de cor para imagens coloridas, e produz informação útil para realçar e analisar imagens. O histograma é representado por um gráfico de número de *pixels* por intensidade de cor, onde as componentes de maior frequência na imagem são representados graficamente por picos, e os componentes de cor de menor prevalência, por vales.

O método de limiarização por histograma é o processo de dividir uma imagem em diferentes regiões baseadas na distribuição de seu histograma (Doyle, 1962). O número de regiões depende do número de picos presentes na distribuição. Este método pode ainda ser utilizado nos procedimentos de classificação e melhoramento de imagens.

Devido à baixa complexidade, a limiarização por histogramas é largamente utilizada. Entretanto, histogramas perdem informações espaciais sobre as imagens, além de serem sensíveis a ruídos (NORIEGA; BASCLE; BERNIER, 2006).

Em imagens que apresentam apenas duas regiões bem definidas de níveis de cinza o histograma é bimodal, ou seja, tem a predominância de apenas dois tons, um tom para o objeto e o outro para o fundo da cena (Figura 2.29). Para Narasimham e Fornago (1963) o método de limiarização por histograma é o mais simples e menos complexo a ser utilizado para segmentação de imagens. Basicamente, o problema consiste em decidir se um determinado *pixel* pertence a um objeto ou ao plano de fundo.

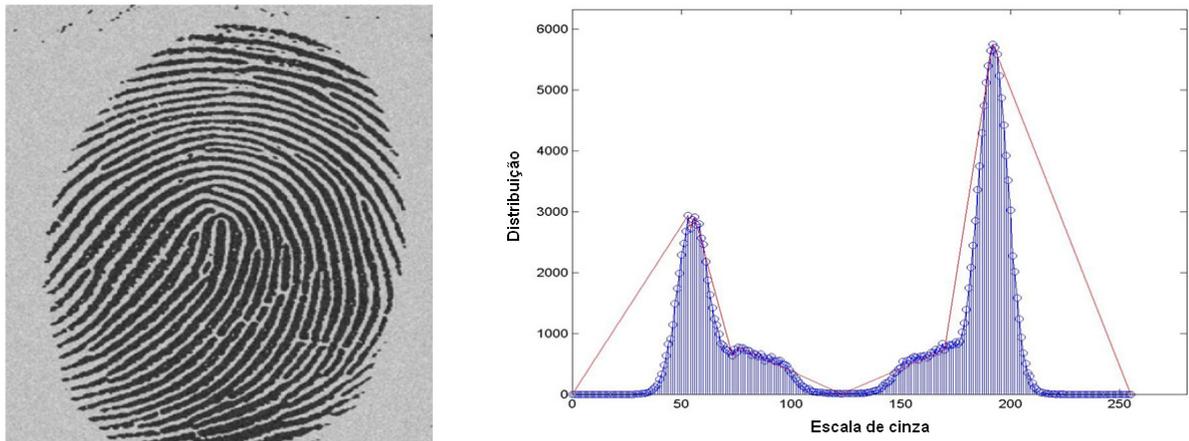


FIGURA 2.29 - Exemplo de histograma bimodal de uma digital (*fingerprint*).

Selecionando-se um valor de limiar que esteja entre os dois tons estatisticamente predominantes, a imagem f , de resolução $M \times N$, é percorrida de $f(0,0)$ a $f(M,N)$ tendo seus valores modificados conforme seus níveis iniciais sejam maiores ou menores que o limiar T (equações 19 e 20), onde $f(x,y)$ é o nível de cinza do ponto (x,y) , T é o limiar selecionado e $g(x,y)$ a imagem limiarizada.

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (19)$$

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > T \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (20)$$

Se a imagem possuir um objeto claro sobre um fundo escuro, $g(x,y)$ será uma imagem binária com um objeto branco sobre um fundo preto. Esta técnica é também utilizada na conversão de imagens em tons de cinza para imagens binárias.

A maior parte das imagens do mundo real, entretanto, apresenta uma maior variação entre os níveis de intensidade de seus *pixels* e, portanto, seus histogramas são multimodais (Figura 2.30). Este fato aumenta a complexidade da segmentação por limiarização, uma vez

que se um único valor de limiar for utilizado, muita informação será perdida durante o procedimento.

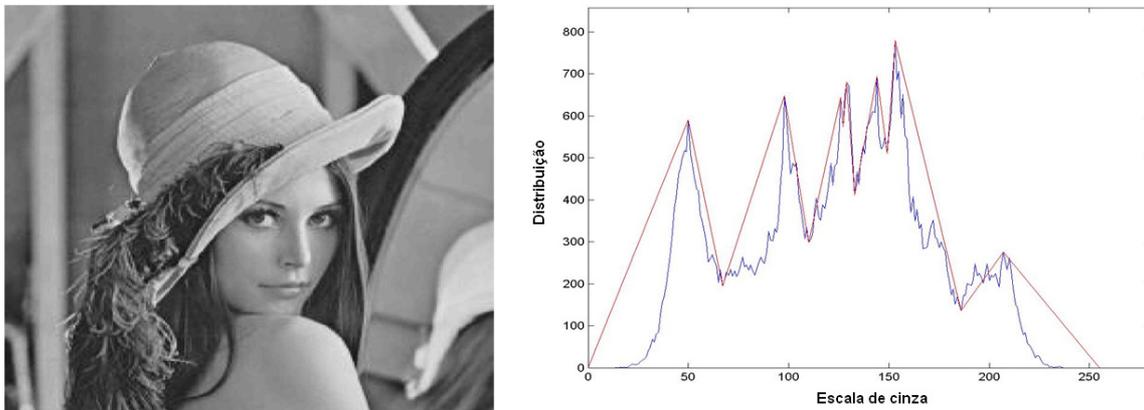


FIGURA 2.30 - Exemplo de histograma multimodal (Gonzales e Woods, 2000).

Nestes casos, utilizam-se múltiplos valores de limiar. Cada região é rotulada com um determinado nível de cinza, e o resultado não é uma imagem binária como na limiarização bimodal. Nain et al (2008) apresentam um método que calcula o número ótimo de valores de limiar baseado no número dos picos significantes presentes no histograma de uma imagem. O número de regiões em que a imagem será dividida depende então do número de picos presentes em seu histograma. Cada região é descrita pelo menor e maior valor de seu nível de intensidade. Rao e Prasad (1995) descrevem uma técnica de limiarização de baixa complexidade e elevada flexibilidade que pode ser usada tanto para imagens com histogramas bimodais quanto para imagens com qualquer cardinalidade de picos.

Existem outras técnicas para limiarização que contornam um pouco as limitações da técnica de limiarização simples. Além disso, a limiarização é frequentemente utilizada em associação com outras técnicas. Usualmente, a maioria dos detectores de bordas aplica um limiar à imagem de saída para decidir quais bordas são significantes. Se uma borda apresenta níveis de intensidade superiores ao limiar, ela é definitivamente marcada na imagem de saída. Esta associação procura minimizar o efeito de ruídos sobre a imagem segmentada.

Outro aperfeiçoamento do método de limiarização por histograma se relaciona ao conceito de limiar global, local ou dinâmico. As técnicas citadas anteriormente lidam com limiar global, ou seja, um mesmo valor de limiar é aplicado a toda imagem. A segmentação é efetuada, varrendo-se a imagem, *pixel* por *pixel*, e rotulando-se cada *pixel* como sendo do objeto ou do fundo, dependendo se o nível de cinza daquele *pixel* for maior ou menor que T . Nas técnicas que utilizam limiar local, a imagem é primeiramente subdividida em regiões ou segmentos e, então, um valor de limiar é escolhido para cada região. Já nas técnicas que

utilizam limiar dinâmico, um valor diferente de limiar pode ser determinado para cada coordenada da imagem. Técnicas de limiar dinâmico costumam ser mais eficientes para a limiarização de imagens (GAMBA, LODOLA; MECOCCHI, 1997), sobretudo, aquelas sob condições diversas de iluminação.

Dai et al. (1996) apresentam uma técnica de limiar dinâmico que determina valores limiares iniciais a partir de um mapa dos contornos dos objetos da imagem de entrada. Considerando que os *pixels* pertencentes às bordas dos objetos representam o limite entre objetos e planos de fundo, o seu valor de intensidade de cinza pode ser considerado como um valor de limiar ótimo para estes mesmos *pixels*. Após esta etapa, os valores de limiar são propagados para as regiões vizinhas através da operação morfológica de dilatação. Esta operação é repetida iterativamente até que todos os *pixels* da imagem sejam rotulados com um valor de limiar.

2.6.2.2. Detecção de Movimento

Segundo Jain (1983), o movimento é uma poderosa técnica usada para extração de um objeto de interesse de um fundo de detalhes irrelevantes. Em aplicações de imageamento, o movimento é originado de um deslocamento relativo entre o sistema sensor e a cena sendo observada. Esta técnica usa a variação da posição dos objetos entre dois quadros de uma mesma imagem tomados em tempos distintos conforme expresso em (21), onde θ é um limiar.

$$d_{ij}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)| > \theta \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (21)$$

Note que $d_{ij}(x, y)$ possui valor unitário nas coordenadas espaciais (x, y) apenas se existir uma diferença apreciável entre os níveis de cinza das duas imagens, o que é determinado pelo limiar θ . Um procedimento simples é realizar a subtração entre os dois quadros. Entretanto, uma imagem de diferença freqüentemente contém pontos isolados relativos a ruídos e não a movimentos de objetos. A influência destes pontos de ruídos pode ser minimizada pela remoção de elementos com conectividade menor que quatro (i.e. considera os pixels vizinhos de borda de um pixel central) ou oito (i.e. considera os pixels vizinhos de borda e diagonal de um pixel central), ou com o uso de morfologia matemática, por exemplo. Um problema desta abordagem é que pequenos objetos em movimento podem ser eliminados. Outra maneira de

minimizar a ocorrência destes pequenos ruídos é comparar um número maior de quadros para observar se a mudança no *pixel* ocorreu apenas em alguns quadros o que denotaria um ruído, ou se em grande parte deles, o que indicaria o movimento de algum objeto (GONZALES e WOODS, 2000).

Horpraset, Harwood e Davis (2000) apresentam um algoritmo de subtração de fundo para a detecção de objetos em movimento capaz de tratar as variações de iluminação em um fundo estático. A idéia é separar os componentes de brilho e cromaticidade no espaço de cor RGB, uma vez que as propriedades espectrais das cores não mudam sob diferentes condições de iluminação.

Huang, Paulus e Niemann (2000) propuseram um método que combina duas técnicas de segmentação, uma estática baseada no algoritmo Watershed e outra baseada em um modelo dominante de movimento. O algoritmo Watershed é usado para subdividir a imagem em pequenas regiões. Os autores em seguida apresentaram um método para se determinar o movimento em cada uma das regiões segmentadas.

A chave do sucesso para as técnicas de detecção de movimento reside na existência de uma imagem de referência com a qual comparações subseqüentes possam ser feitas. A obtenção de uma imagem de referência contendo apenas elementos estacionários não é sempre possível, e a criação de uma referência a partir de um conjunto de imagens contendo um ou mais objetos em movimento passa a ser necessária. Essa necessidade aparece particularmente em situações que descrevam cenas complexas ou nos casos em que uma atualização freqüente for requerida.

2.7. Morfologia Matemática

A morfologia matemática é baseada na teoria de conjuntos e técnicas que podem ser utilizadas para extração de componentes de imagens que sejam úteis na representação e descrição da forma de uma região, como fronteiras, esqueletos e fecho convexo. Além disso, pode ser usada de forma eficiente para pré-processamentos, como filtragem morfológica, afinamento e poda. No caso da segmentação, é especialmente útil quando se tem um conhecimento prévio do formato do objeto que se deseja extrair na cena.

No contexto de processamento e análise de imagens, a morfologia matemática, aplicada inclusive neste trabalho, é estudada principalmente em imagens binárias. Pode ser aplicável a imagens em intensidades de cinza e a imagens coloridas.

2.7.1. Elemento Estruturante

As operações morfológicas interagem com funções que representam imagens com uma imagem menor e com determinada forma que é conhecida como Elemento Estruturante (EE) ou estrutura morfológica.

Segundo Burgeth et al. (2004), o uso de matrizes facilita a implementação e a representação de formas geométricas em imagens. Desta forma, um EE pode ser definido como uma matriz de “0s” e “1s” escolhida de maneira a representar o formato geométrico que se deseja aplicar à imagem.

Um EE percorre *pixel* a *pixel* de uma função $f(x, y)$ em um movimento de translação, processando alguma operação morfológica de interesse sobre esta imagem. O elemento na matriz definido como a origem do EE corresponde ao ponto de sobreposição durante o deslocamento (translação) sobre a imagem. Desta forma, é muito importante definir a célula da matriz que irá corresponder à origem.

Segundo Serra (1982), a finalidade do EE é definir o domínio de análise para cada *pixel* na imagem. Este domínio, ou vizinhança, é definido pelas células de valor unitário na matriz. A Figura 2.31 representa um EE com formato cruciforme, sendo bidimensional e plano para diferenciar o EE volumétrico, podendo ser usado para imagens binárias ou em níveis de cinza. A célula (2,2) da matriz corresponde à origem do EE. Sendo assim, para esta estrutura, são analisados quatro *pixels* na vizinhança (N_4), ou seja, $(x - 1, y)$, $(x + 1, y)$, $(x, y - 1)$ e $(x, y + 1)$.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

FIGURA 2.31 - Elemento estruturante com vizinhança de quatro pixels (N_4).

Marchand-Maillet e Sharaiha (2000) demonstram o uso de retículas triangulares, hexagonais e quadradas, ao invés de matrizes, para a definição de vizinhanças (Figura 2.32). Entretanto, retículas triangulares e hexagonais não representam satisfatoriamente a topologia digital da maioria das imagens. Retículas quadradas são mais utilizadas pela sua semelhança com matrizes. Retículas triangulares e hexagonais são mais úteis quando imagens são

representadas por grafos. Nesta representação, cada nó no grafo corresponde a um pixel na imagem.

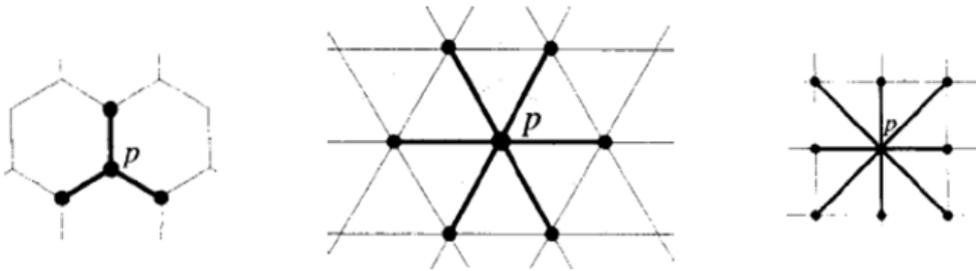
Retícula triangular (N_6)Retícula hexagonal (N_3)Retícula quadrada (N_8)

FIGURA 2.32 – Retículas como vizinhança (Marchand-Maillet e Sharaiha, 2000).

2.7.2. Componentes Conectados

Toda imagem binária pode ser dividida em dois grandes conjuntos: o conjunto dos *pixels* pertencentes ao primeiro plano da imagem; e o dos *pixels* pertencentes ao plano de fundo. Para uma imagem binária Ib , analisada como um conjunto BW de *pixels* tem-se (22):

$$BW = \{p | (p = 0 \text{ ou } p = 1) \forall p \in Ib\} \quad (22)$$

Dividindo o conjunto BW no conjunto F , que representa o plano dos objetos contidos na imagem, e no conjunto B que representa o plano de fundo da imagem, obtém-se (23) e (24). Destas representações pode-se concluir que o conjunto F é o complemento de B , e vice-versa.

$$F = \{\forall p | p = 1 \text{ e } p \in BW\} \quad (23)$$

$$B = \{\forall p | p = 0 \text{ e } p \in BW\} \quad (24)$$

A Figura 2.33 representa matricialmente uma imagem Ib e os conjuntos B e F . É possível notar que neste caso o conjunto F apresenta dois sub-conjuntos disjuntos. Cada um destes subconjuntos representa um componente conectado que é, então, definido como um conjunto de *pixels* onde existe um caminho entre todos os seus elementos. Com este conceito é possível enumerar e diferenciar cada um dos objetos existentes no primeiro plano da

imagem. A união de todos os objetos de uma imagem forma então o conjunto do primeiro plano (25), onde n representa o número de componentes conectados presentes no conjunto F .

$$F_1 \cup F_2 \cup F_n = F \quad (25)$$

O plano de fundo também pode apresentar mais de um componente conectado. Entretanto, para a análise morfológica interessa apenas os componentes conectados do primeiro plano da imagem.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0

FIGURA 2.33. Representação matricial de uma imagem Ib . Em branco o conjunto B e em cinza o conjunto F .

Outra definição para componentes conectados leva em consideração a conectividade de cada *pixel* pertencente ao conjunto F . Segundo Gonzalez, Woods e Eddins (2004), p e q são ditos 4-conectado se existe um caminho 4- conectado entre eles ou, 8- conectado se existe um caminho 8-conectado entre eles, consistindo inteiramente de *pixels* do conjunto F . Um caminho 4-conectado significa dizer que existe uma conexão entre $p(x, y)$ e $q(x', y')$ levando em consideração apenas as adjacências $(x - 1, y)$, $(x + 1, y)$, $(x, y - 1)$ e $(x, y + 1)$ de cada *pixel* pertencente ao caminho. Já em um caminho 8-conectado, os oito *pixels* imediatamente adjacentes são considerados.

Dividir uma imagem binária em seus componentes conectados é extremamente útil em morfologia matemática para se efetivar a busca por determinados critérios geométricos. Os componentes conectados podem ainda ser distinguíveis uns dos outros através de um procedimento de rotulação (*Connected Component Labeling* ou *CCL*). Cada *pixel* pertencente a um mesmo componente conectado recebe um identificador ou rótulo numérico que o diferencia dos demais *pixels* também pertencentes ao conjunto F , mas que pertençam a um componente conectado diferente.

Deste modo, a imagem da Figura 2.33 contendo dois objetos no primeiro plano seria representada pela Figura 2.34, onde os *pixels* rotulados com o valor unitário identificam o primeiro objeto, e os rotulados com o valor dois identificam o segundo objeto.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	2	2	0
0	0	0	0	2	2	2	0
0	0	0	0	2	2	2	0

FIGURA 2.34 - Imagem *Ib* após rotulação.

Esta divisão do primeiro plano da imagem em sub-conjuntos facilita a posterior segmentação de objetos baseados em sua forma geométrica. De acordo com Marchand-Maillet e Sharaiha (2000), cada sub-conjunto é tratado como uma entidade separada dentro da imagem o que facilita a aplicação dos estudos morfológicos.

A divisão do conjunto F em CCL permite ainda o cálculo de medidas de interesse para o processamento dos objetos analisados individualmente, como perímetro, área, centro de massa, raio, diâmetro, entre outros. Estas medidas podem ser muito úteis para diferenciar e distinguir os objetos uns dos outros ou para compará-los com algum outro objeto tomado como referência.

Basicamente, existem duas regras para qualquer procedimento de rotulação:

- a) $Label(p) = 0$, se $p \in B$ (onde B representa o conjunto do plano de fundo);
- b) $Label(p) = Label(q)$, se $p \in F_n$ e $q \in F_m, \forall n$
 $= m$ (onde F representa o conjunto do plano dos objetos).

2.7.3. Operações em Morfologia Matemática

As operações morfológicas são procedimentos que varrem seqüencialmente uma imagem aplicando, através de um EE com forma e tamanho escolhidos de acordo com o objetivo da aplicação, algum tipo de transformação nos componentes conectados de uma imagem binária ou nos *pixels* de uma imagem em intensidades de cinza. As operações de dilatação e erosão formam a base da morfologia matemática (GIARDINA e DOUGHERTY, 1988). A combinação destes operadores básicos permite a construção de operações mais complexas. A seguir, são apresentadas as operações morfológicas mais comuns.

2.7.3.1. Algumas Definições Básicas

Sejam A e B conjuntos de Z^2 com componentes $a = (a_1, a_2)$ e $b = (b_1, b_2)$,

respectivamente. A translação de A por $x = (x_1, x_2)$, denotada por $(A)_x$, é definida por (26).

$$(A)_x = \{ c \mid c = a + x, \text{ para } a \in A \} \quad (26)$$

A reflexão de B , denotada por \hat{B} , é definida por (27).

$$\hat{B} = \{ x \mid x = -b, \text{ para } b \in B \} \quad (27)$$

O complemento do conjunto A é definido por (28).

$$A^c = \{ x \mid x \notin A \} \quad (28)$$

Finalmente, a diferença entre dois conjuntos A e B , denotada por $A-B$, é definida por (29).

$$A - B = \{ x \mid x \in A, x \notin B \} = A \cap B^c \quad (29)$$

2.7.3.2. Dilatação (\oplus) e Erosão (\ominus)

Tipicamente, a operação de dilatação adiciona uma camada de *pixels* sobre as bordas de um objeto em uma imagem, e a operação de erosão remove uma camada de *pixels*. O número de *pixels* adicionados ou removidos da borda do objeto depende do tamanho e formato do elemento estruturante. Como o resultado é sempre uma imagem do mesmo tamanho que a original. A dilatação dos componentes conectados do primeiro plano implica em uma consequente erosão do plano de fundo e vice-versa.

Tornando-se A e B como conjuntos de Z^2 e \emptyset como o conjunto vazio, define-se a dilatação de A por B , denotada por $A \oplus B$ como na equação (30).

$$A \oplus B = \{ x \mid (\hat{B})_x \cap A \neq \emptyset \} \quad (30)$$

O processo de dilatação começa na obtenção da reflexão de B em torno de sua origem, seguido da translação dessa reflexão por x . A dilatação de A por B é então o conjunto de todos os deslocamentos x tais que a reflexão de B e A sobreponham-se em pelo menos um elemento não nulo. O conjunto B normalmente é chamado de EE da dilatação, bem como de outras operações morfológicas.

Para conjuntos A e B em Z^2 , a erosão de A por B , denotada por $A \ominus B$, é expressa por (31), o que significa que erosão de A por B é o conjunto de todos os pontos x tais que B quando transladado por x fique contido em A .

$$A \ominus B = \{x \mid (B)_x \subseteq A\} \quad (31)$$

A origem da teoria da morfologia matemática está na álgebra de Minkowski e as operações de dilatação e erosão equivalem as suas clássicas operações de adição e subtração, respectivamente (ROERDINK, 1994). Sendo assim, podem também ser representadas pelas equações (32) e (33).

$$I \oplus E = \bigcup_{e \in E} I_e \quad (32)$$

$$I \ominus E = \bigcap_{e \in E} I_{-e} \quad (33)$$

A explicação da adição de Minkowski é equivalente a explicação da dilatação morfológica no contexto da teoria dos conjuntos, diferindo apenas no fato de que o componente conectado é aquele transladado sobre a matriz do EE.

Analogamente, na subtração de Minkowski o componente conectado é transladado sobre o EE refletido.

3. ENSAIOS EM VOO

Desde tempos remotos a idéia de se locomover no ar instiga o imaginário de várias culturas, sendo inúmeras as tentativas ao longo da história de realizar este sonho (BARROS, 2004). Uma das primeiras citações é a lenda grega de Ícaro e Dédalo que utilizavam asas feitas de penas para fugirem da ilha de Creta.

Na tentativa de obter o domínio do ar, os chineses fizeram pipas e foguetes nos séculos III e XI, respectivamente. Leonardo Da Vinci no início do século XVI desenhou inúmeros projetos de máquinas voadoras. Bartolomeu Lourenço de Gusmão, inventor brasileiro, em 08 de agosto de 1709, teve o primeiro sucesso em um pequeno invólucro cheio de ar quente que subiu cerca de 4 metros.

De 1890 a 1896, o alemão Otto Lilienthal, realizou voos com planadores. Otto estudou a sustentação das asas e a estabilidade dos seus planadores e publicou “O voo dos pássaros como base da arte de voar” em 1889.

Diante de tantas outras tentativas para a invenção do voo controlado e de diversas reivindicações feitas por inventores, o Aeroclubes da França percebeu a necessidade de criar critérios claros para definir o que poderia ser considerado uma demonstração de voo controlado. Os critérios eram: a experiência deveria ser pública, na presença de uma comissão especialmente designada para tal fim e anunciada com antecedência, para evitar que o acaso viesse a favorecer um dos concorrentes.

No período de 1890 a 1910 e graças à contribuição de diversos inventores que se dedicaram à questão, foi possível realizar as primeiras experiências que preenchiam os critérios estipulados pelo Aeroclubes da França e aceitos pela comunidade internacional. Os inventos de Alberto Santos Dumont lhe renderam dois recordes – o de 19 de outubro de 1901, obtido ao contornar a Torre Eiffel saindo de Saint-Cloud no dirigível nº 6, e o voo de 220 metros do 14 Bis de 12 de novembro de 1906, que são marcos essenciais da história da invenção do voo.

Nestas diversas tentativas sempre existiu a necessidade da realização de ensaios / testes, sendo a maioria realizada pelo próprio inventor. Infelizmente, muitos desses ensaios culminaram em incidentes e até acidentes fatais. Mesmo com esses acontecimentos, as atividades aeronáuticas e aeroespaciais prosperaram. Inúmeras aeronaves foram desenvolvidas sendo que para qualquer nova aeronave experimental é essencial a realização de ensaios.

Segundo WARD (1998), “ensaio em voo é uma área da engenharia aeronáutica desenvolvida para coletar e analisar dados com a finalidade de avaliar as características de uma equipagem de voo e validar seu projeto, incluindo os aspectos de segurança”.

O início desta atividade no Brasil ocorreu em 18 de dezembro de 1958 com a realização do primeiro voo oficial de ensaio de uma aeronave desenvolvida no Brasil. Este voo foi realizado com o protótipo do helicóptero BF-1 Beija-Flor. Em fins de 1961, foi criada a Seção de Operações e Ensaio em Voo, mais tarde denominada Subdivisão de Ensaio em Voo (PAR-V) do antigo Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD). Esta subdivisão passou para o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), que em 2006 tornou-se o Grupo Especial de Ensaio em Voo (GEEV). Neste ano, 2011, o GEEV tornou-se o Instituto de Pesquisas e Ensaio em Voo (IPEV). O IPEV ministra o Curso de Ensaio em Voo (CEV) para formação de pilotos, engenheiros e instrumentadores de ensaio na modalidade de asas rotativas, asas fixas e instrumentação. Este curso, em 24 de abril de 2004, foi reconhecido internacionalmente pela Sociedade dos Pilotos de Provas Experimentais (*Society Experimental Test Pilots - SETP*).

A atividade de ensaios em voo está fortemente ligada com segurança. Para Leite, Lopes e Souza (2010), segurança “é um dos pilares que norteia o planejamento e sustenta a execução da atividade de ensaios em voo”.

A segurança operacional de um produto aeronáutico depende da confiabilidade e da exatidão das informações obtidas durante o processo de desenvolvimento e de certificação deste produto. Além disso, o desenvolvimento de um novo produto, cujo envelope de voo ainda não foi completamente explorado, depende da execução satisfatória dos voos de ensaios. Para isso, deve-se garantir a integridade física da aeronave e da tripulação (ou equipagem de ensaios em voo). O fator mais agravante nesse contexto é o aumento exponencial da complexidade dos produtos aeronáuticos, cujos processos de desenvolvimento, certificação e qualificação requerem medidas mais exatas. Isto acarreta no aumento da complexidade dos sistemas usados nos ensaios necessitando de sistemas automatizados. Outro fator que deve ser considerado é o uso de novas tecnologias, muitas vezes imaturas, que aumentam o risco dos voos experimentais e operacionais.

A campanha de ensaios em voo tem por finalidade determinar as reais características de uma aeronave e/ou de um sistema qualquer. A execução de voos de ensaio numa campanha de ensaios deverá atender aos requisitos específicos de cada caso estabelecidos pelo cliente.

As fases de uma campanha de ensaios em voo são (Figura 3.1):

- Planejamento: a equipe técnica em conjunto com o cliente irá detalhar todos os requisitos técnicos operacionais do ensaio;
- Preparação: as equipes técnicas irão projetar e integrar na aeronave de ensaio todos os meios necessários para a aquisição das informações sobre as características deste objeto.

Tipicamente isso inclui:

- Instrumentação de Ensaio em Voo (FTI) que realiza as medições;
 - A determinação da incerteza de todas as medidas;
 - O desenvolvimento dos aplicativos de processamento de dados;
 - A Obtenção de autorização de voo experimental;
 - As definições dos voos de ensaios, denominados de Ordens de Ensaio e de Voos.
- Execução: realização dos voos de ensaios para aquisição das informações do comportamento da aeronave em condições reais. Nesta fase, existem duas regras básicas que são:
 - Retornar com a aeronave;
 - Coletar informações exatas para análise e redução de dados.

A primeira regra está relacionada à segurança de voo e a segunda está relacionada à segurança operacional.

- Análise: determinar as reais características do objeto ensaiado. Ao fim da análise são elaborados relatórios técnicos com as informações necessárias para o cliente.

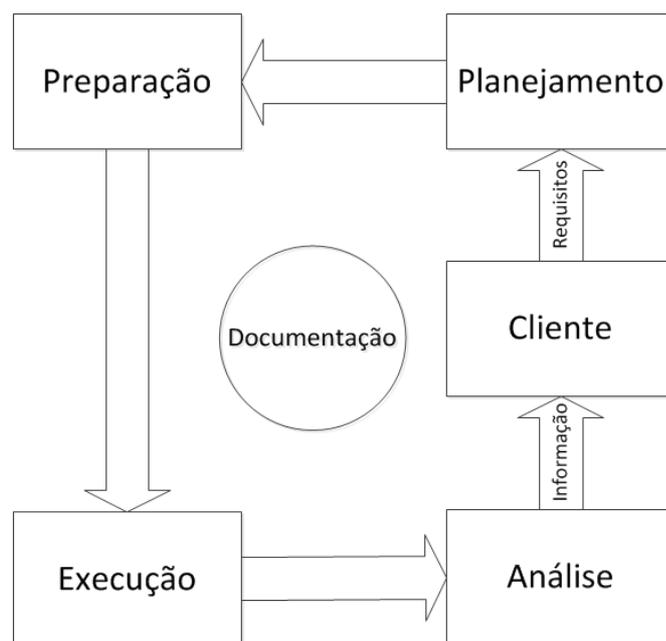


FIGURA 3.1 - Fases da campanha de ensaios em voo (Leite, Lopes e Souza, 2010).

3.1. Aquisição de Dados de Ensaios

O elemento principal que sustenta o desenvolvimento, integração e a certificação de um produto aeronáutico é a informação sobre as suas características. Em ensaios em voo é utilizado um sistema de aquisição de dados (SAD) embarcado no produto (na aeronave) que armazena todas as informações pertinentes (IRIG, 2007a). Após o ensaio, é possível acessar estes dados para que seja determinado o comportamento real do produto ensaiado.

A arquitetura de aquisição, gravação a bordo e reprodução pós-voo de dados para análises pode ser visualizada na Figura 3.2 (SOUSA, 2005). Como são realizados muitos voos de abertura de envelope que possuem risco médio e alto, as operações de aquisição e processamento de dados devem ser realizadas em ambiente de tempo-real.

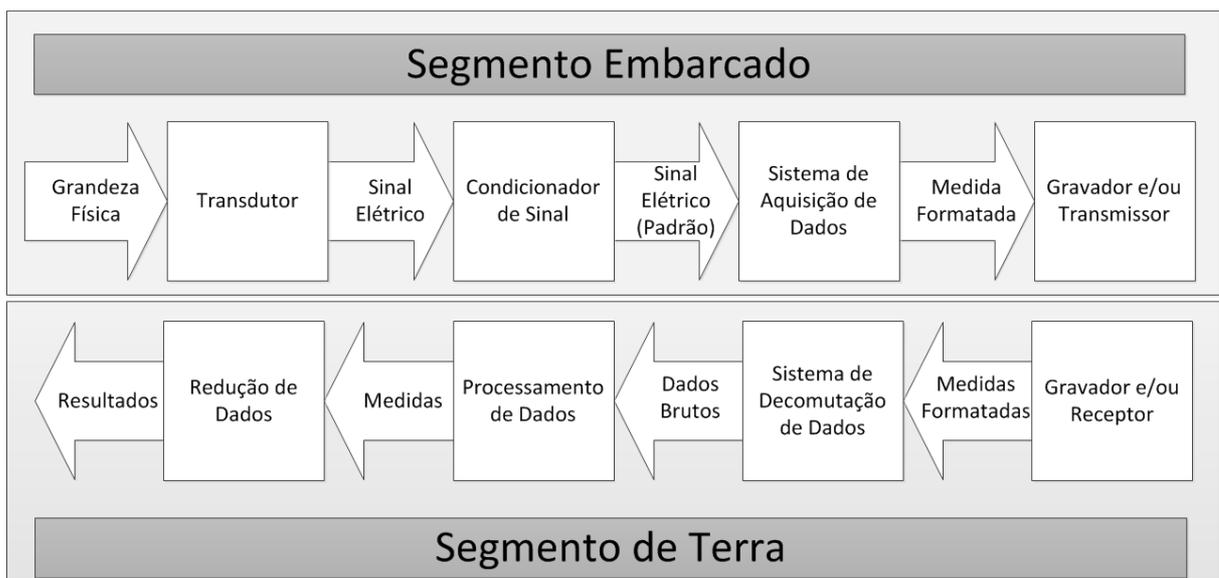


FIGURA 3.2 - Arquitetura para aquisição de dados (Sousa, 2005).

Desta forma, é necessária a introdução de um canal de comunicação e uma estação de telemetria (ET) para aquisição de dados em tempo real. O canal de transmissão de dados utiliza o Protocolo de Comunicação com Modulação em Códigos de Pulso (*Pulse Code Modulation* - PCM) (IRIG, 2007b).

Conforme a WSMR (2006), a utilização da ET em tempo-real atende dois importantes requisitos:

- Registro de todas as informações. Caso ocorra uma falha crítica que acarrete a perda da aeronave, a ET terá o registro de todas as informações necessárias para se

determinar a causa desta ocorrência. Desta forma, a equipe técnica poderá aperfeiçoar o projeto e continuar com o desenvolvimento do produto;

- Visualização de dados em tempo-real. Devido à condição anterior, dados recebidos em tempo real poderão ser apresentados de modo visual para a equipe técnica na sala da ET, para que sejam observadas eventuais violações dos parâmetros críticos em relação a segurança do voo. Além disso, através de aplicativos em tempo-real é possível verificar se os pontos de ensaio foram realizados em conformidade com os requisitos, aumentando a eficiência e a segurança dos ensaios.

O uso da ET para aquisição e processamento de dados em tempo real permite o monitoramento contínuo dos parâmetros relacionados à segurança do voo. Assim, caso haja alguma violação da condição de segurança duas situações podem ocorrer:

- A equipe em solo, na sala da ET, comanda o término do ensaio;
- A tripulação termina o voo o mais rápido possível e retorna para o aeródromo.

Com base nos dados coletados, tanto no SAD quanto na ET, as causas de eventuais violações serão investigadas para que o produto avaliado possa ser aprimorado e a campanha de ensaios reiniciada.

Segundo Leite, Lopes e Souza (2010), a arquitetura da ET do IPEV (Figura 3.3) usa processamento distribuído em três níveis que são:

- No sistema de decomutação são recebidas as medidas brutas do SAD da aeronave via PCM. Estas medidas são decomutadas, convertidas para unidade de engenharia (EU) e os parâmetros derivados são calculados;
- Nas estações de trabalho e computadores pessoais (PC) conectados na rede de alta velocidade da ET (como SCRAMNet), são realizados o processamento e a apresentação dos dados críticos para a segurança do voo;
- Nos PCs conectados na rede da ET, via Ethernet, são realizados o processamento e a apresentação dos outros dados adquiridos.

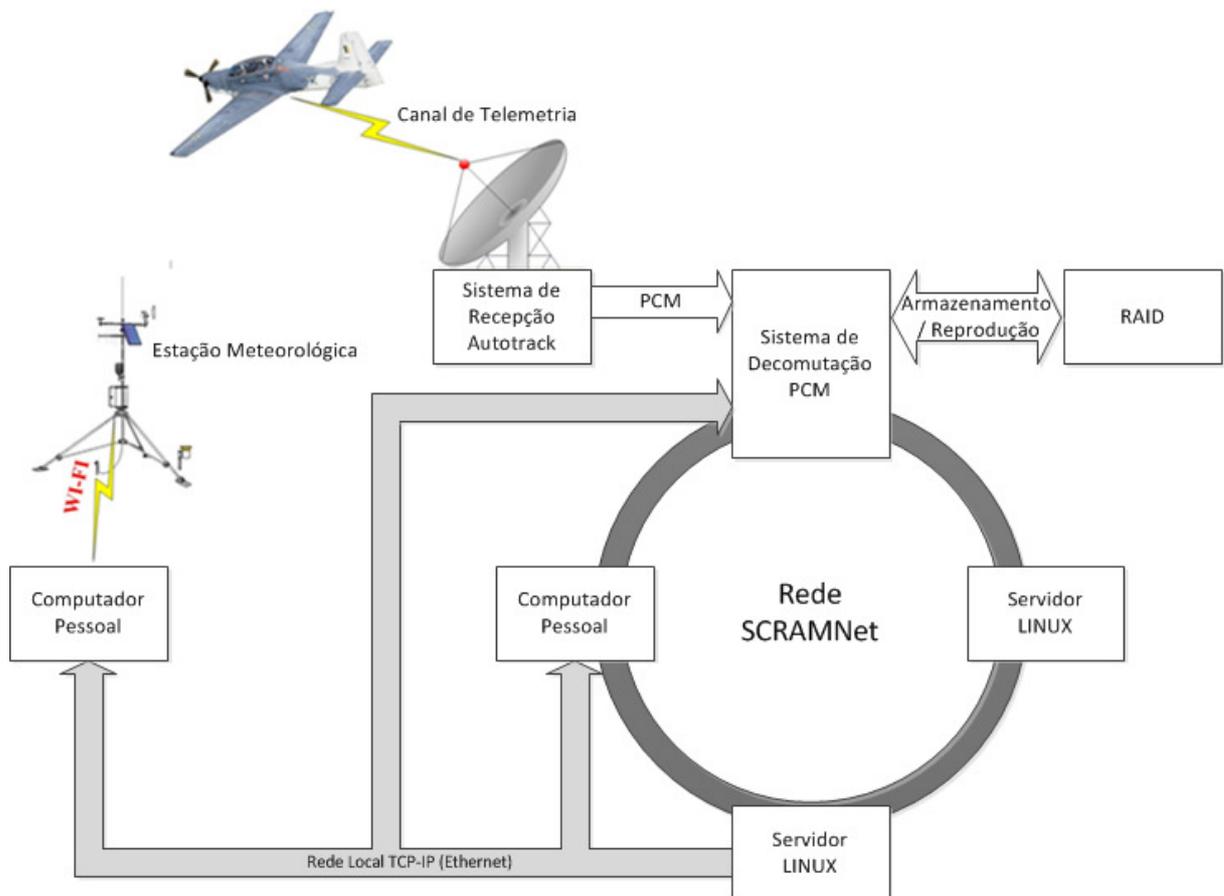


FIGURA 3.3 – Arquitetura da Estação de Telemetria no IPEV (Leite, Lopes e Souza, 2010).

A operação da ET não é muito eficiente, pois tarefas de decomutação e processamento de dados são executadas duas vezes, uma em tempo real e outra no pós voo para redução de dados. O motivo é que os dados recebidos pelo canal de telemetria contêm mais ruídos que os gravados no SAD da aeronave em função do canal de comunicação. Algumas técnicas novas permitem melhorar a deficiência do canal como a utilização da diversidade espacial (JEFFERIS, 2004) e da arquitetura iNet (HODACK, 2008).

Normalmente a ET tem a função de monitoramento dos aspectos de segurança de voo, mas o ruído do sinal e a perda de informações, que são características inerentes ao canal de comunicação, limitam a confiabilidade da ET. Além disso, as reduções de dados pós-voo exigem longo tempo de processamento. Conseqüentemente, a eficiência não é ótima na maioria dos casos.

Assim, o uso de aplicativos específicos em tempo-real tem grande contribuição para as campanhas de ensaios em voo, aumentando a eficácia, a eficiência e a segurança.

3.2. Calibração Anemométrica

A altitude e a velocidade são informações primordiais para se voar uma aeronave de forma segura. Estas informações são derivadas das medidas de pressões estática e dinâmica da aeronave que são obtidas pelo sistema de *pitot*-estático da aeronave. Durante um voo a aeronave perturba a atmosfera em torno do seu corpo e conseqüentemente altera as medidas referentes ao fluxo de ar. Em função disto, as medidas (i.e. altitude e velocidade) obtidas pelo sistema *pitot*-estático serão corrompidas pelo efeito aerodinâmico. Tal efeito, conhecido como erro de posição, aumenta proporcionalmente com o número de Mach Básico da aeronave e o mesmo deve ser modelado e minimizado. O processo de modelagem dos erros de posição do sistema *pitot*-estático requer a execução de uma campanha de ensaios em voo conhecida por calibração anemométrica.

Por causa de sua importância para o piloto, os sistemas usados para medir altitude e velocidade têm que ser inerentemente simples, confiáveis e independentes dos demais sistemas da aeronave tanto quanto possível.

Segundo Jordan (1973), os objetivos da calibração anemométrica são:

- Determinar os erros envolvidos no sistema anemométrico;
- Obter valores corrigidos de altitude, pressão, velocidade calibrada e número de Mach;
- Avaliar normas aplicáveis.

Em condições ideais, a velocidade verdadeira (V_t) e a altitude (Z_p) (FORNI, 1995) são computadas com o conhecimento da pressão de impacto (p_t) e da pressão estática (p_a) bem como dos dados de correção da compressibilidade do ar (ΔV_c) e da taxa de densidade (σ). Atrasos de comunicação e erros de posição corrompem os dados de p_t e p_a . Assim, o sistema anemométrico da aeronave recebe em suas entradas a pressão total do *pitot* (p_p) e a pressão estática básica (p_b) ao invés de p_t e p_a (EDWARDS, 1966).

Com as pressões captadas pelo sistema *pitot*-estático mais a temperatura de impacto, os erros de posição e o fator de correção da temperatura de impacto serão possíveis calcular diversos parâmetros importantes que são: o número de Mach (M), a Velocidade Calibrada (V_c) e a Velocidade Verdadeira (V_t). Em muitas aeronaves esta tarefa é realizada pelo Computador de Parâmetros Anemométricos (*Air Data Computer* – ADC).

O algoritmo do ADC está apresentado na Figura 3.4 e deve trabalhar da seguinte forma:

- Utilizando os coeficientes de correção, que são computados no laboratório de calibração, o instrumento e os erros associados são minimizados permitindo a determinação dos valores da velocidade do ar básica (V_b) e altitude (Z_{pb});
- Usando o modelo de erros da instalação, (Δp_b e Δp_p) que são experimentalmente computados na campanha de ensaios em voo de calibração anemométrica. Esses erros são minimizados para permitir a determinação das medidas de velocidade calibrada (V_c), altitude (Z_p), número de Mach (M) e pressão (P_a);
- Agora, usando o valor de ΔV_c referido pela atmosfera padrão, a velocidade equivalente (V_e) ao nível do mar do nível do mar pode ser calculada a partir de V_c ;
- Finalmente, usando a σ , a temperatura corrigida e o valor calculado de V_e , a velocidade verdadeira (V_t) pode ser estimada.

Deve ser observado que o cálculo de σ requer o conhecimento da P_a , da temperatura indicada (T_i) e do seu fator de recuperação associado (K).

Em síntese, o cálculo de V_t , Z_{pc} e número Mach da aeronave necessitam da execução da calibração em laboratório e da execução de campanhas de ensaio em voo.

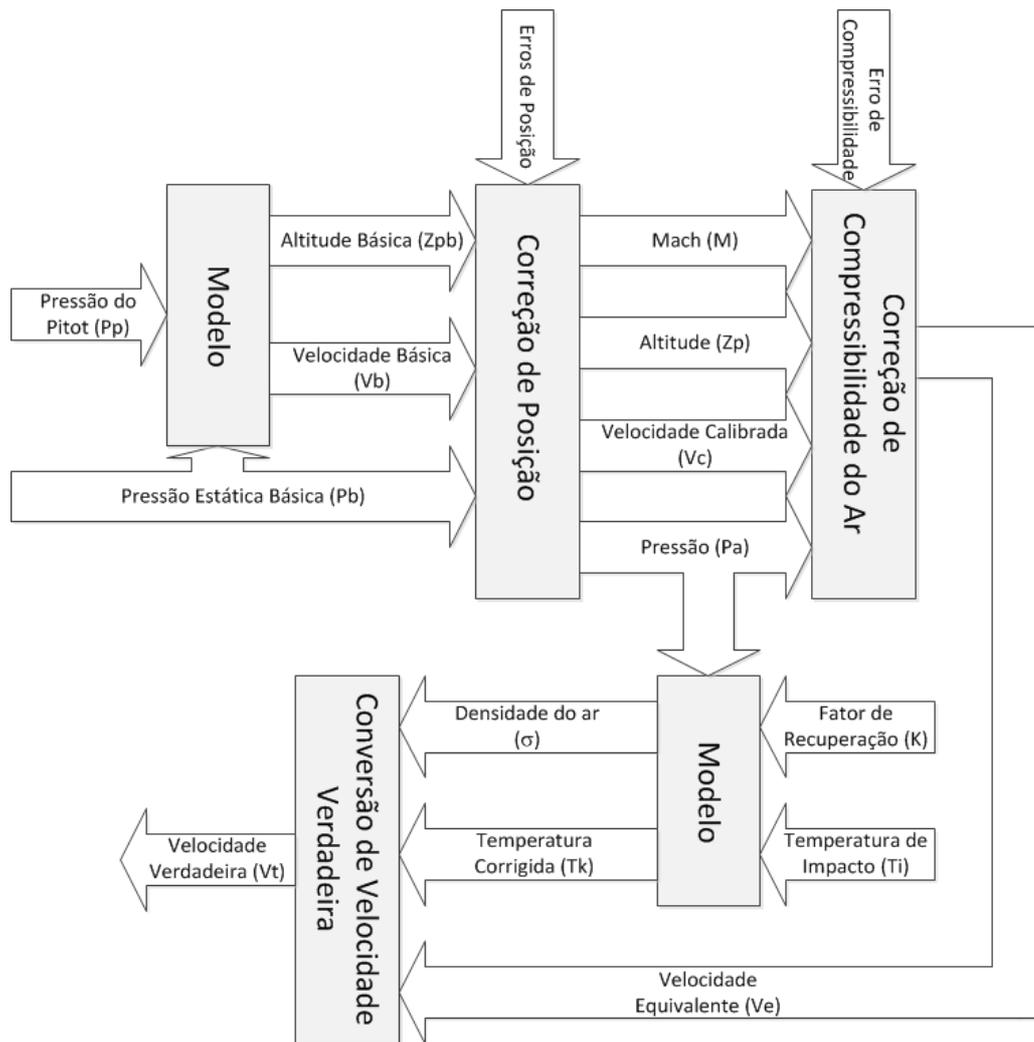


FIGURA 3.4 - Diagrama de Bloco da Calibração Anemométrica (Adaptado de Leite *et al*, 2009).

A escolha da técnica de ensaio a ser aplicada, composta por um único método ou pela combinação de métodos, será dependente da instrumentação disponível, do grau de exatidão requerido, e da faixa de velocidade e altitude para a qual se deseja a calibração.

A técnica mais desejável é aquela que requer um mínimo de tempo, meios (pessoal e material) e trabalho para se desenvolver um modelo exato para correção dos erros de posição, sobre todo o envelope de velocidade e altitude da aeronave. Em outras palavras, a técnica aplicada deve ser rápida e barata, e ainda confiável e completa.

Os diversos métodos de calibração existentes possuem nomenclatura variada dentro do setor de aviação. As denominações aqui apresentadas podem assim não ter correspondência direta em toda a bibliografia disponível.

Geralmente, mais de um sistema anemométrico requer calibração, como, por exemplo, os sistemas do piloto, co-piloto e de ensaios em voo. Os métodos referem-se à calibração do

sistema como um todo, não de apenas um instrumento isolado. Conhecer bem o projeto de cada sistema em análise é um passo importante no início do processo.

Segundo CEV (2011), os métodos mais conhecidos para a calibração anemométrica são: calibração em solo; corrida cronometrada (*Measured Course*); passagem pela torre (*Tower Fly-By*) e calibração em altitude.

O método mais usado é o de passagem pela torre (ARANTES, 2003). Este método é a maneira mais simples e econômica de se medir o erro de posição. O erro de altímetro pode ser determinado com uma exatidão muito boa, porém a obtenção da velocidade calibrada torna-se prejudicada nesse aspecto em velocidades abaixo dos 100 *knots* (i.e. 185,2 km/h).

Um sistema de visada com linhas de referência de altura é colocado numa torre de controle ou edifício alto, com o eixo focal perpendicular e a uma distância conhecida do eixo de passagem, marcado normalmente em uma pista de pouso. Desta forma, o ensaio deve ser realizado em local apropriado (ANAC, 2008).

Este método requer o conhecimento da altitude de referência exata da aeronave. A aeronave em análise voa numa velocidade constante sobre um caminho pré-definido, tão próximo do nível da torre quanto possível, como mostra a Figura 3.5. A altura de passagem da aeronave pode ser determinada de forma visual e imediatamente a partir das linhas de referência, ou posteriormente por meio de registro fotográfico da passagem.

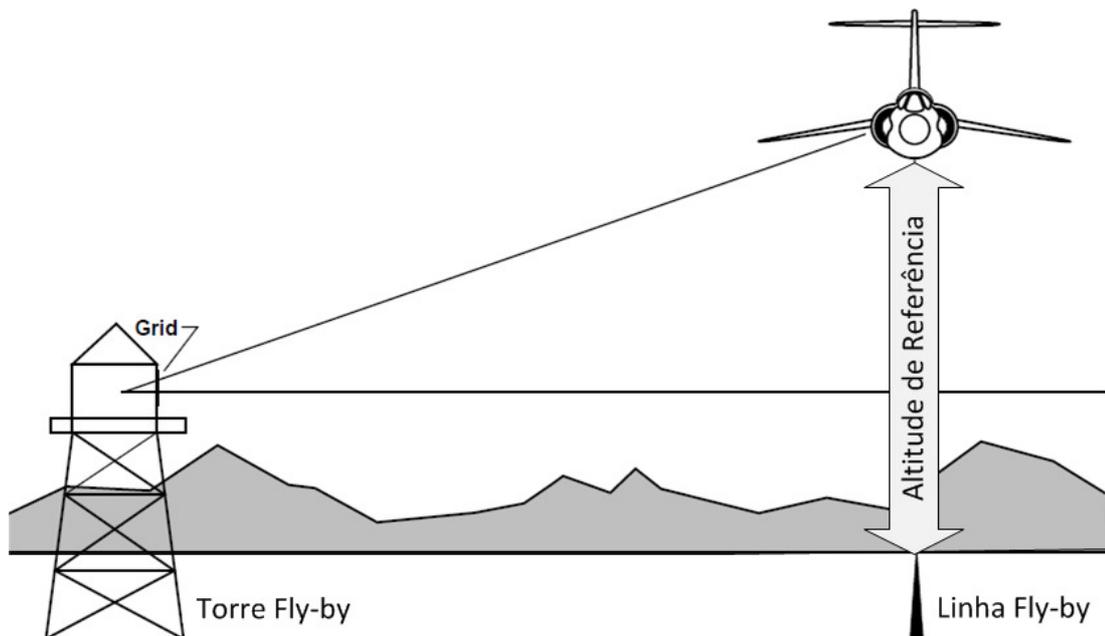


FIGURA 3.5 – Método Tower-Fly-By (Adaptado de Haering, 1995).

A Figura 3.6 mostra um voo da aeronave EMBRAER XAT-26 em alta velocidade (mais que 400 kts) e baixa altitude (por exemplo, 8,45 m). Estas condições são extremamente

perigosas e próximas de um desastre, sendo mais uma justificativa para o uso de sistemas em tempo-real visando um ensaio o mais seguro e eficiente.

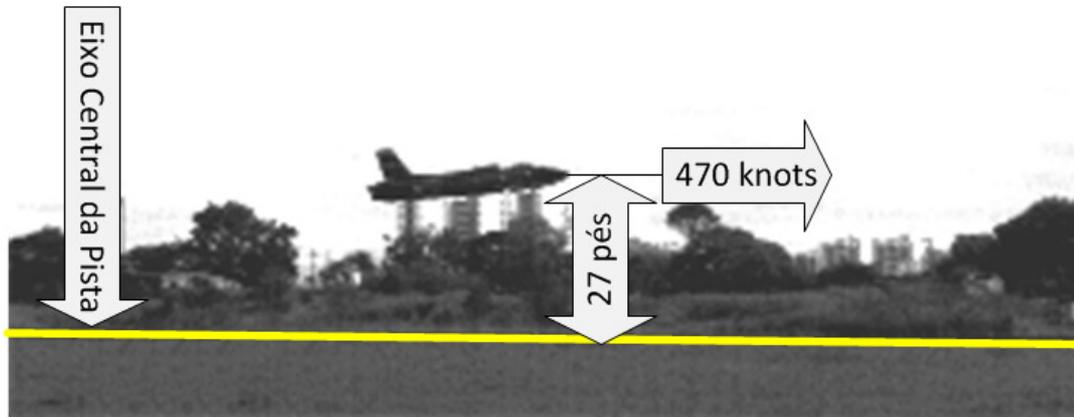


FIGURA 3.6 – Exemplo de ponto de ensaio com baixa altitude.

A pressão atmosférica é medida na torre ou em um ponto de altura conhecida, próximo ao eixo de passagem, utilizando um barômetro ou altímetro. A pressão estática (p_a) no nível da passagem é obtida considerando-se a altura da passagem em relação ao nível da medida de pressão. Para esta correção (Lei de Laplace), deve ser também conhecida a temperatura ambiente no mesmo nível da medida de pressão.

A altura da aeronave, no momento da passagem, pode ser determinada também por meio de equipamento de sistema de posicionamento global diferencial (DGPS), radar, cineteodolito, telêmetro laser ou rádio altímetro instalado na aeronave, tendo sempre em mente a exatidão adequada ao ensaio e o custo da instrumentação (FTI).

Para melhorar a exatidão do modelo, a determinação dessa diferença de pressão (geralmente conhecida como erro de posição estática) em todo o envelope de voo da aeronave pode ser executada, porém, isto pode ser complexo, demorado e caro. Além disso, o uso de sensores de posicionamento, tais como GNSS (*Global Navigation Satellite System*) não são adequados porque não podem alcançar altas taxas de amostragem (e.g. 400 amostras por segundo [am/s]). Além disso, a sincronização de dados e a correlação com GNSS não é tão simples (LEITE e WALTER, 2007). A maioria dos receptores GNSS não são sincronizados com o tempo do sistema de posicionamento global (GPS). Por outro lado, sensores inerciais são caros para esta aplicação.

A exatidão dos resultados da calibração anemométrica constitui fator crítico para as avaliações subsequentes de desempenho e qualidades de voo da aeronave. Erros no sistema anemométrico podem ter sérias implicações em: velocidades extremas (baixas/altas);

manobras; voos por instrumento (IFR - Instrument Flight Rules); baixa altitude. A gravidade do problema aumenta quando os erros de pressão são transmitidos para sistemas automáticos de voo, tais como sistemas de aumento de estabilidade (SAS - *System Of Active Stability*).

O cálculo da altitude e velocidade requer a realização da FTI, que utiliza a ET, a execução da calibração em laboratório e a execução da campanha de ensaios. O currículo do CEV inclui a execução de diversas campanhas de ensaio, entre elas a campanha de calibração anemométrica. Nesta campanha, os alunos do CEV voam aeronaves totalmente instrumentadas que usam FTI, na qual todos os parâmetros necessários são adquiridos, armazenados e transmitidos pelo SAD da aeronave para a ET através do canal de comunicação.

No IPEV, a execução da calibração em laboratório e a determinação da incerteza dos parâmetros dos ensaios é feita através do Sistema de Automação do Laboratório de Ensaios em Voo (SALEV) (SOUSA, 2005). Este sistema foi projetado em conformidade com a norma ISO 17025 (ISO, 2005) e determina de forma automática e em cadeia fechada (Figura 3.7) o modelo para minimização dos erros da medida e a incerteza associada aos parâmetros.

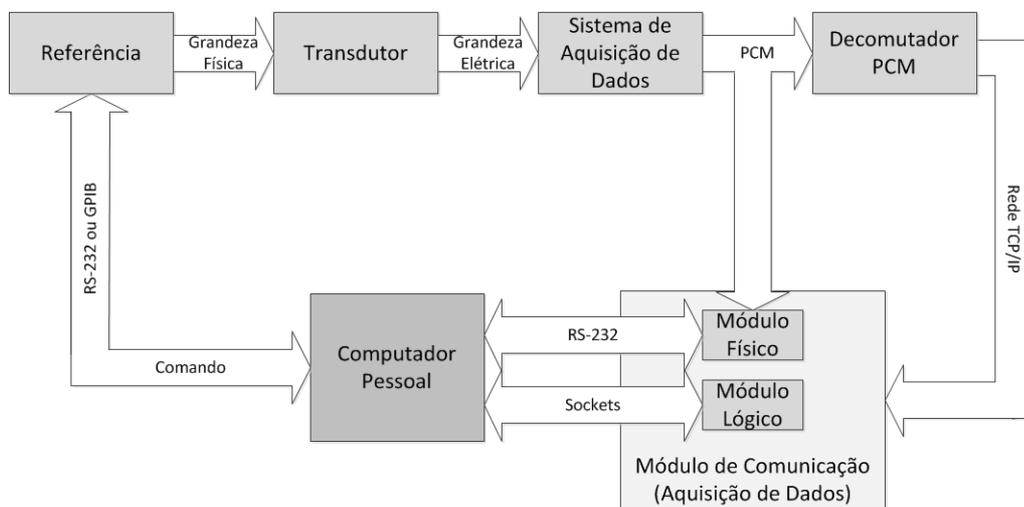


FIGURA 3.7 - Arquitetura do SALEV (Sousa, 2006).

3.2.1. Requisitos para Calibração Anemométrica

A calibração do sistema anemométrico consiste de vários pontos de ensaio (TP) variando de 1,2 vezes a velocidade de estol da aeronave (V_s) até a velocidade máxima na horizontal da aeronave (V_h). O intervalo entre cada ponto de ensaio varia, normalmente, de 2 a 5 minutos em função do tráfego no local do ensaio e/ou procedimentos realizados pela tripulação durante o voo. Este intervalo é o tempo máximo para determinar se o ponto de

ensaio foi válido. De acordo com Pinto (2007), cada ponto de ensaio deve ser realizado com altitude (Z_{pb}) e velocidade básica (V_b) estabilizadas (ver as indicações abaixo).

$$\bar{V}b_i \leq Vt_i \pm 5kts \quad (34)$$

$$\Delta Zpb_i \leq \pm 20 ft \quad (35)$$

$$\Delta Vb_i \leq \pm 2kts \quad (36)$$

Onde:

- ΔVb_i é o desvio máximo da velocidade básica da aeronave no ponto de ensaio $i^{\text{ésimo}}$;
- $\bar{V}b_i$ é a média da velocidade básica no ponto de ensaio $i^{\text{ésimo}}$;
- Vt_i é a velocidade básica programada para o ponto de ensaio $i^{\text{ésimo}}$;
- ΔZpb_i é o desvio máximo (em pés) da altitude da aeronave no ponto de ensaio $i^{\text{ésimo}}$.

Outros requisitos para a calibração anemométrica são:

- Vento máximo de través de 5 *knots* (i.e. 9,26 km/h);
- Turbulência inexistente ou mínima;
- Passagens fora do efeito solo;
- Derrapagem nula;
- Asas niveladas, no caso de aviões, ou com inclinação lateral mínima necessária para obtenção de derrapagem nula, no caso de helicópteros.

Nas passagens, a tendência geral é voar mais baixo em velocidades baixas e mais alto em velocidades altas, o que também deve ser controlado, dentro do possível, a fim de observar os critérios de validação previstos.

Em função da proximidade do solo, o contato visual do piloto deve ser constantemente mantido com o terreno. A concentração no ensaio por vezes degrada a consciência situacional do piloto, o que pode ser mitigado por uma boa familiarização com a aeronave, por instruções detalhadas e pelo compartilhamento do controle de altitude com os demais tripulantes a bordo. Atenção especial deve também ser dedicada à perda de noção de profundidade, causada pelo sobrevoo de áreas planas e uniformes. Isto mostra mais uma vez a necessidade de aumentar a segurança operacional do voo e de operações em tempo real.

4. APLICATIVO

Para aumentar a eficiência e a exatidão das informações nas campanhas de ensaios em voo de calibração anemométrica, foi desenvolvido um aplicativo que processa informações, em quase tempo-real, usando imagens provenientes de câmeras de vídeos digitais e técnicas de processamento de imagens digitais.

O aplicativo processa todos os dados requeridos (a cada quadro adquirido de uma imagem) durante a realização do voo, calcula a altitude e a velocidade da aeronave e determina a validade de cada ponto de ensaio. Isto permite que os resultados e relatórios de ensaios estejam prontos ao final de cada ponto de ensaio da campanha, conforme a proposta de Leite, Lopes e Souza (2009) e Leite, Lopes e Walter (2009).

Neste capítulo, é descrita a arquitetura do aplicativo que compreende a calibração das câmeras utilizadas nos ensaios, nos algoritmos desenvolvidos e nos testes e avaliações realizadas para validar o aplicativo desenvolvido.

4.1. Calibração das Câmeras

No IPEV, existe uma placa de calibração de câmera no padrão xadrez (Figura 4.1), na qual a câmera e erros de distorção da lente podem ser medidos. Com essas informações, é possível calcular os parâmetros do modelo que será usado para minimização dos erros sistemáticos utilizando o método de Heikkilä (1997).

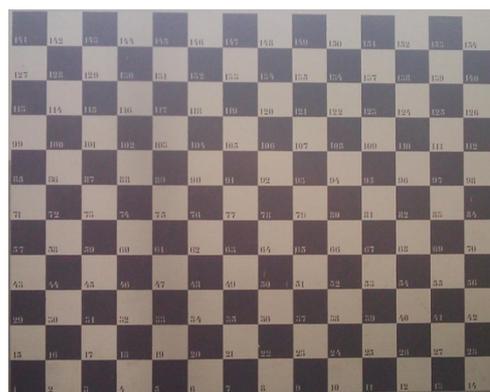


FIGURA 4.1 – Placa de calibração.

As câmeras utilizadas para aquisição das imagens nas campanhas de ensaio foram:

- MacroVis SpeedCam (400 am/s) CMOS (Figura 4.2), denominada de HSC;
- Sony DSC-HX1 (30 am/s) CMOS (Figura 4.3), denominada de LSC CMOS;
- Sony DSC-W510 (30 am/s) CCD (Figura 4.4), denominada de LSC CCD.



FIGURA 4.2 – HSC.



FIGURA 4.3 – LSC CMOS.



FIGURA 4.4 – LSC CCD.

Esta seção mostra a calibração completa da câmera LSC CCD baseada em um total de nove imagens do padrão xadrez. São utilizados os algoritmos de Bouguet (2010) que implementam o método de Heikkilä (1997). Os algoritmos permitem ler imagens de calibração, extrair os pontos de calibração (vértices dos quadrados presentes na imagem), calibrar a câmara, apresentar os resultados, adicionar e suprimir imagens, corrigir imagens distorcidas, alterar o modelo intrínseco da câmara escolhendo quais os parâmetros podem ser otimizados, entre outros. O procedimento mostrado a seguir foi realizado para as três câmeras utilizadas neste trabalho. O conjunto de imagens é mostrado no formato de miniaturas na Figura 4.5.



FIGURA 4.5 – Conjunto de imagens usadas na calibração da câmera LSC CCD.

Após a definição do conjunto de imagem, deve ser realizada a extração dos vértices dos quadriláteros de cada imagem. Para isto, é necessário conhecer a quantidade de imagens de calibração que serão processadas, o tamanho da janela de busca dos vértices dos quadriláteros e a quantidade de quadriláteros nas imagens de calibração (por exemplo, 9 quadriláteros na vertical e 12 na horizontal). Cada quadrilátero no padrão xadrez tem as medidas de 300 mm x 300 mm. Estas informações são utilizadas no algoritmo de calibração que realiza a contagem e a identificação dos quadriláteros no conjunto das imagens a ser calibrada. Após esta etapa os

vértices externos devem ser selecionados manualmente no conjunto de imagens. Os vértices selecionados devem estar pelo menos a 5 pixels de distância das extremidades da grade de quadriláteros nas imagens para que o algoritmo possa ser executado. A Figura 4.6 mostra os vértices externos selecionados na primeira imagem do conjunto de imagens.

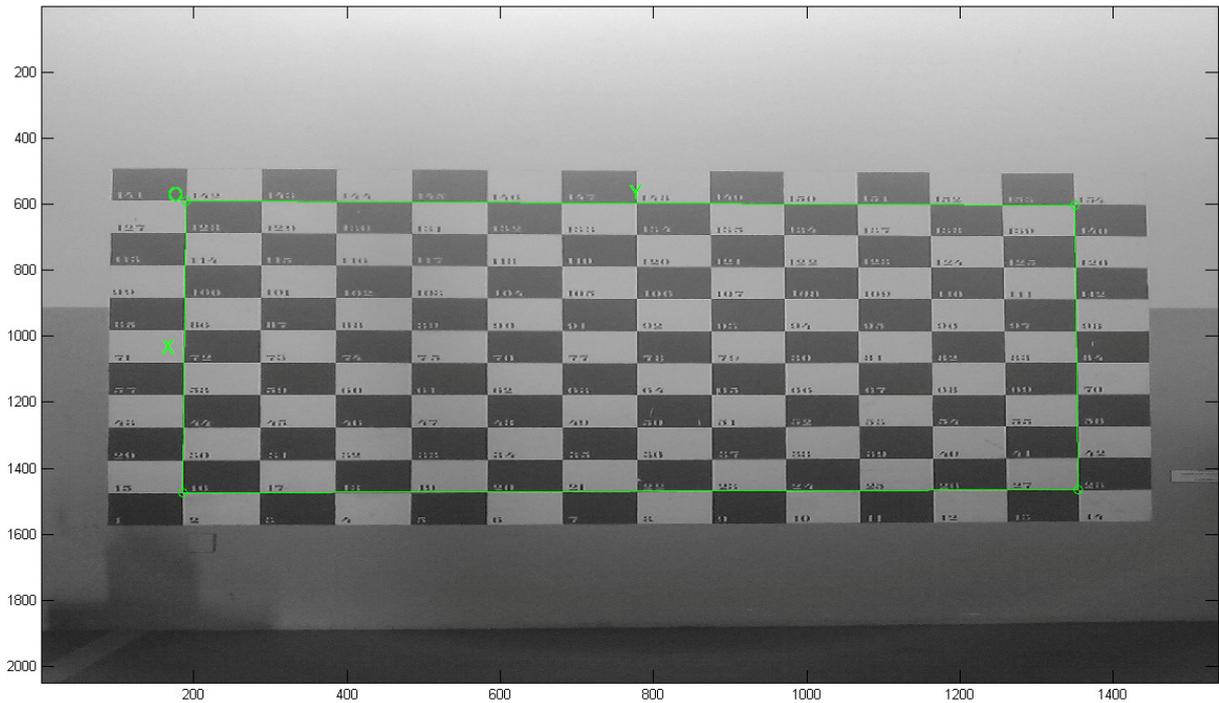


FIGURA 4.6 – Vértices externos selecionados na primeira imagem do conjunto de imagens.

Depois que todas as imagens têm os vértices externos selecionados, o algoritmo busca e mostra os vértices estimados dos quadriláteros internos à grade de calibração para as imagens do conjunto. O usuário deve analisar cada imagem verificando se houve distorção radial. No caso em que a imagem apresente elevada distorção, os vértices selecionados podem estar afastados dos vértices reais dos quadriláteros na imagem. Assim, é possível introduzir um valor de ajuste para o coeficiente de distorção radial da lente, de forma a auxiliar o algoritmo a encontrar os vértices dos quadriláteros na imagem. A Figura 4.7 mostra os vértices selecionados pelo algoritmo para a segunda imagem do conjunto de imagens, após aplicado um valor de ajuste no algoritmo de busca.

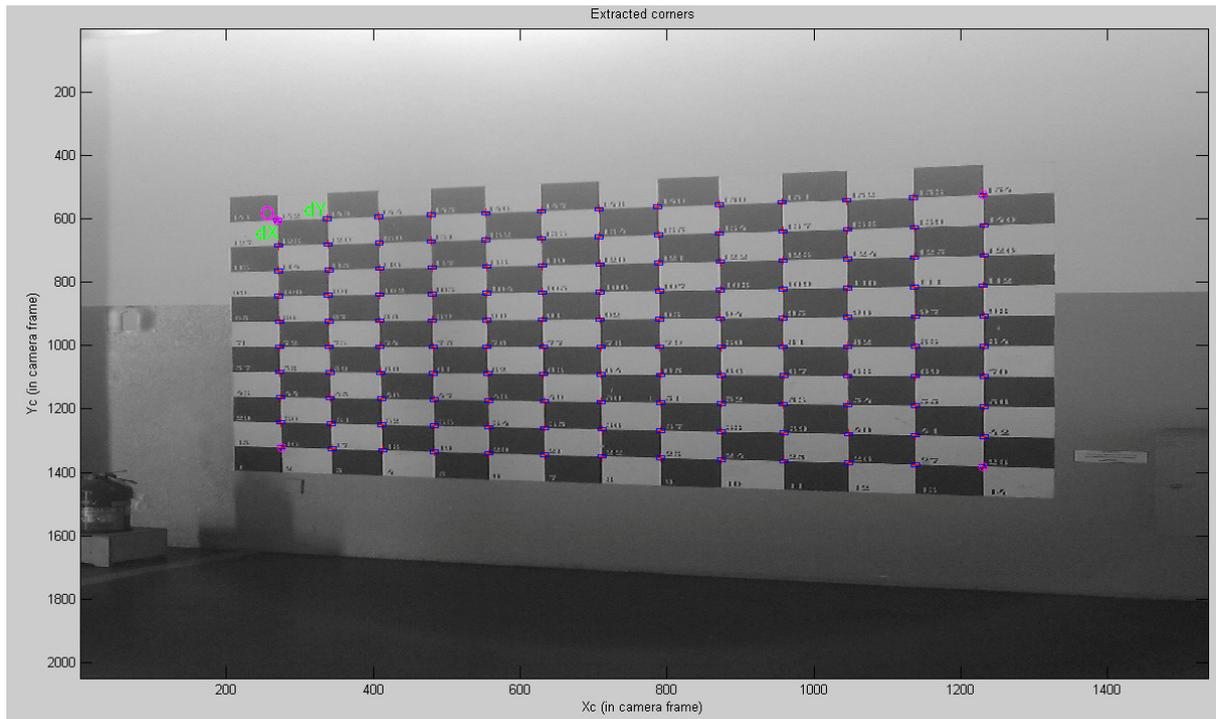


FIGURA 4.7 – Vértices internos selecionados na segunda imagem do conjunto de imagens.

A calibração da câmara é realizada em duas fases: aproximação linear e otimização não-linear. A fase de aproximação linear calcula uma solução inicial (*closed-form solution*) para os parâmetros de calibração, não incluindo a distorção da lente. A fase de otimização não-linear minimiza o erro de re-projeção total de todos os parâmetros de calibração.

Após a primeira calibração da câmara, é possível realizar uma série de procedimentos que permitem analisar e estimar com melhor exatidão os parâmetros da câmara, por exemplo: a utilização da ferramenta de análise dos erros que permite observar o gráfico da correlação cruzada do erro de re-projeção (Figura 4.9); a visualização 3D gráfica dos parâmetros extrínsecos da câmara (várias posições e/ou orientações do plano de calibração em relação à câmara ou vice-versa, ver Figura 4.10); a utilização da distorção da lente estimada na fase de calibração e da re-projeção dos pontos de calibração para uma nova e mais exata extração desses pontos; realizar novas calibrações escolhendo os parâmetros a serem otimizados ou optando por não estimar esses parâmetros; visualização gráfica do efeito da distorção ao longo da área da imagem (Figura 4.11), permitindo comparar a importância da componente radial pela componente tangencial da distorção, de forma a escolher o modelo de distorção apropriado.

A Figura 4.8 mostra a re-projeção dos erros para a oitava imagem do conjunto.

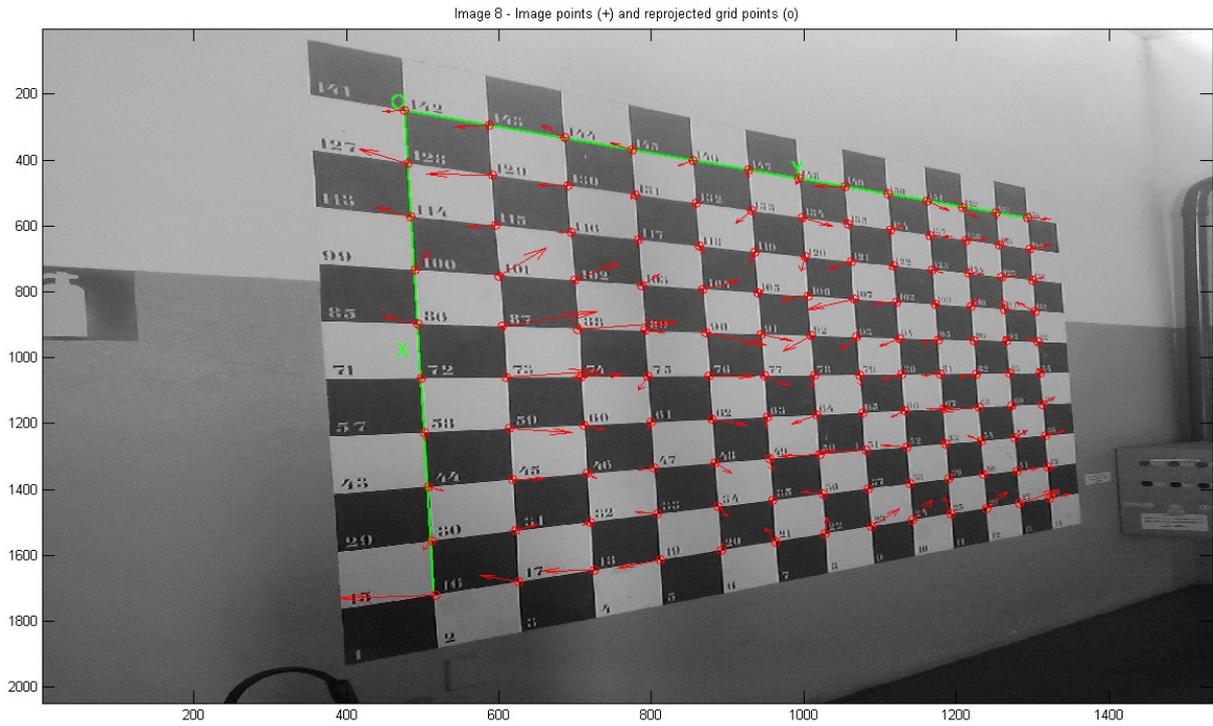


FIGURA 4.8 – Re-projeção dos Erros para a oitava imagem do conjunto.

A pirâmide vermelha na Figura 4.10 representa o campo de visão efetivo da câmera definida pelo plano da imagem.

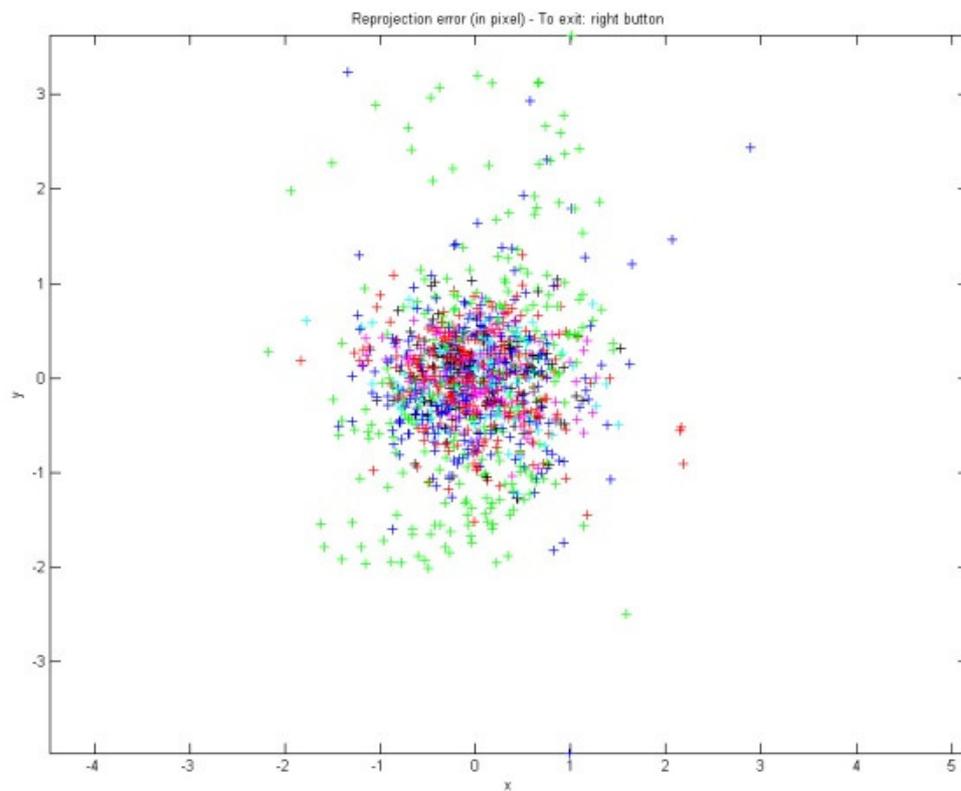


FIGURA 4.9 – Re-projeção dos Erros.

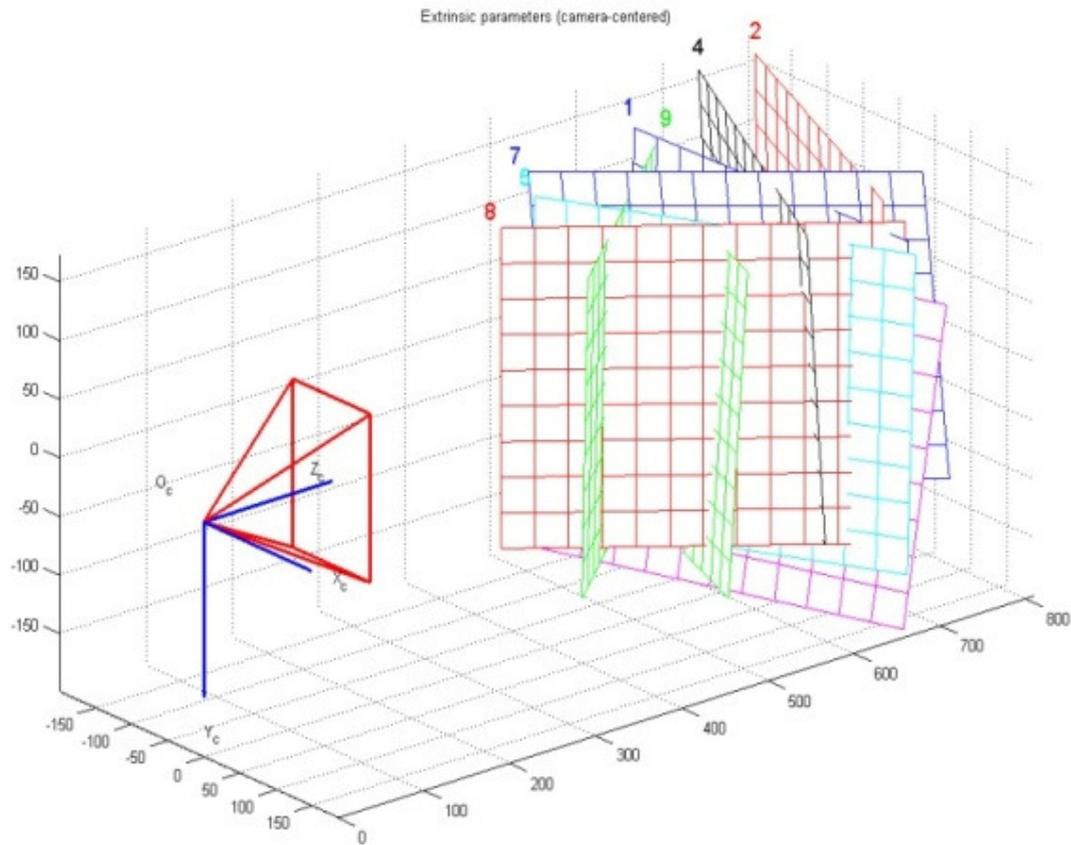


FIGURA 4.10 - Parâmetros extrínsecos.

A Figura 4.11 mostra o impacto do modelo completo de distorção (radial + tangencial) em cada *pixel* da imagem. Cada seta representa o deslocamento efetivo de um *pixel* induzido pela distorção da lente. Observe que os pontos nos cantos da imagem são deslocados em aproximadamente 20 *pixels*. O ponto com a cruz indica o centro da imagem e o círculo indica a localização do ponto principal.

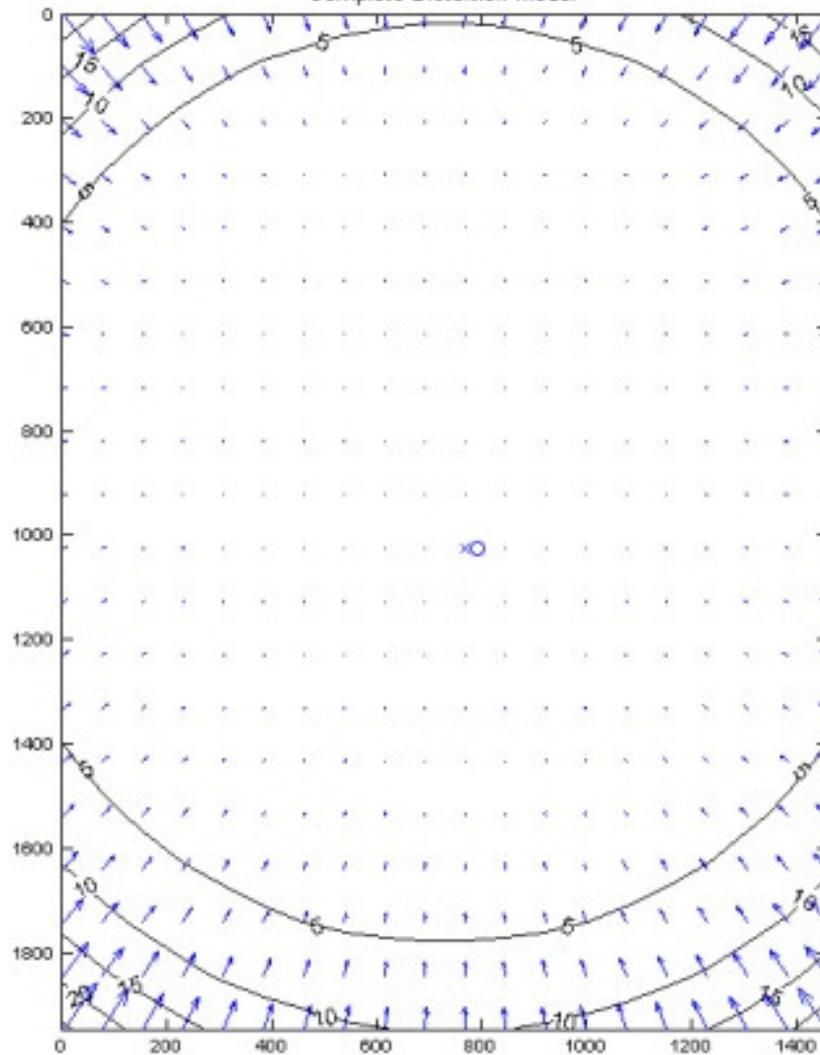


FIGURA 4.11 – Modelo completo de distorção.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram um ponto de interesse (a cruz vermelha) e pequenos erro de re-projeção (círculo verde) sem otimização e com otimização, respectivamente.

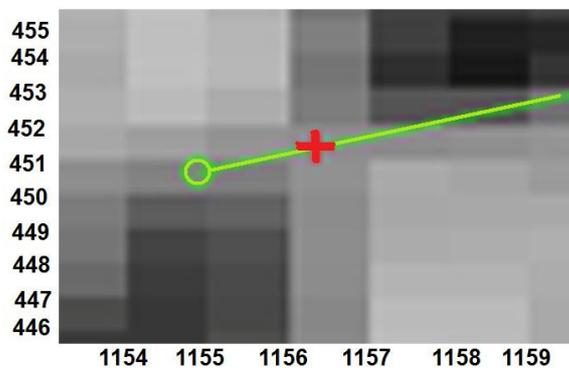


FIGURA 4.12 – Erro de re-projeção sem otimização.

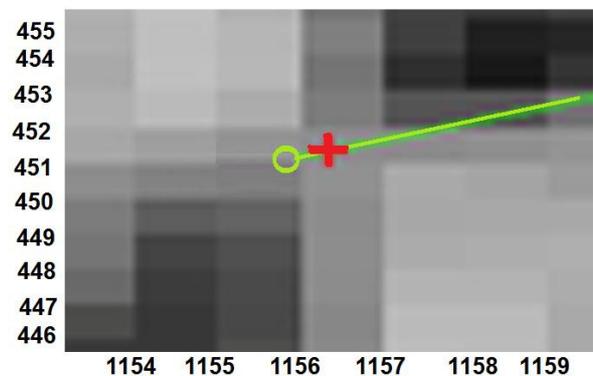


FIGURA 4.13 – Erro de re-projeção com otimização.

Os principais erros calculados são mostrados na Tabela 4.1. Estes erros são usados nas medições realizadas pelo aplicativo.

Câmera	Sem Otimização	Com Otimização
LSC CCD	x = 0.87683 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.85038 pixels $\pm 1\sigma$	x = 0.62864 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.49624 pixels $\pm 1\sigma$
LSC CMOS	x = 1.05433 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.825872 pixels $\pm 1\sigma$	x = 0.36429 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.39654 pixels $\pm 1\sigma$
HSC	x = 0.57432 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.553291 pixels $\pm 1\sigma$	x = 0.22376 pixels $\pm 1\sigma$ y = 0.24974 pixels $\pm 1\sigma$

TABELA 4.1 – Erros para posição dos *pixels* após calibração das câmeras.

4.2. Cenário da Campanha de Ensaio de Calibração Anemométrica

A Campanha de Ensaio em Voo de Calibração Anemométrica necessita de um local apropriado para ser realizada. O local utilizado pelo IPEV é a pista do aeroporto de São José dos Campos. Neste local é posicionada uma câmera digital estática que está em local previamente conhecido. A aeronave realiza o voo passando pela área válida de ensaio (ARV), indicada na Figura 4.14 pelo quadrilátero vermelho. Para cada ponto de ensaio, o piloto de ensaio deve manter a trajetória da aeronave alinhada ao eixo central da pista.

No local, existem também pontos de referência (PR) que estão localizados nos cantos inferiores da área válida e são utilizados para definir a base para cálculo da altitude da aeronave. Estes pontos de referência são placas metálicas estáticas (de um metro quadrado) posicionadas em locais previamente conhecidos, localizadas próximos à pista do aeroporto.

A determinação da altitude exata da aeronave a partir de um quadro requer que a aeronave realize o voo em um caminho conhecido, dentro do campo de visão da câmera passando pelos pontos de referência.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, quadros da execução de pontos de ensaio deste tipo de Campanha de Ensaio em Voo com a aeronave EMBRAER XAT-26 (Xavante) e o helicóptero HELIBRAS H-55 (modelo Esquilo).

A distância entre os pontos de referência é de 112,6 m $\pm 0,4$ m @ 1σ , a partir da qual são realizadas todas as medições. Pode-se visualizar o local apropriado para este tipo de ensaio na Figura 4.16, bem como a disposição da câmera e dos pontos de referência no local.

A validade do ponto de ensaio é obtida através da conformidade de todos os dados adquiridos em relação aos requisitos apresentados na Seção 3.2.1.

A ocorrência de qualquer ponto de ensaio inválido requer sua repetição. Portanto, o uso de aplicações em tempo real permite a aquisição dos dados necessários enquanto a aeronave realiza o voo, provendo maior segurança no procedimento, aumentando a eficiência do ensaio e evitando a repetição de voos, que é uma atividade onerosa financeiramente.

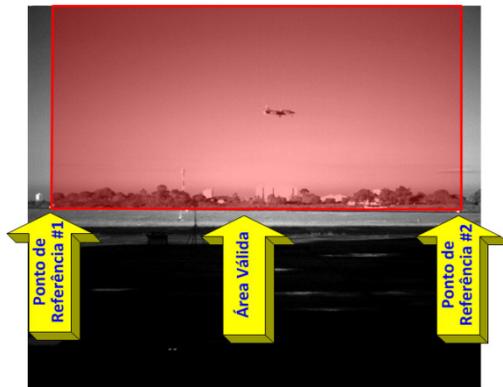


FIGURA 4.14 - Ponto de Ensaio Válido com a aeronave XAT-26.



FIGURA 4.15 - Ponto de Ensaio válido com helicóptero H-55.

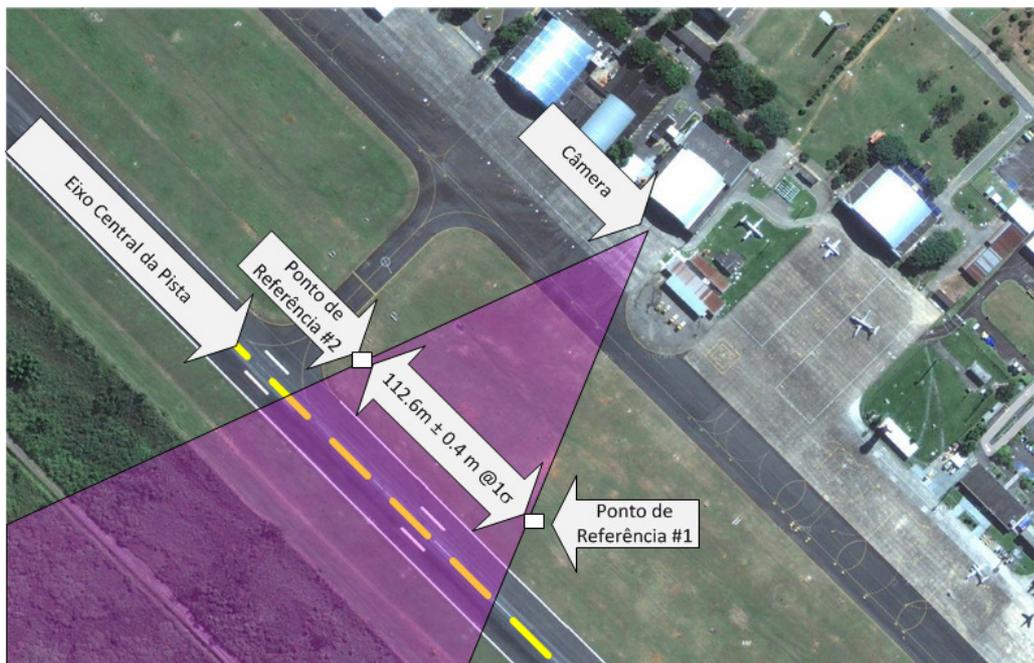


FIGURA 4.16 - Local da Campanha de Calibração Anemométrica.

No desenvolvimento deste aplicativo, foi considerado que:

1. As condições meteorológicas podem variar rapidamente, de um ponto de ensaio para outro na mesma Campanha de Ensaio. Desta forma, a imagem de fundo a partir do qual o alvo (aeronave) é reconhecido, pode ter mudanças significativas (Figura 4.17).



FIGURA 4.17 - Pontos de ensaio com contraste/iluminação diferentes.

2. Embora o centro de cada ponto de referência (PR) seja bem definido (Figura 4.18), a localização deste ponto na imagem (Figura 4.19) pode afetar a exatidão devido à resolução da imagem. Os pontos de referência nas imagens adquiridas pelas câmeras podem ter o tamanho de 6×6 pixels, para a câmera de alta taxa de amostragem, e de 4×4 pixels, nas câmeras de baixa velocidade.

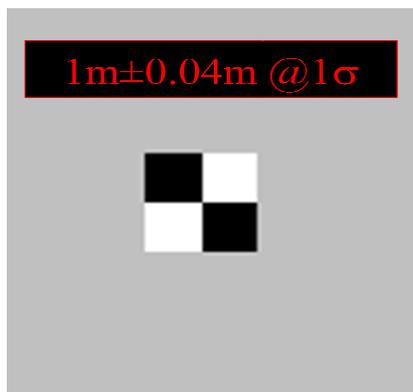


FIGURA 4.18 - Ponto de referência original (PR).

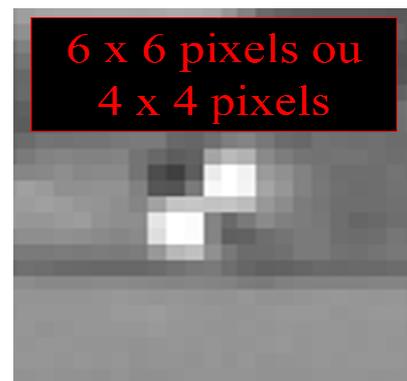


FIGURA 4.19 - Ponto de Referência provido pela Câmera HSC. Neste caso, 6×6 pixels.

3. Processar as imagens, realizar os cálculos e gerar os resultados em quase tempo-real. Os pontos de ensaio desta campanha variam de 0,2 segundos a 5 segundos,

dependendo da aeronave e da velocidade determinada para o ponto de ensaio. Com uma câmera adquirindo imagens a 400 am/s, por exemplo, um ponto de ensaio pode gerar 2000 quadros (ou mais) para serem processados pelo aplicativo.

O padrão de cores e a frequência de aquisição de cada câmera podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Câmera	Padrão de Cor	Frequência
LSC CCD	RGB ou escala de cinza	30 am/s
LSC CMOS	RGB ou escala de cinza	30 am/s
HSC	Escala de cinza	400 am/s

TABELA 4.2 – Padrão de cores e frequência de aquisição das câmeras.

Neste aplicativo, foi considerado inicialmente que a trajetória da aeronave está alinhada ao eixo central da pista e que os erros de distorção das lentes da câmera foram previamente modelados e minimizados usando as técnicas mencionadas.

Devido às particularidades do local para realização dos pontos de ensaio na campanha, não é necessário detectar obstáculos no campo de visão da câmera ou nuvens durante o ensaio. Além disso, este tipo de ensaio não é realizado em condições de chuva.

Cada ponto de ensaio tem as imagens (vídeos) armazenadas na memória da câmera. Ao final de cada ponto de ensaio, o vídeo armazenado é transferido para o computador através da interface USB (Universal Serial Bus). Depois disso, a memória da câmera deve ser limpa para o próximo ponto de ensaio.

Com o vídeo no computador, o aplicativo realiza o processamento dos quadros (imagens do vídeo), extrai as coordenadas do alvo de cada quadro, corrige as coordenadas do alvo para minimizar os erros de distorção das lentes da câmera, realiza o cálculo de altitude e velocidade (TSPI - *Time Speed Positioning Information*), determina a validade do ponto de ensaio e permite a visualização dos resultados. A arquitetura do aplicativo pode ser visualizada na Figura 4.21.

Para a operação deste aplicativo, o usuário deve configurar a frequência de aquisição da câmera e a aeronave que realizará os ensaios (Figura 4.20). Estas informações são necessárias para a computação da velocidade e para estabelecer o limite mínimo de segurança para altitude do voo baseado na envergadura da aeronave.



FIGURA 4.20 - Tela de configuração do aplicativo.

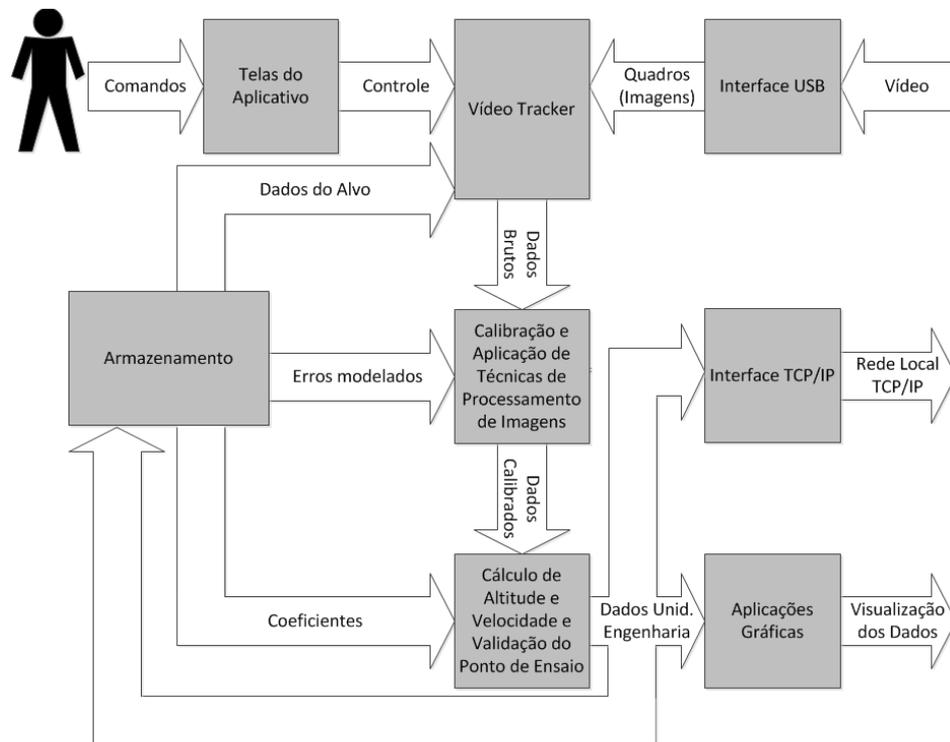


FIGURA 4.21– Arquitetura do aplicativo (VASCONCELOS et al 2011a).

4.3. Algoritmos desenvolvidos

O aplicativo foi dividido em cinco algoritmos principais. O detalhamento desses algoritmos para processamento das imagens e obtenção dos resultados é mostrado a seguir.

4.3.1. Detecção dos Pontos de Referência

Inicialmente, uma área na imagem é selecionada pelo usuário ao redor do ponto de referência. A imagem original é cortada na área selecionada. Na imagem resultante é aplicado ajuste de contraste usando mapeamento linear, e depois binarização.

Depois disso, foi desenvolvido um algoritmo que realiza a busca do centro do ponto de referência. O centro de referência de cada ponto de referência é usado como base para o cálculo da altitude e também para delimitar a área válida.

Uma vez encontrado o centro do ponto de referência, o ponto de referência é destacado na imagem original. Caso contrário, uma nova área deverá ser selecionada pelo usuário.

Este procedimento deve ser realizado para os dois pontos de referência.

4.3.2. Detecção do Eixo Central da Pista

Para a detecção do eixo central da pista, deve ser detectada a localização da pista na imagem, que provê a linha base de referência para cálculo da altitude. Para este aplicativo em particular, esta referência está localizada a quatro *pixels* para a câmera de alta taxa de amostragem e dois *pixels* abaixo do centro de cada ponto de referência para as câmeras de baixa velocidade. A Figura 4.22 mostra um ponto de referência (PR) destacado na imagem (ponto verde), bem como a pista do aeroporto (linha branca tracejada). O ponto amarelo indica que este ponto está sendo considerado para cálculo da altitude.

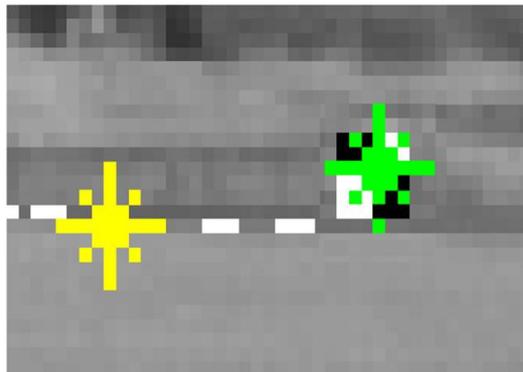


FIGURA 4.22 – Pista e PR destacados na imagem após aplicação do algoritmo.

4.3.3. Detecção da Aeronave

Para detectar a aeronave é usado o processo de segmentação onde cada quadro é dividido em subconjuntos exclusivos. Cada região é homogênea e uniforme, de acordo com algumas propriedades, como textura ou tom, cujos valores diferem em alguns aspectos e significados das propriedades de cada região vizinha.

A seqüência de quadros ($I(t)$) adquirida pela câmera pode ser colorida (i.e. como no formato RGB) ou em tons de cinza (*grayscale*) conforme ilustrado nas Figuras 4.23 e 4.25. Em ambos os casos a imagem a ser processada deverá estar representada em escala de cinza. Uma imagem colorida no formato RGB possui três planos de imagem independentes, uma para cada cor primária. Algumas técnicas de processamento de imagem (e.g. equalização de

histograma) trabalham apenas em um plano de imagem. Ao fazer a conversão de qualquer plano de imagem colorida para tons de cinza, não há perda de conteúdo e forma, sendo extremamente recomendado para aplicações em tempo-real, pois a quantidade de informações a ser processada será reduzido para cerca de 33% da imagem colorida (WALSH, 1958 e KIVER, 1965).

Considerando que a câmera é fixa durante toda a seqüência, o fundo da imagem permanece estático durante o ponto de ensaio, com algumas mudanças de iluminação.

Deste modo, o primeiro quadro do ponto de ensaio é usado como referência para a imagem de fundo (**IB**) do ponto de ensaio todo (Figuras 4.24 e 4.26).



FIGURA 4.23 - Imagem de um ponto de ensaio com o XAT-26.



FIGURA 4.24 - Exemplo de imagem de fundo de um ponto de ensaio.



FIGURA 4.25 - Imagem de um ponto de ensaio com o H-55.



FIGURA 4.26 - Exemplo de imagem de fundo de um ponto de ensaio.

Subtraindo a imagem de fundo (**IB**) por cada quadro subsequente (**It**) no ponto de ensaio, tem-se a imagem residual (**Irt**), que, provavelmente, contém o alvo (a aeronave) e mais alguns ruídos, conforme expresso por (37).

$$Irt_{x_i,y_j} = It_{x_i,y_j} - IB_{x_i,y_j} \quad (37)$$

O próximo passo é detectar as bordas da imagem residual que correspondem às regiões com mudanças de intensidade. Isso corresponde às regiões de maior intensidade da função que expressa a intensidade dos pixels da imagem. Desde que a intensidade de luz da aeronave seja menor que a imagem de fundo, a imagem residual é dada por (38).

$$Irt_{x,y} = \begin{cases} 255, & \text{if } (Ib_{x_i,y_j} - It_{x_i,y_j}) > \mu \\ 0, & \text{if } (Ib_{x_i,y_j} - It_{x_i,y_j}) \leq \mu \end{cases} \quad (38)$$

Onde:

- $x_i y_j$ é a coordenada da imagem;
- μ é o valor do limiar da conversão correspondente na imagem resultante.

Os métodos de detecção de bordas citados na Seção 2.6.1.3 foram testados nesse aplicativo, sendo que os melhores resultados foram com o método de Sobel. O resultado da imagem residual após detectar as bordas na imagem usando o método de Sobel é mostrado na Figura 4.27.

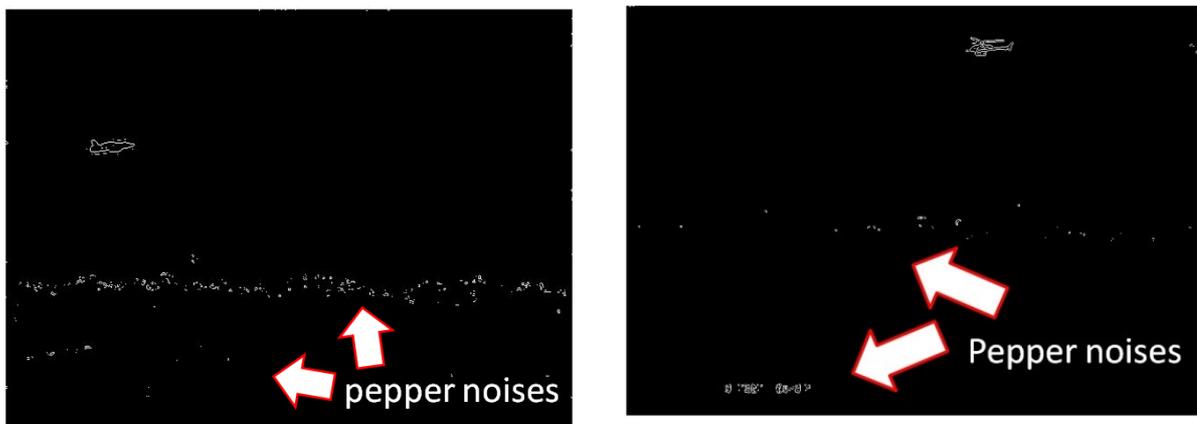


FIGURA 4.27 - Imagem residual com método de Sobel.

Depois disso, é realizada a conexão de componentes (CCL) para detectar a aeronave (Figuras 4.28 e 4.30). Inicialmente, os ruídos (*pepper noises*) são removidos através do uso de operadores morfológicos (primeiro erosão, depois dilatação) na imagem residual. Os CCLs são classificados em ordem crescente de acordo com o tamanho.

O aplicativo verifica a quantidade de CCLs existentes no quadro. Normalmente, deve ter apenas um CCL, que deve ser a aeronave. Entretanto, outros objetos podem produzir mais

de um componente com tamanho semelhante ao do alvo (como a passagem de um veículo no fundo da imagem original) e, neste caso, o quadro é descartado.

Depois, apenas os *pixels* do perímetro da aeronave são usados (Figuras 4.29 e 4.31). Para determinar os *pixels* do perímetro do componente selecionado (\mathbf{Ca}) é utilizado (39).

$$\mathbf{Ca} = V_{x_k y_l} \quad (39)$$

Onde:

- V é o componente detectado;
- x_k é a localização do *pixel* do perímetro do eixo x;
- y_l é a localização do *pixel* do perímetro do eixo y.

Finalmente, a posição do alvo é considerada a média dos valores da localização dos *pixels* de \mathbf{Ca} , estimada na forma (40).

$$\begin{cases} x_T = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ y_T = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N y_l \end{cases} \quad (40)$$

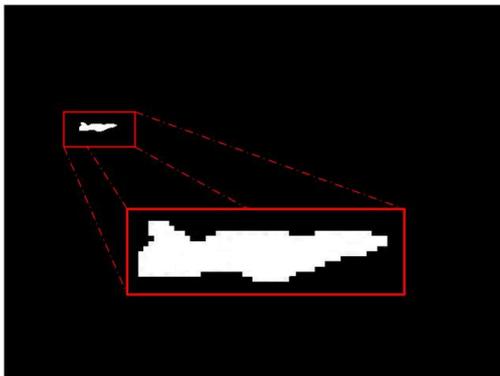


FIGURA 4.28 - Exemplo de CCL da aeronave XAT-26.

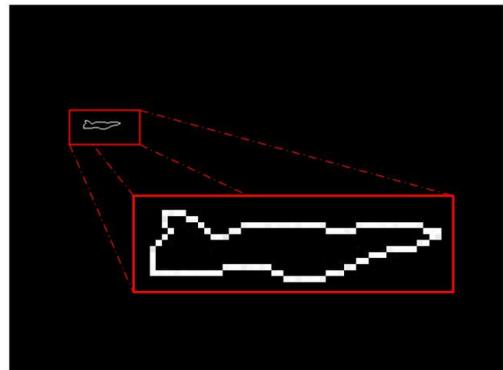


FIGURA 4.29 - *Pixels* do Perímetro da Aeronave XAT-26.

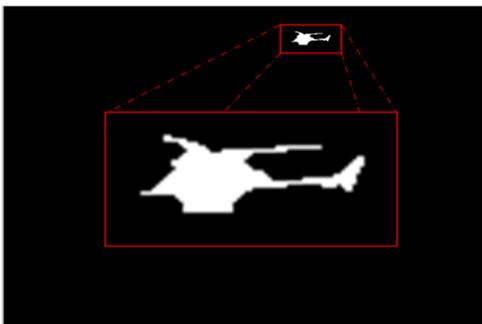


FIGURA 4.30 - Exemplo de CCL do helicóptero H-55.

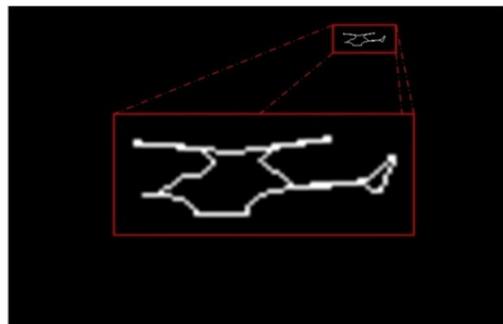


FIGURA 4.31 - *Pixels* do Perímetro do helicóptero H-55.

4.3.4. Cálculo do TSPI

Neste momento, o requisito é encontrar um ponto fixo de referência na aeronave para o cálculo da altitude e velocidade. Vários testes foram realizados com os seguintes pontos da aeronave:

- Centróide;
- Bico;
- Cauda;
- Trem-de-pouso.

Os melhores resultados foram obtidos com:

- Centróide para cálculo de altitude em helicópteros;
- A cauda para cálculo de velocidade em helicópteros;
- A cauda ou bico para cálculo de altitude e velocidade para aeronaves de asa fixa.

A Figura 4.32 mostra um exemplo da cauda como ponto de referência da aeronave.

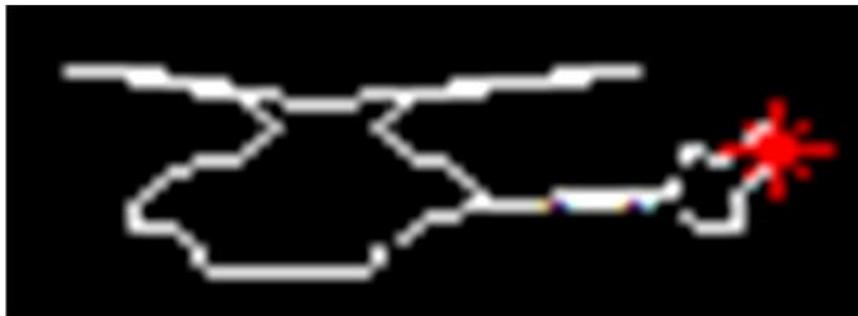


FIGURA 4.32 – Exemplo da cauda como ponto de referência na aeronave.

Em helicópteros ocorre a mudança da área causada pelo movimento das pás do rotor principal, inviabilizando o uso do centróide para cálculo da velocidade e do bico para qualquer cálculo (Figura 4.33). O trem-de-pouso também não foi considerado satisfatório devido a ruídos (*pepper noises*) próximos a essa região.

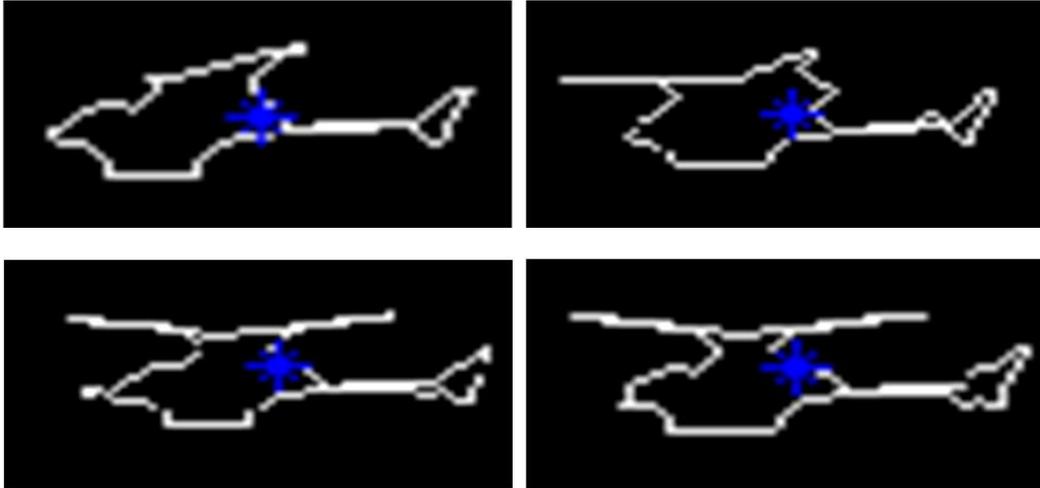


FIGURA 4.33 – Exemplo de posição do centróide (ponto azul) e variação da área do helicóptero em função do movimento das pás do rotor principal.

Em aeronaves de asa fixa, o trem-de-pouso é usado apenas para velocidades próximas da estol e, desta forma, foi desconsiderado. Além disso, o centróide não resultou em bons resultados.

Para aeronaves de asa fixa com hélices frontais, o resultado deve ser semelhante aos helicópteros em função dos movimentos das pás da hélice, e desta forma, apenas a cauda deve ser considerada para o procedimento de cálculo.

Assim, com o conhecimento da posição dos pontos de referência e do ponto de referência da aeronave, a altitude pode ser calculada em relação ao eixo central da pista usando geometria Euclidiana (Figura 4.34).

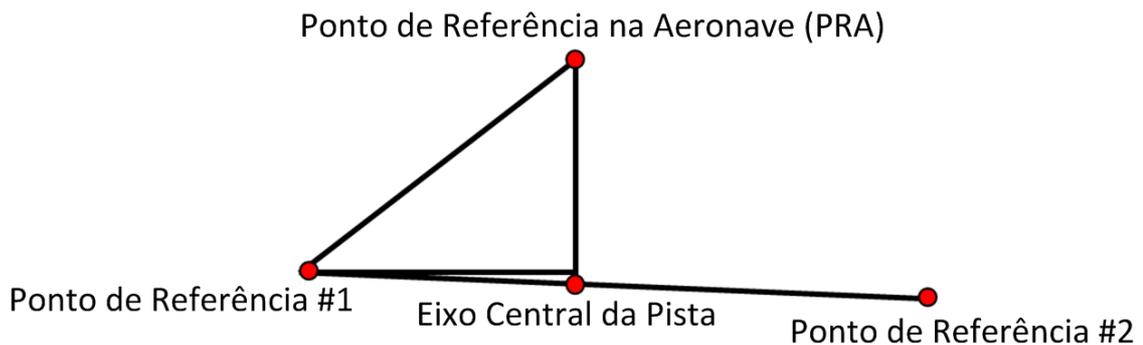


FIGURA 4.34 – Cálculo da altitude.

A Velocidade Verdadeira (V_t) é calculada por (41).

$$V_t = \frac{k\Delta S}{\Delta t} \text{ (m/s)} \quad (41)$$

Onde:

- k é o fator de calibração da imagem, que neste caso é (m/pixel);

- ΔS é o deslocamento em pixel entre dois quadros consecutivos (*pixels*); e
- Δt é a taxa de aquisição da câmera (quadros/s).

O fator de calibração da imagem é calculado da distância real entre os pontos de referência ($112,6 \text{ m} \pm 0,4 \text{ m} @ 1\sigma$) dividida pelo número de *pixels* entre eles.

Opcionalmente, esta informação pode ser determinada do tamanho real do ponto de referência ($1 \text{ m} \pm 0,04 \text{ m} @ 1\sigma$) dividido pela quantidade de *pixels* referente a esse tamanho.

4.3.5. Validação do Ponto de Ensaio

A altitude e a velocidade da aeronave são computadas e armazenadas para cada quadro válido. Portanto, no final de cada ponto de ensaio, o aplicativo verifica a conformidade dessas medidas com os requisitos apresentados na Seção 3.2.1 para validar ou rejeitar o ponto de ensaio.

Notas:

1. Em função da câmera estar em posição fixa, as Etapas 4.3.1 e 4.3.2 são executadas automaticamente no primeiro quadro do vídeo para cada ponto de ensaio;
2. As demais Etapas (4.3.3 a 4.3.5) são executadas em todos os quadros subsequentes do vídeo no ponto de ensaio corrente.
3. As funções implementadas podem ser visualizadas no ANEXO I.

4.4. Experimentos e Resultados

Este aplicativo foi avaliado com as aeronaves HELIBRAS H-55 (Figura 4.35) e EMBRAER XAT-26 (Figura 4.36) completamente instrumentadas durante a campanha de ensaio de calibração anemométrica do Curso de Ensaio em Voo nos anos de 2010 e 2011.



FIGURA 4.35 - HELIBRAS Esquilo (HB-350-1).



FIGURA 4.36 - EMBRAER Xavante jet (XAT-26).

O aplicativo foi avaliado com a execução de 269 pontos de ensaios e 444.628 quadros, sendo:

- 28 pontos de ensaio e um total de 8130 quadros com a câmera LSC CCD;
- 26 pontos de ensaio e um total de 5580 quadros com a câmera LSC CMOS;
- 215 pontos de ensaio e um total de 430918 quadros com a câmera HSC.

As câmeras foram testadas com diferentes configurações e os melhores resultados foram obtidos com o recurso de estabilização da imagem habilitado e na melhor resolução de filmagem (640 x 480 para LSC e 720i para HSC). Estas configurações produziram silhuetas da aeronave mais definidas. Para a câmera HSC, a alta taxa de amostragem reduz o efeito de borramento que prejudica a detecção do alvo e a exatidão das medições.

O aplicativo foi desenvolvido em MatLab® R2010 *Student* e avaliado com *notebook Intel®Pentium IV Core™ 2 Duo CPU T5800 2.00 GHz, 4 Gb RAM e Microsoft Windows 7 Professional*.

O algoritmo para detecção da aeronave (Seção 4.3.3.) menciona que se existir mais de um CCL de tamanho semelhante ao tamanho da aeronave no quadro, este quadro é descartado. Depois dos testes, foi mostrado que o algoritmo valida 99,489 % dos quadros e os descartes não afetaram os resultados finais devido à taxa de amostragem das câmeras.

Inicialmente, este aplicativo havia considerado que a trajetória da aeronave deveria estar alinhada ao eixo central da pista. Depois de alguns pontos de ensaios executados foi percebido que nem sempre o piloto mantém este alinhamento (Figura 4.37). Esta informação

foi obtida a partir da análise pós-voo dos dados DGPS recebidos na aeronave. Desta forma, ajuste de posição da aeronave foi inserido no algoritmo para cálculo da altitude e velocidade. Esse ajuste é baseado no tamanho da aeronave na imagem (i.e. profundidade da aeronave em relação à câmera).

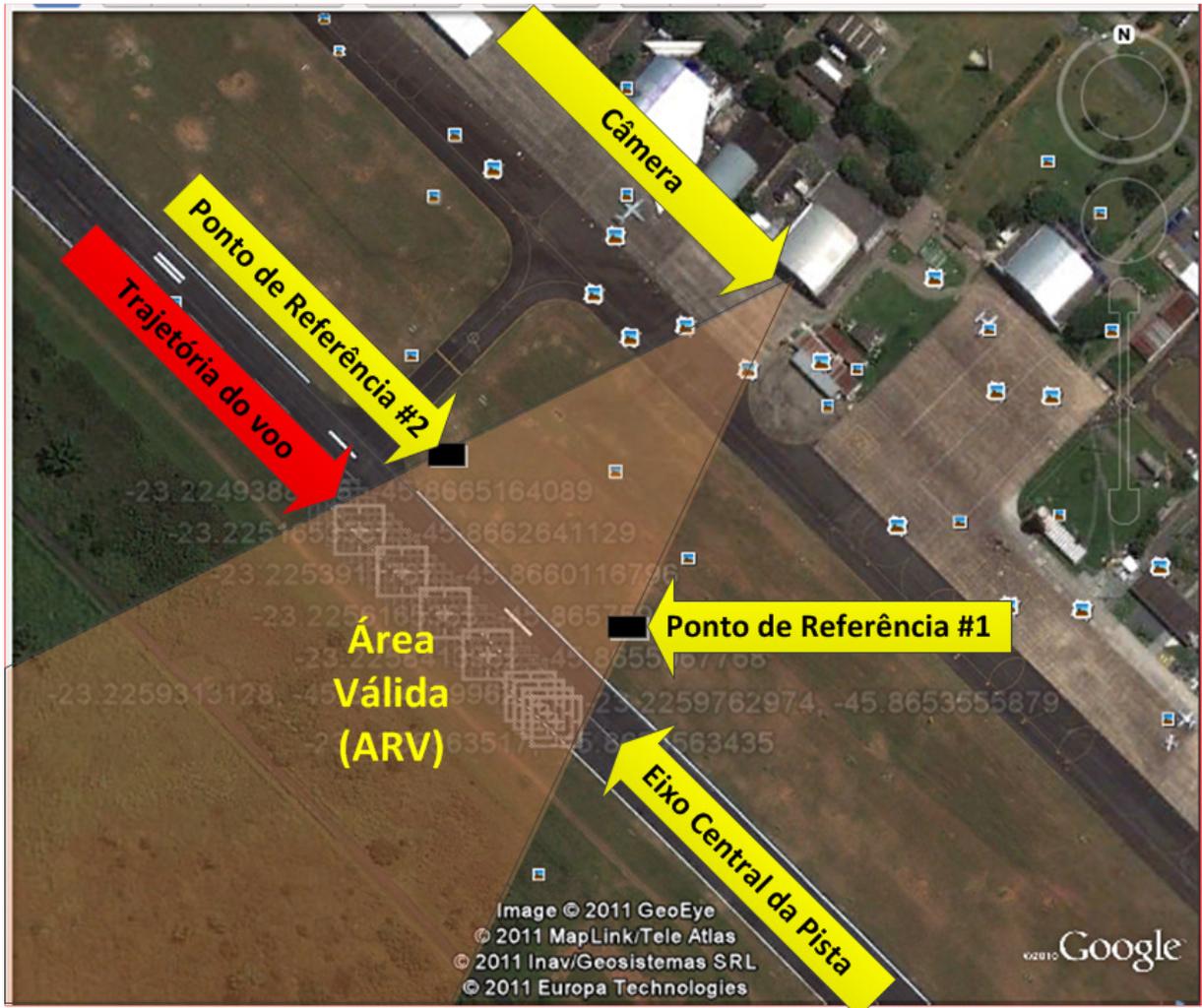


FIGURA 4.37 – Exemplo de trajetória do voo não alinhada ao eixo central da pista.

Para cada quadro do ponto de ensaio algumas características são destacadas (Figuras 4.38 e 4.39):

- A posição do centróide da aeronave (ponto azul);
- A posição como ponto de referência na cauda/bico da aeronave (ponto vermelho);
- A altitude de segurança mínima para realização do ponto de ensaio (linha vermelha);
- A velocidade (V) e a altitude Z_{pb} (H) calculadas;
- Os pontos de referência (ponto verde);
- O eixo central da pista (linha branca tracejada).

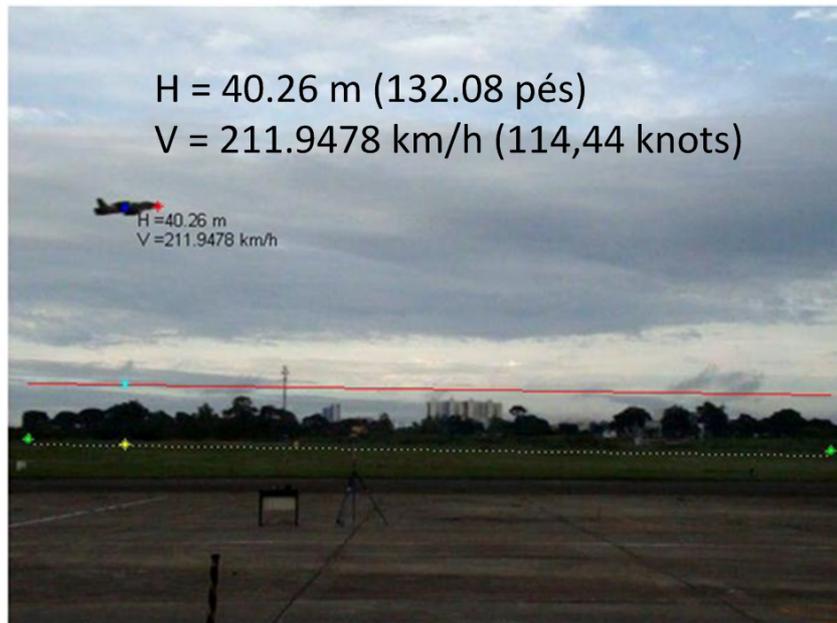


FIGURA 4.38 - Exemplo de ponto de ensaio com aeronave EMBRAER XAT-26.

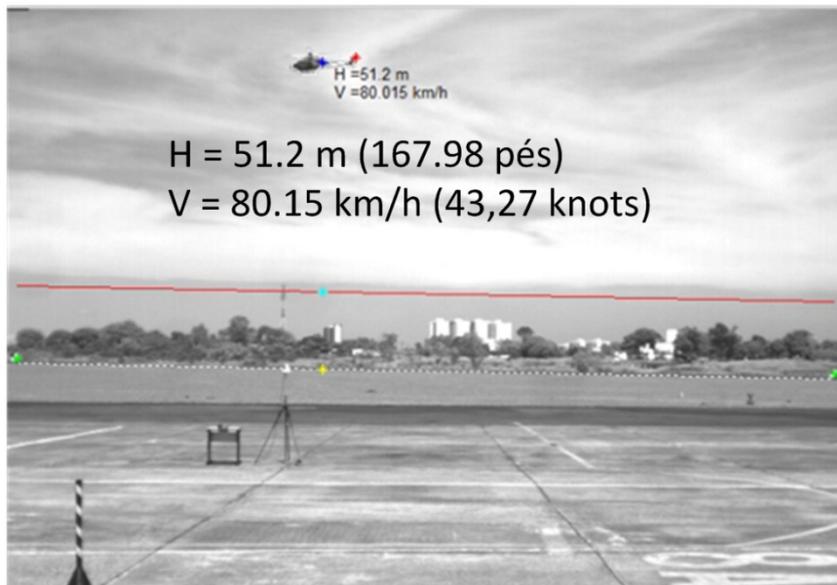


FIGURA 4.39 - Exemplo de ponto de ensaio com helicóptero HELIBRAS H-55.

4.4.1. Experimentos com a câmera HSC

Para a validação dos pontos de ensaio, os dados calculados pelo aplicativo foram comparados aos dados gerados pela FTI e recebidos pela ET. Além disso, na aeronave existe instalado um receptor GPS, utilizado para cálculo da altitude. As informações providas por este receptor também foram comparadas aos resultados produzidos pelo aplicativo, pois esta é a referência para cálculo da altitude.

As informações do GPS são utilizadas apenas no pós-voos para cálculo da altitude. Além disso, a taxa de aquisição dos receptores GPS, em geral, é muito baixa. Esses fatores não são ideais para a segurança e eficiência para este tipo de campanha de ensaio.

Vale ressaltar que as informações da estação de telemetria, GPS e do aplicativo foram correlacionadas, pois as taxas de aquisição são diferentes e as bases de tempo destes sistemas não estão perfeitamente sincronizadas (VASCONCELOS et al, 2011c). A taxa de aquisição da estação de telemetria é de 32 am/s, do GPS é de 10 am/s e do aplicativo é de 30 am/s ou 400 am/s, dependendo da câmera utilizada.

A posição do GPS na aeronave (Figura 4.40) é diferente do ponto de referência da aeronave usado pelo aplicativo (centróide, cauda ou bico) e, desta forma, para os gráficos apresentados a seguir foi realizado um ajuste de posição do GPS para o ponto de referência da aeronave.



FIGURA 4.40 – Posição do centro de fase da antena GPS na aeronave.

O custo computacional do aplicativo é mostrado na Figura 4.41. São considerados os Algoritmos 4.3.3 a 4.3.5, pois os Algoritmos 4.3.1 e 4.3.2 são executados apenas uma vez, antes do início do ponto de ensaio. Na Figura 4.41, o “Cálculo da altitude e velocidade” representa o Algoritmo 4.3.4.; a “Validação do ponto de ensaio” representa o Algoritmo 4.3.5 e as demais fatias do gráfico representam o Algoritmo 4.3.3.

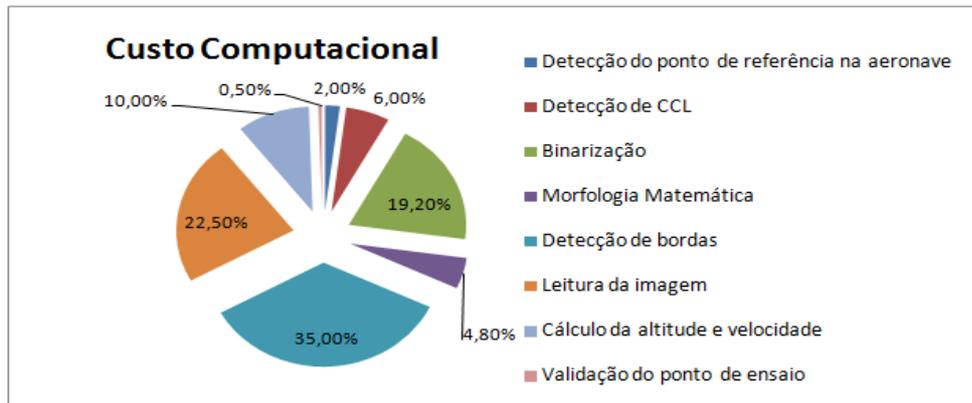


FIGURA 4.41 – Custo computacional dos algoritmos.

Para o cálculo da altitude do helicóptero foram utilizados o centróide e a cauda como ponto de referência na aeronave. A Figura 4.42 mostra a altitude calculada pelo aplicativo com um ponto de ensaio para o helicóptero H-55 HELIBRAS usando o centróide como ponto de referência na aeronave. Esta altitude foi comparada com a altitude de referência.

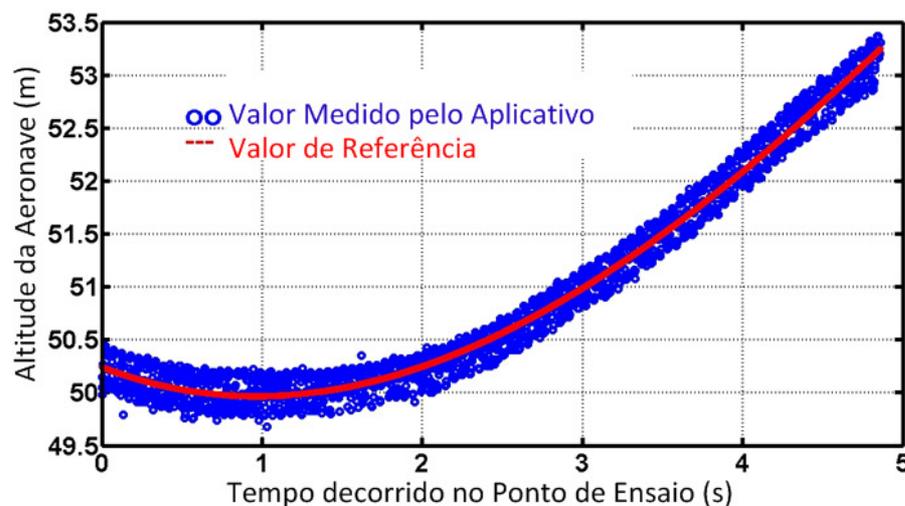


FIGURA 4.42 - Altitude de referência e calculada pelo aplicativo para a aeronave H-55 usando o centróide como ponto de referência na aeronave.

A Figura 4.43 mostra a altitude calculada pelo aplicativo para o mesmo ponto de ensaio apresentado na Figura 4.42 para o helicóptero H-55 HELIBRAS comparado com a altitude de referência, mas desta vez, usando a cauda como ponto de referência na aeronave. Pode-se observar que a altitude calculada varia em aproximadamente 80 cm devido a posição da cauda no helicóptero estar acima da posição do centróide. Esta alteração resultou num descarte de 9% dos quadros calculados.

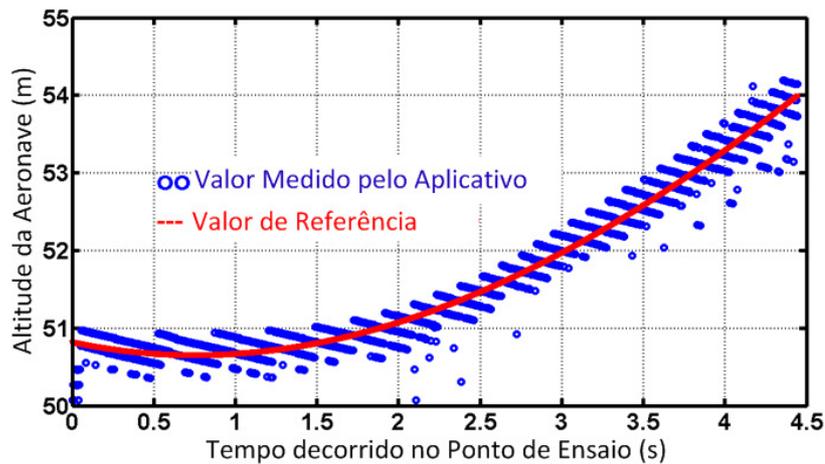


FIGURA 4.43 - Altitude de referência e calculada pelo aplicativo para a aeronave H-55 usando a cauda como ponto de referência na aeronave.

O motivo dos descartes é porque nestas imagens, o algoritmo detectou dois CCLs, um para o cockpit do helicóptero e outro para a cauda (Figura 4.44).

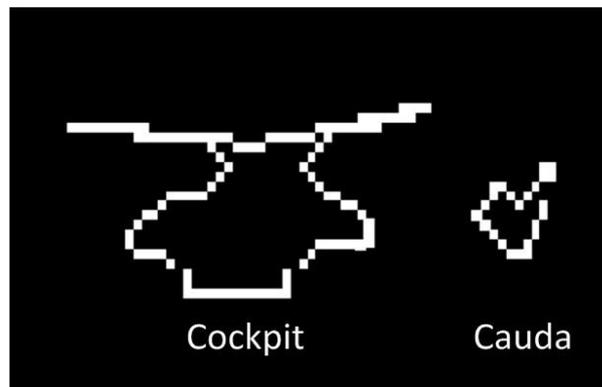


FIGURA 4.44 – Exemplo de quadro com dois CCLs para o helicóptero.

Para resolver este problema, foram utilizados operadores morfológicos, mas o desempenho e os resultados não foram satisfatórios.

Estes fatores fizeram com que o centróide fosse definido para cálculo da altitude para helicópteros. A incerteza associada usando a cauda é de $\pm 0,18962$ m @ 1σ e a do centróide, $\pm 0,1331$ m @ 1σ .

A Figura 4.45 mostra a altitude calculada pelo aplicativo usando o centróide como ponto de referência na aeronave em comparação com a altitude medida pelo GPS. O ponto de ensaio mostrado é da aeronave EMBRAER XAT-26. Pode-se observar que os resultados calculados pelo aplicativo apresentaram variação em torno dos pontos recebidos pelo GPS.

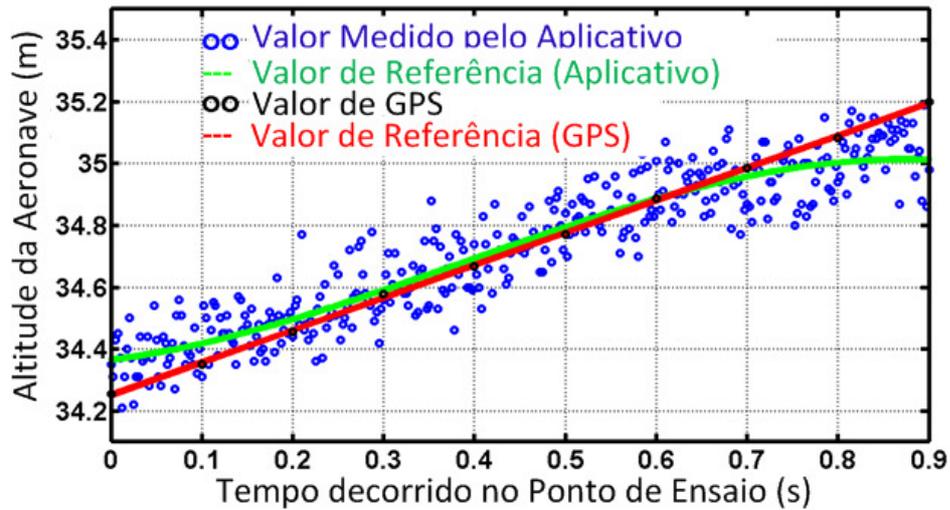


FIGURA 4.45 - Altitude calculada pelo aplicativo e medida no GPS para a aeronave XAT-26.

A figura 4.46 mostra a altitude calculada pelo aplicativo comparada à altitude recebida pela ET para um ponto de ensaio com o helicóptero H-55. Pode-se observar que a variação da ET invalidaria o ponto de ensaio segundo os requisitos apresentados na Seção 3.2.1.

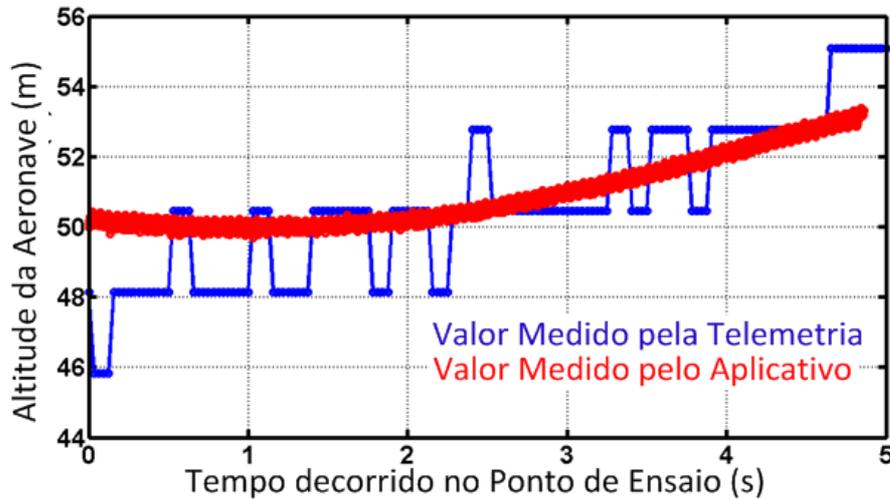


FIGURA 4.46 - Altitude calculada pelo aplicativo e pela ET com o helicóptero H-55

A figura 4.47 mostra a altitude calculada pelo aplicativo, pela ET e pelo GPS com a aeronave XAT-26. Pode-se observar a variação típica nas medidas da ET nas duas figuras.

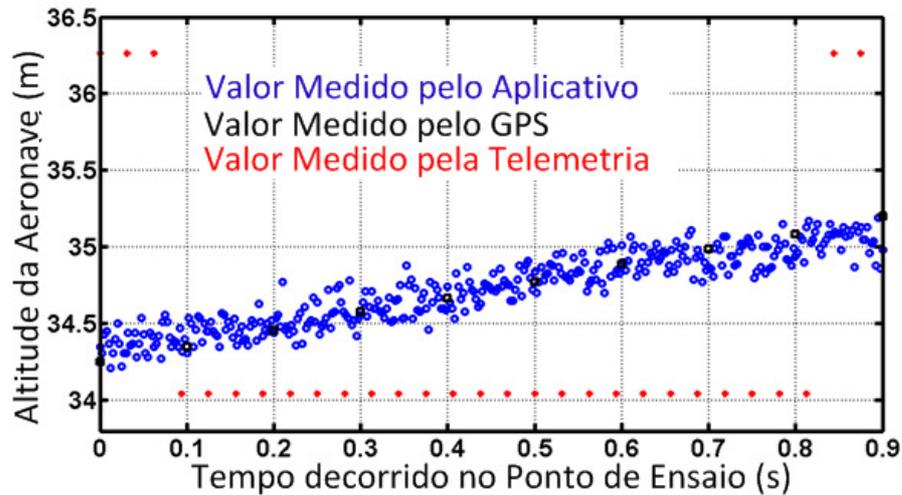


FIGURA 4.47 - Altitude calculada pelo aplicativo, ET e GPS com a aeronave XAT-26.

As Figuras 4.48 e 4.49 mostram, respectivamente, a incerteza associada à altitude calculada pelo aplicativo para o helicóptero H-55, que é $\pm 0,1331$ m @ 1σ e para a aeronave XAT-26, que é $\pm 0,090507$ m @ 1σ . É também mostrada a incerteza associada ao GPS que é $\pm 0,31782$ m @ 1σ . Pode-se observar que todas as medidas calculadas pelo aplicativo ficaram dentro da incerteza associada ao GPS.

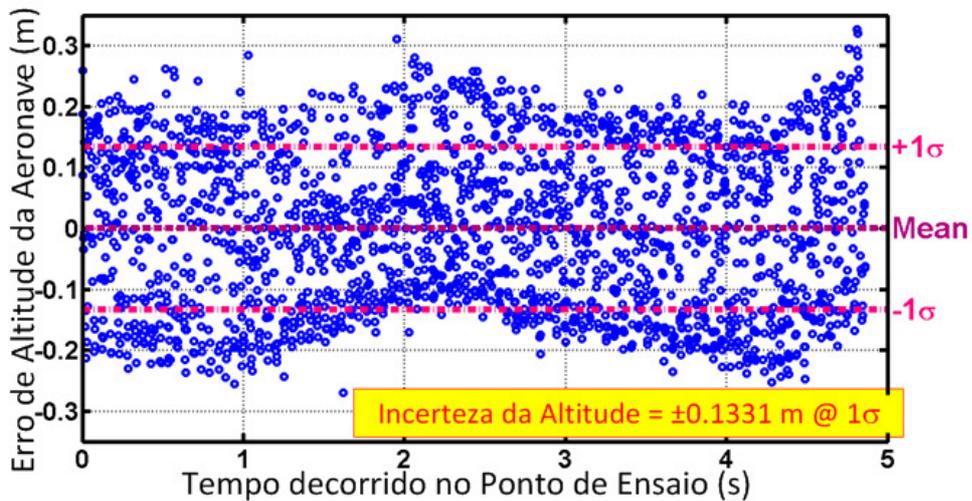


FIGURA 4.48 - Incerteza associada à altitude com H-55.

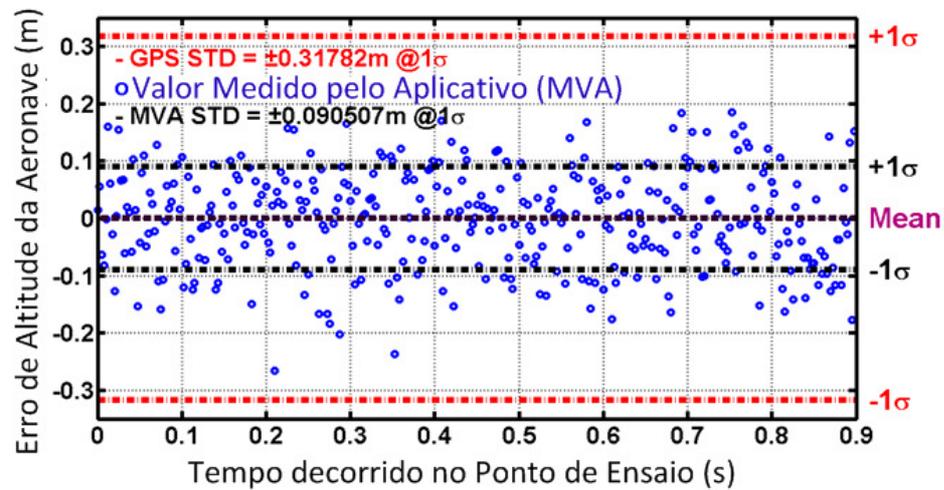


FIGURA 4.49 - Incerteza associada à altitude com XAT-26.

Devido à resolução do *pixel* (16×10^{-02} m) da imagem o cálculo da medida de velocidade é prejudicado. As Figuras 4.50 e 4.51 mostram, respectivamente, a velocidade calculada pelo aplicativo comparada à velocidade medida pela ET para o helicóptero H-55 e para a aeronave XAT-26.

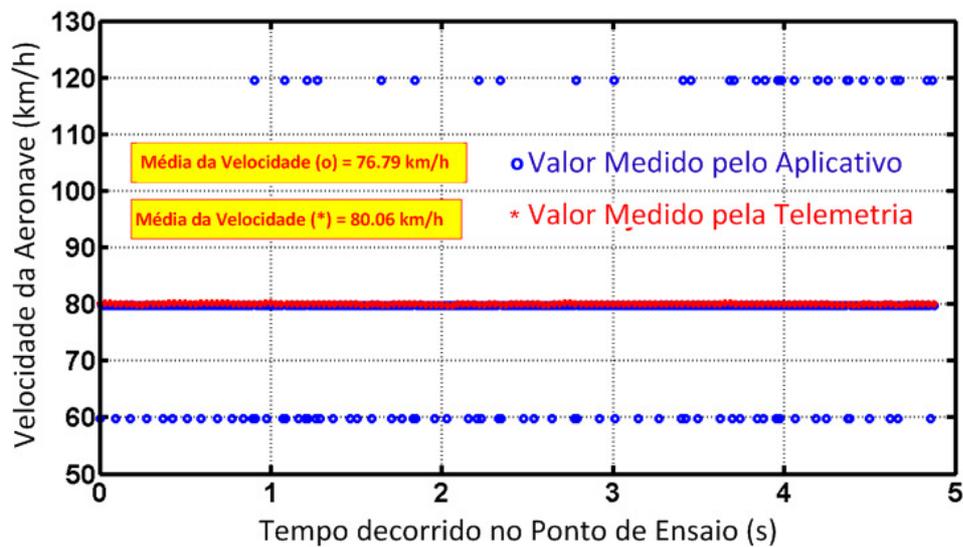


FIGURA 4.50 - Velocidade calculada pelo aplicativo e pela ET para a aeronave H-55.

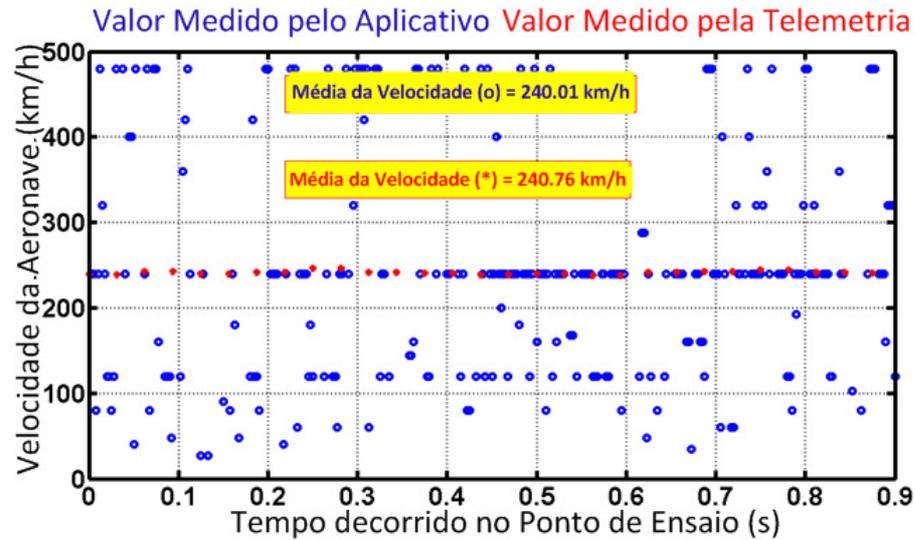


FIGURA 4.51 - Velocidade calculada pelo aplicativo e pela ET para a aeronave XAT-26.

A Figura 4.52 é a extração da Figura 4.51, mostrando apenas as medidas de velocidade recebidas pela ET. Pode ser observado que a velocidade teve variação de 8 km/h. Esta variação invalidou o ponto de ensaio de acordo com os requisitos apresentados na Seção 3.2.1.

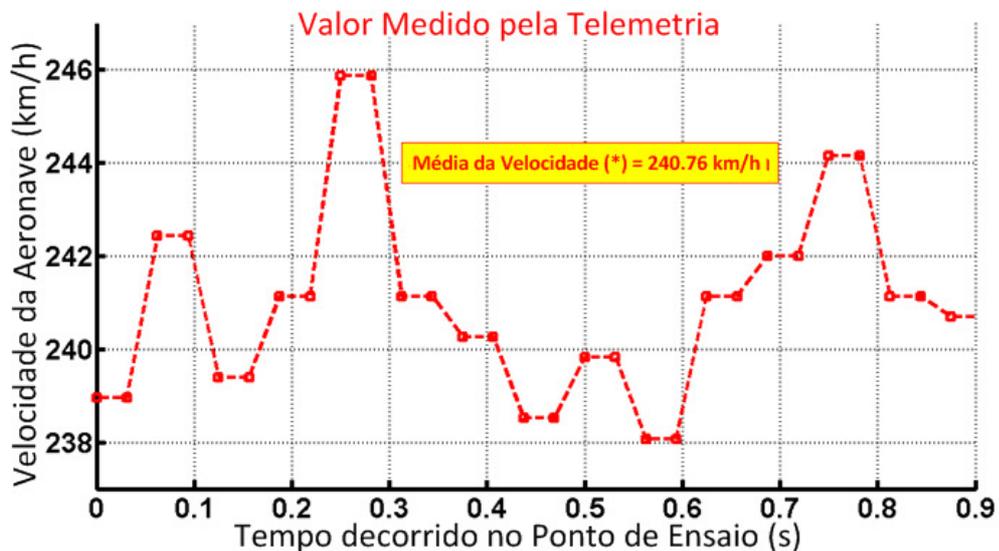


FIGURA 4.52 - Comportamento típico da velocidade recebida pela ET.

Os primeiros testes do aplicativo foram realizados com imagens geradas pela câmera HSC. Câmeras deste tipo são importadas, caras (em torno de U\$S 20 mil) e nem sempre estão disponíveis no IPEV em razão da realização de diversas campanhas de ensaios simultaneamente em várias regiões brasileiras. Desta forma, surgiu a oportunidade de realizar a campanha de calibração anemométrica usando câmeras digitais convencionais. O termo

convencional aqui refere às câmeras comerciais, com preço reduzido (e.g. menor que R\$ 1500) e taxa de aquisição de vídeos a 30 am/s.

Tradicionalmente, as câmeras com sensor do tipo CCD produziam imagens de melhor qualidade com poucos ruídos se comparadas às câmeras com sensor CMOS, mas atualmente esta diferença foi reduzida. Diante deste cenário e da disponibilidade de câmeras fotográficas convencionais modernas com os dois tipos de sensores, foi possível realizar diversos testes na campanha de calibração anemométrica para este trabalho.

Após os primeiros testes com estas câmeras, foi percebido que o algoritmo de detecção de aeronaves (Seção 4.3.3.) estava com uma taxa de descartes de imagens de 28%, situação indesejável para a taxa de aquisição destas câmeras (30 am/s). Baseado na afirmação de Gonzales e Woods (2000), na qual cada cenário necessita de um algoritmo particular de processamento de imagens, o algoritmo da Seção 4.3.3. foi ajustado e um filtro de ruído adaptativo 2-D de Wiener foi adicionado logo após a leitura da imagem. Este é um filtro passa-baixa baseado em estatísticas estimadas a partir da vizinhança de cada *pixel*. A partir desta inclusão, todos os testes com estas câmeras foram realizados com um algoritmo com filtro de ruído, denominado ALG#1, e outro sem filtro de ruído, denominado ALG#2, a fim de medir o desempenho e os resultados obtidos.

Os detalhes destes testes são mostrados nas Seções 4.4.2. e 4.4.3.

4.4.2. Experimentos com a câmera LSC CCD

As Figuras 4.53 e 4.54 mostram a altitude calculada pelo aplicativo comparada à altitude de referência para a aeronave XAT-26, usando, respectivamente, o ALG#1 e ALG#2. Em ambos os gráficos, as curvas apresentam o mesmo comportamento e pequena diferença nos valores calculados, porém, a Figura 4.54 apresenta uma taxa de 28% de descartes no ponto de ensaio. O ALG#1 processa todas as imagens do ponto de ensaio, não havendo descartes. O ALG#2 tem, em média, 24% de descarte de imagens.



FIGURA 4.53 - Altitude de referência e calculada pelo ALG#1 para a aeronave H-55.

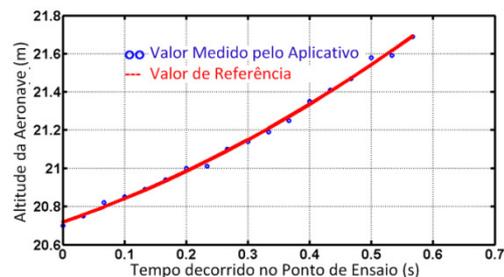


FIGURA 4.54 - Altitude de referência e calculada pelo ALG#2 para a aeronave H-55.

A Figura 4.55 mostra outro ponto de ensaio com a aeronave XAT-26 com os algoritmos ALG#1 e ALG#2 juntos. Pode-se observar a mesma situação anterior, ou seja, pouca diferença nos resultados dos algoritmos, mas seis quadros foram descartados pelo ALG#2 em relação aos vinte e quatro quadros do ponto de ensaio.

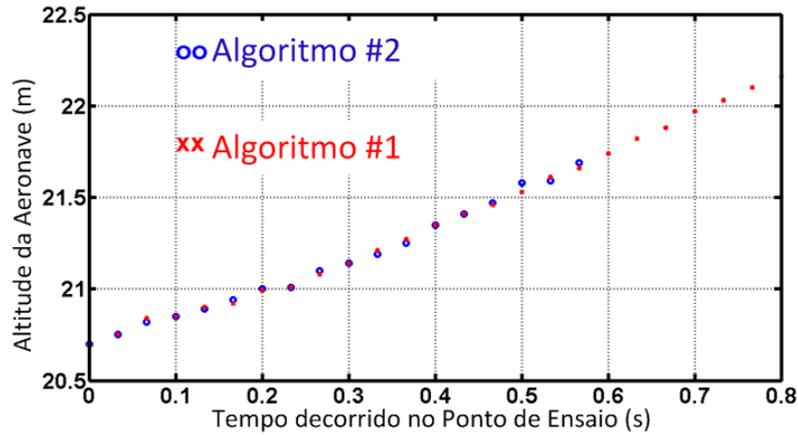


FIGURA 4.55 – ALG#1 e ALG#2 no mesmo gráfico para cálculo da altitude.

A incerteza associada à altitude desses algoritmos é de $\pm 0,016894$ m @ 1σ (Figura 4.56) para o ALG#1 e de $\pm 0,017683$ m @ 1σ para o ALG#2 (Figura 4.57).

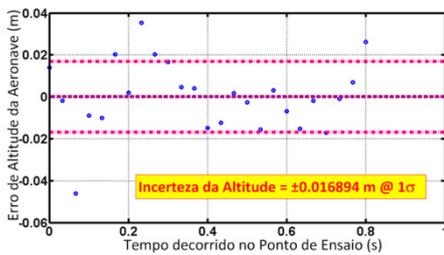


FIGURA 4.56 – Incerteza para o ALG#1.

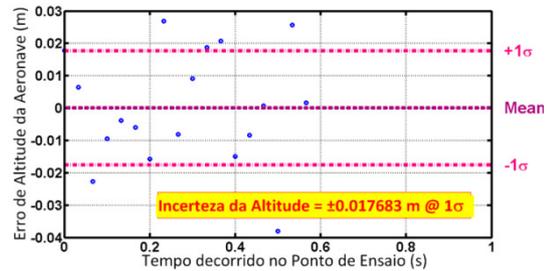


FIGURA 4.57 – Incerteza para o ALG#2.

As Figuras 4.58 e 4.59 mostram, respectivamente, os ALG#1 e ALG#2 comparando a altitude calculada com a altitude recebida na ET. Pode-se observar na Figura 4.59 a nítida perda de informação do ALG#2.

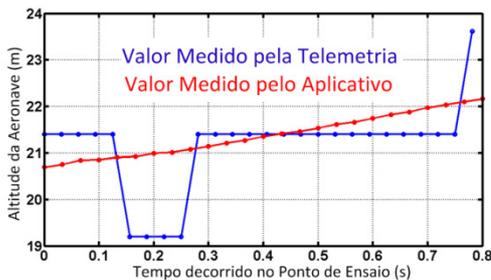


FIGURA 4.58 – Altitude calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.

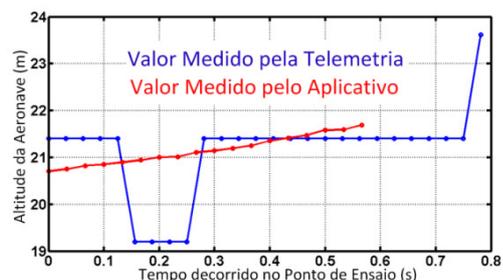


FIGURA 4.59 – Altitude calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.

A velocidade calculada pelos algoritmos ALG#1 e ALG#2, respectivamente, pode ser visualizada nas Figuras 4.60 e 4.61 comparadas à velocidade recebida na ET.

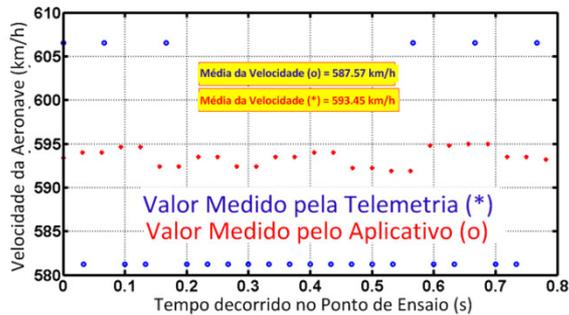


FIGURA 4.60 – Velocidade calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.

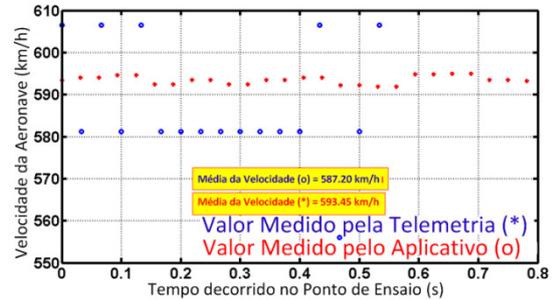


FIGURA 4.61 – Velocidade calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.

Diante do exposto nesta seção, pode ser percebido que o ALG#1 produz, em geral, resultados melhores que o ALG#2. Porém, ao comparar o custo computacional, o ALG#1 consome 37,3 % mais tempo que o ALG#2. Isto representa, em média, 73,061 ms a mais que o ALG#2 e capacidade de processamento de 4,5 am/s, algo indesejável para o objetivo deste trabalho. Desta forma, ambos os algoritmos para este tipo de câmera não apresentaram resultados satisfatórios que pudessem ser utilizados como solução para o problema apresentado neste trabalho.

4.4.3. Experimentos com a Câmera LSC CMOS

Com a câmera convencional de sensor CMOS foram utilizados os mesmos algoritmos apresentados na seção anterior, ALG#1 e ALG#2. Com esta câmera, os algoritmos ALG#1 e ALG#2 não descartaram imagens durante os pontos de ensaio.

As Figuras 4.62 e 4.63 mostram a altitude calculada pelo aplicativo comparada à altitude de referência para a aeronave XAT-26, usando, respectivamente, o ALG#1 e ALG#2. Em ambos os gráficos, as curvas apresentam o mesmo comportamento e pequena diferença de resultados.

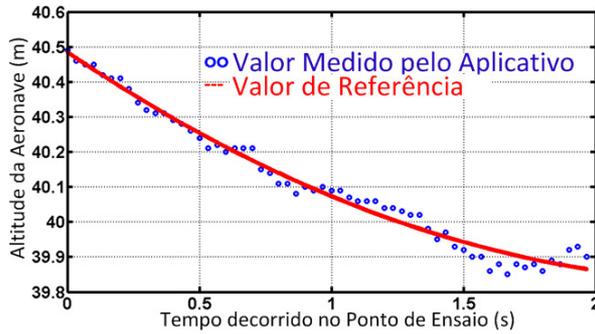


FIGURA 4.62 - Medida de referência e altitude calculada com ALG#1.

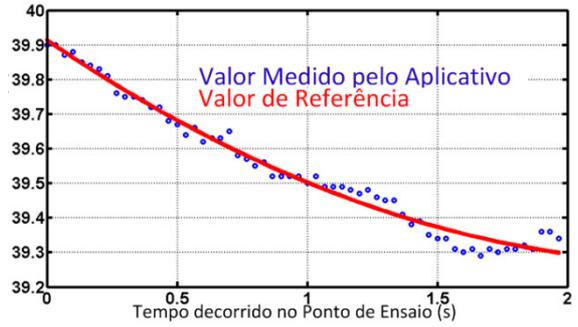


FIGURA 4.63 - Medida de referência e altitude calculada com ALG#2.

As Figuras 4.64 e 4.65 mostram, respectivamente, os ALG#1 e ALG#2 comparando a altitude calculada com a altitude recebida na ET. Observe que há uma oscilação maior que dois metros na altitude recebida pela ET, situação que pode invalidar o ponto de ensaio e comprometer a segurança.

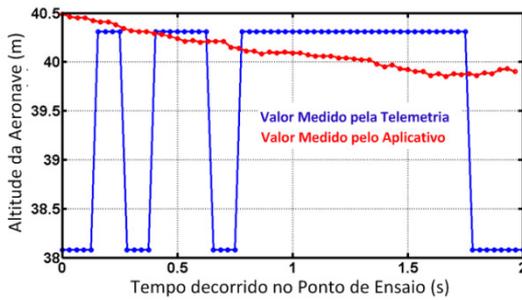


FIGURA 4.64 - Altitude calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.

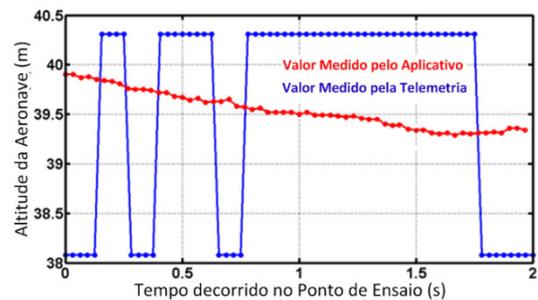


FIGURA 4.65 - Altitude calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.

A incerteza associada à altitude desses algoritmos é de $\pm 0,01184$ m @ 1σ (Figura 4.66) para o ALG#1 e de $\pm 0,0255$ m @ 1σ para o ALG#2 (Figura 4.67).

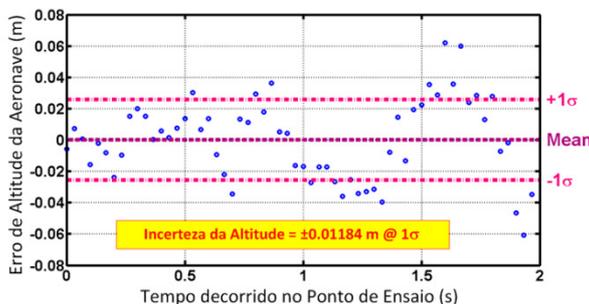


FIGURA 4.66 - Incerteza associada ao ALG#1.

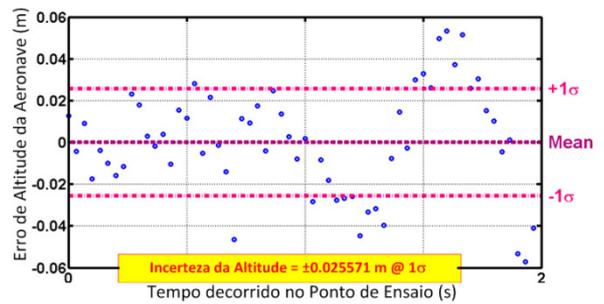


FIGURA 4.67 - Incerteza associada ao ALG#2.

Devido à resolução do *pixel* ($22,2 \times 10^{-02}$ m) da imagem o cálculo da medida de velocidade é prejudicado. Nas Figuras 4.68 e 4.69 pode ser visualizada a velocidade medida pelos algoritmos ALG#1 e ALG#2, respectivamente, e a velocidade medida pela telemetria.

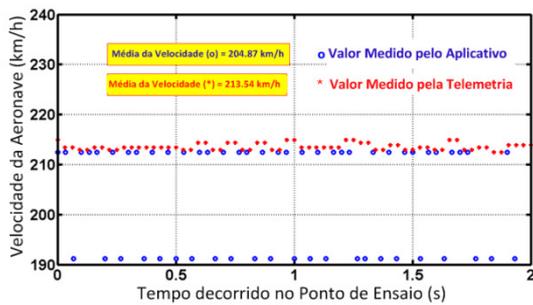


FIGURA 4.68 – Velocidade calculada pelo ALG#1 e recebida pela ET.

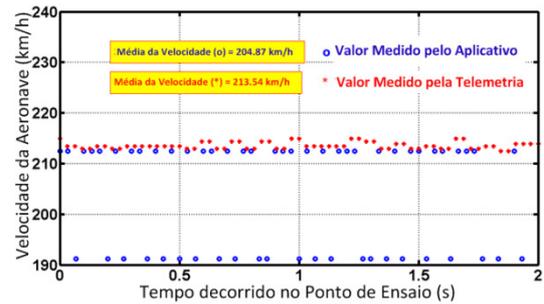


FIGURA 4.69 – Velocidade calculada pelo ALG#2 e recebida pela ET.

Com esta câmera, os dois algoritmos, ALG#1 e ALG#2, não apresentaram descartes. Ao comparar o custo computacional, o ALG#1, que tem filtro de ruído, consome 42,04 % mais de tempo que o ALG#2. Isto representa, em média, 85,26 ms a mais que o ALG#2. A capacidade de processamento do ALG#2 é de $8,5 \text{ am/s} \pm 1 \text{ am/s} @1\sigma$, aceitável para as condições desta campanha de ensaios.

O custo computacional do ALG#2 é mostrado na Figura 4.70. São considerados os Algoritmos 4.3.3 a 4.3.5, pois os Algoritmos 4.3.1 e 4.3.2 são executados apenas uma vez, antes do início do ponto de ensaio. Na Figura 4.70, o “Cálculo da altitude e velocidade” representa o Algoritmo 4.3.4.; a “Validação do ponto de ensaio” representa o Algoritmo 4.3.5 e as demais fatias do gráfico representam o Algoritmo 4.3.3.

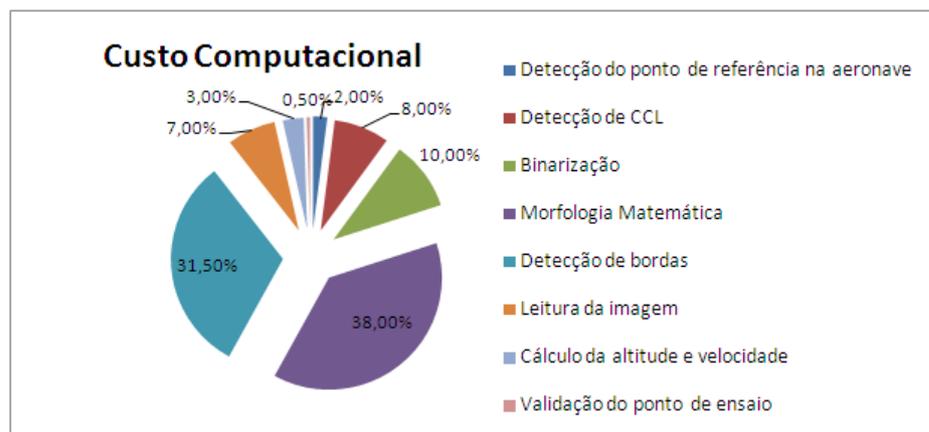


FIGURA 4.70 – Custo computacional do ALG#2.

A Figura 4.71 mostra a altitude calculada pelo ALG#2 em comparação com a altitude medida pelo GPS. O ponto de ensaio mostrado é da aeronave EMBRAER XAT-26. Pode-se observar que os resultados calculados pelo aplicativo apresentaram variação em torno dos

pontos recebidos pelo GPS e média equivalente. A Figura 4.72 mostra a altitude calculada pelo ALG#2, pela ET e pelo GPS.

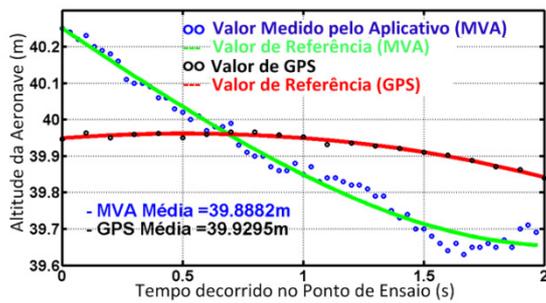


FIGURA 4.71 – Altitude calculada pelo ALG#2 e pelo GPS.

O algoritmo ALG#1 para a câmera LSC CCD não teve bom desempenho, enquanto que o algoritmo ALG#2 não teve bons resultados, apresentando alta taxa de descartes. Para a câmera LSC CMOS, ambos os algoritmos tiveram bons resultados, sendo que o ALG#2 teve melhor desempenho.

O aplicativo executa a $8,5 \text{ am/s} \pm 1 \text{ am/s} @1\sigma$ para a câmera LSC CMOS e $52 \text{ am/s} \pm 1,6 \text{ am/s} @1\sigma$ para a câmera HSC (VASCONCELOS et al, 2011b). Considerando as características da campanha de calibração anemométrica, este aplicativo teve resultados considerados satisfatórios comparados à ET e ao GPS, sendo produzidos em quase tempo real. Cabe salientar que todos os pontos de ensaio produziram resultados adequados.

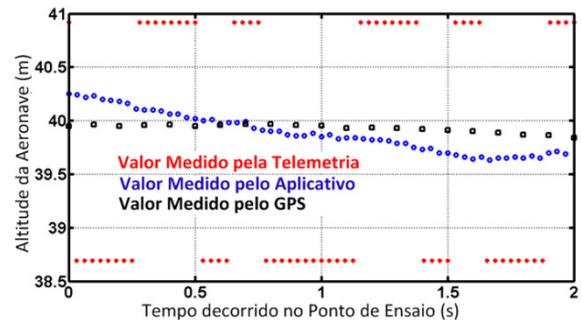


FIGURA 4.72 – Altitude calculada pelo ALG#2, pela ET e pelo GPS.

CONCLUSÃO

O estudo de técnicas computacionais de processamento de imagens digitais para serem utilizadas em ensaios de calibração anemométrica na área aeronáutica foi o principal objetivo deste trabalho. Foi desenvolvido um aplicativo para a campanha de ensaios de calibração anemométrica como alternativa para o método atual utilizado no IPEV.

Este aplicativo produz resultados em quase tempo real, aumentando a segurança do voo, a eficácia, a eficiência e a exatidão das informações do ensaio. Os testes foram realizados com sucesso e todos os pontos de ensaio produziram resultados adequados comparados aos dados recebidos pela estação de telemetria e medidos por meio de um sistema GPS diferencial.

Foi percebido que a representação por fronteira é adequada quando o interesse se concentra nas características da forma externa (uso do perímetro) e a representação por regiões é adequada quando o interesse se concentra em propriedades internas (uso do centróide). Estas técnicas foram utilizadas para determinar a posição da aeronave nos quadros.

Nesta campanha de ensaios, as condições meteorológicas podem variar rapidamente, de um ponto de ensaio para outro, apresentando mudanças significativas, o que acarretou no uso de técnicas para eliminação de ruídos. O recurso de estabilização das câmeras convencionais auxiliou na determinação de melhores silhuetas da aeronave, mas também contribuiu para a inserção de mais ruídos nas imagens iniciais e finais do ponto de ensaio.

O reconhecimento totalmente automático dos pontos de referência não foi possível em função do tamanho do ponto de referência nos quadros e pela variação de iluminação no local do ensaio influenciando nas cores originais (preto e branco no caso) dos pontos de referência. Uma alternativa para detecção dos pontos de referência foi selecionar uma região próxima ao ponto de referência, conforme apresentado na Seção 4.3.1. Estes pontos de referência eram detectados em todos os quadros dos pontos de ensaio. Durante o ponto de ensaio, a posição do ponto de referência variou ± 1 pixel @ 1σ . Esta variação ocorre em $\pm 3,1\%$ @ 1σ das imagens nos pontos de ensaio. Em função desta variação, o erro de altitude foi de $\pm 0,0012$ m @ 1σ , assim este valor foi considerado desprezível em função do ganho de desempenho do algoritmo. Desta forma, a detecção dos pontos de referência passou a ser realizada apenas no primeiro quadro do ponto de ensaio. Uma possibilidade futura é usar placas maiores como pontos de referência e/ou com cores diferentes.

A campanha de calibração anemométrica realizada no IPEV tem, normalmente, doze a dezesseis pontos de ensaio. A aeronave realiza a passagem rasante no campo de visão da

câmera e dentro da ARV. O intervalo entre cada ponto de ensaio varia, normalmente, de dois a cinco minutos em função do tráfego no local do ensaio e/ou procedimentos realizados pela tripulação durante o voo. Este intervalo é o tempo máximo para determinar se o ponto de ensaio foi válido. Para todos os pontos de ensaio, independente da câmera utilizada, o aplicativo produziu resultados adequados em relação a este requisito.

Os testes em câmeras convencionais com o sensor CCD tiveram resultados piores do que com o sensor CMOS, mostrando a evolução desses últimos sensores e a possibilidade de usar estas câmeras nos ensaios de calibração anemométrica.

Ao usar três diferentes tipos de câmeras, o objetivo era desenvolver um único algoritmo que conseguisse processar vídeos em tons de cinza ou coloridos, mesmo contrariando a indicação de Gonzales e Woods (2000), na qual cada cenário necessita de um algoritmo particular de processamento de imagens. Foram produzidas e avaliadas diferentes versões de algoritmos levando em consideração o desempenho e os resultados produzidos. Após diversos testes realizados a partir de vídeos gravados, foi possível chegar a dois algoritmos, usados principalmente com as câmeras convencionais, sendo diferenciados pela presença de filtro de ruído em um deles. Após os testes reais, foi constatado que o melhor desempenho e resultado foi alcançado com o mesmo algoritmo para as câmeras HSC e LSC CMOS. A câmera HSC é a recomendada para os ensaios por ter melhor sensibilidade, necessitar de menos processamento computacional e prover mais informações o que aumenta a segurança dos ensaios. Porém, a câmera LSC CMOS pode ser utilizada quando a câmera HSC não estiver disponível mantendo a boa exatidão das informações. A câmera HSC pode não estar disponível quando outras campanhas de ensaios são realizadas no mesmo períodos, muitas vezes, em outras localidades.

O cálculo da altitude teve resultados melhores que a ET e resultados compatíveis com o GPS para as três câmeras, porém, a câmera LSC CCD utilizada com o algoritmo com filtro de ruído não obteve o desempenho desejado, sendo 47,1% mais lento que o mesmo algoritmo utilizado com a câmera HSC CMOS. Além disso, o algoritmo utilizado com a câmera HSC CCD apresentou 28% de descartes dos quadros. Essa quantidade de descartes para passagens da aeronave em alta velocidade (e.g. mais de 400 *knots* i.e. 740,8 km/h), baixa altitude e na taxa de aquisição dessas câmeras (30 am/s), pode comprometer a segurança do ensaio.

Em relação à velocidade, muitos pontos de ensaio apresentaram valores compatíveis à ET e ao GPS, porém, em alguns pontos de ensaio a velocidade calculada apresentou variações devido à resolução do sistema.

Os melhores resultados para o ponto de referência na aeronave foram obtidos com: método do centróide para cálculo de altitude em helicópteros; com a cauda para cálculo de velocidade em helicópteros (por ter melhor estabilização mesmo com o problema da resolução); e a cauda ou bico para cálculo de altitude e velocidade para aeronaves de asa fixa.

Com a câmera HSC e LSC CMOS, a principal técnica utilizada é o detector de bordas de Sobel que têm maior capacidade de suavizar eventuais ruídos, ao mesmo tempo em que detecta as bordas da imagem. Para a câmera LSC CCD, o filtro de ruído e a morfologia matemática são as técnicas principais, porém, estas técnicas têm alto custo computacional.

O aplicativo pode ser adaptado para diferentes modelos de aeronaves e câmeras. As câmeras convencionais são uma boa opção para minimizar custos, possibilitando maior flexibilidade e eliminação da dependência da câmera de alta taxa de amostragem para a realização do ensaio.

Este aplicativo integra várias técnicas de visão computacional e processamento de imagens e mostrou-se eficiente. O sistema mostrou-se flexível e confiável e pode ser usado para diversos tipos de aplicações. O uso de câmeras digitais e de equipamentos convencionais, além da determinação da validade do ponto de ensaio em quase tempo-real, permite reduzir os custos deste tipo de ensaio.

Para trabalhos futuros é possível citar:

- Avaliar o aplicativo com outras aeronaves;
- Avaliar o aplicativo com outras câmeras, em especial, câmeras convencionais dedicadas à produção de vídeos;
- Avaliar o aplicativo em outras arquiteturas e sistemas operacionais;
- Aumentar o desempenho do sistema usando técnicas de processamento paralelo;
- Recuperar imagens diretamente da memória da câmera; e
- Integrar o aplicativo com GPS e ET para aumentar a segurança dos ensaios e exatidão das medidas.
- Desenvolver o aplicativo em outra plataforma a fim de obter melhor desempenho.

Este trabalho gerou as seguintes publicações:

- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., The Development of a Tool for the Air Data System Calibration Flight Tests Campaign using Image Processing. In: XXIV IEEE Conference on Graphics, Patterns and Images, 2011, Maceió, Brazil Conference Proceedings. IEEE Computer Society Conference Publishing Services, 28 a 31 ago. 2011.

- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., Development of a Hi-Speed Near Real-Time 720i Image Processing Application for Flight Test. In: European Test & Telemetry Conference, 2011, Toulouse. European Test and Telemetry Conference Proceedings. Paris : The Association Aéronautique and Astronautique de France, 2011. p. 67-72.
- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., Flight Test Evaluation of a Hi-Speed Near Real Time 720i Image Processing Application. In: International Telemetry Conference, 2011, Las Vegas. ITC/USA 2011 Conference Proceedings. Las Vegas : The International Foudation for Telemetry, 2011
- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., Desenvolvimento de um Protótipo para Ensaios de Calibração do Sistema de Dados Aéreos usando Técnicas de Processamento de Imagens. In: Anais do XX SEMINCO, 2011, Blumenau, Brasil. Departamento de Sistemas e Computação, 22 a 23 ago. 2011.
- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., Calibração Anemométrica usando Processamento de Imagens. In: Anais do 13º Simpósio de Iniciação Científica – 13º SICT. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil. ISSN 1518-9082. 2011, p. 44.
- VASCONCELOS, L. E. G; LEITE, N. P. O; PINHEIRO, C. A. M; CARPINTEIRO, O. A. S., Calibração Anemométrica usando Processamento de Imagens. In: Encontro de Iniciação Científica, 8, Mostra de Pós-Graduação/FATEA, 6: Programa e Resumos, Lorena, 26 a 28 de set. 2011. Lorena: Faculdades Integradas Teresa D'Ávila - ISPIC, 2011, p. 343-344.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC. "Manual de Procedimentos de Homologação. Ensaios de Certificação.", Agência Nacional de Aviação Civil, 15 set 2008

ANDRADE, J. B. Fotogrametria, CURITIBA, SBBE, 1998.

ARANTES, R. M., "Introdução a Aerodinâmica Técnicas de Ensaios em Voo - Calibração, Documento nº E-B11", Chapter 2.3, Grupo Especial de Ensaios em Voo, 2003.

AXIS Communications AB. CCD and CMOS sensor technology, Technical White Paper, 2010.

BAKSTEIN, H. Diploma Thesis: A Complete DLT-based Camera Calibration with a Virtual 3D Calibration Object. Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, 1999.

BARROS, H. L. Santos Dumont e a invenção do voo. 2 ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed. 2004.

BOAVENTURA, I. A. G.; GONZAGA, A. Uma abordagem Fuzzy para Detecção de Bordas em Imagens Digitais. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC), XXX, 2007, Florianópolis. Anais... São Carlos, SP: SBMAC, 2007.

BOUGUET, Jean-Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab. 2010.

BOYLE, W. S.; SMITH, G. E. Charge-Coupled Semiconductor Devices. Bell System Tech. J., vol. 49, pp. 587–593, 1970.

BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, v. 32, n. 3, p 444-462, May 1966.

BURGETH, B. et al. Morphological Operations on Matrix-Valued Images. In.: European Conference on Computer Vision, 8, 2004, Prague. Proceedings, Part IV, [S. l.: S. n.], 2004, p.155-167.

CANNY, J. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

CARVALHO, P. C.; VELHO, L.; MONTENEGRO, A. A.; PEIXOTO, A.; SÁ, A.; SOARES, E.; ESCRIBA, L. A. R. Fotografia 3D, Associação Instituto de Matemática Pura e Aplicada, IMPA, Rio de Janeiro, 2005.

CARVALHO, J. E. R. de. Uma abordagem de segmentação de placas de automóveis baseada em morfologia matemática. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

CEV. Curso de Ensaios em Voo. Introdução à Aerodinâmica: Técnicas de Ensaio. Calibrações. Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo, Brasil, 67 p, 2011.

- CHAUDHURI, B. B.; CHANDA, B. The equivalence of best plane fit gradient with Roberts', Prewitt's and Sobel's gradient for edge detection and a 4-neighbour gradient with useful properties, *Signal Processing*, Vol. 6, No. 3, pp. 143-151, 1984.
- DAI, M. et al. Image segmentation by a dynamic thresholding using edge detection based on cascaded uniform filters. *Signal Processing*, [S. l.: S. n.], v.52, n.1, p.49-63, July, 1996.
- DALMOLIN, Q. Ajustamento por mínimos quadrados. Curitiba: Ed. UFPR, 2002.
- DOYLE, W. Operations Useful for Similarity-Invariant Pattern Recognition. *J. ACM*, vol. 9, pp. 259-267, 1962.
- EDWARDS, A.F.B., “*Flight Test Engineering Handbook – Air Force Technical Report n° 6273*”, Chapter 1, Edwards Air Force Base, 1966.
- FORNI, A. L. C., “Manual de Aerodinâmica, Documento n° 20-R-AH”, Chapter 3, Divisão de Ensaios em Voo, 1995.
- FRAM, J. R.; DEUTSCH, E. S. On the Quantitative Evaluation of Edge Detection Schemes and Their Comparison with Human Performance. *IEEE Trans. Computers*, vol. C-24, no. 6, pp. 616-628, 1975.
- GAMBA, P.; LODOLA, R.; MECOCCHI, A. Scene interpretation by fusion of segment and region information. *Image and Vision Computing*, v.15, n.7, p.499-509, July, 1997.
- GIARDINA, C. R.; DOUGHERTY, E. R. *Morphological Methods in Image and Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1988.
- GONZALES, R. C. Image Enhancement and Restoration. In *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing*, Yong, T. Y., and Fu, K. S., eds. Academic Press, New York, pp. 191 – 213, 1986.
- GONZALES, R. C.; FITTES, B. A.; Gray level Transformation for Interactive Image Enhancement. *Mechanism and Machine Theory*, vol 12, pp. 111-122, 1977.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.; *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda, 2000. 509 p.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- GPS. Manual GPS DL-V3; Flexible GNSS Receiver with Enhanced Connectivity Ideal for Base Station and Rover Applications; Canada, March, 2011. NovAtel Inc.
- HAERING, Edward A. Jr.; *Airdata Measurement and Calibration*; NASA Technical Memorandum 104316; National Aeronautics and Space Administration; December 1995.
- HALL, E. L., et al. A Survey of Preprocessing and Feature Extraction Techniques for Radiographic Images. *IEEE Trans. Comput.*, vol C-20, no. 9, pp. 1032-1044, 1971

HEIKKILA, J., SILVÉN, O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, pp. 1106-1112, 1997

HERBST, E. Camera Calibration by Corners Detection, 2003.

HODACK, D. "Implementing iNET and the Operational Issues Involved". In: International Telemetering Conference (ITC/USA), 2008, San Diego. Proceedings ... Las Vegas: ITC/USA, 2008. p. 514-520.

HORPRASERT, T.; HARWOOD, D.; DAVIS, L. S. A Robust Background Subtraction and Shadow Detection. In: Asian Conference on Computer Vision, 4, 2000, Taipei. Proceedings...[S. l.: S. n.], 2000. p.983-988.

HUANG, T. S.; Picture Processing and Digital Filtering, Springer, New York, 1975.

HUANG, Y.; PAULUS, D.; NIEMANN, H.; Background-Foreground Segmentation Based on Dominant Motion Estimation and Static Segmentation. Journal of Computing and Information Technology, Zagreb, v.8, n.4, p. 349-353, 2000. Special Issue on ITI 2000 - Information Technology Interfaces.

INMETRO. Acessado em 25 abr 2011. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/servicos/calibDimec.asp> Acessado em 12 de agosto de 2011.

IRIG(a). IRIG 121-07 "Instrumentation Engineering Handbook". Secretariat Range Commanders Council. US Army White Sands Missile Range, 2007.

IRIG(b). IRIG 106-05. Pulse Code Modulation. Secretariat Range Commanders Council. US Army White Sands Missile Range. 2007.

ISO. "ISO/IEC Standard 17025.2005: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", ISO, Geneva, 2005.

JAIN, A. K., Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989

JAIN, R., Segmentation of Frame Sequences Obtained by a Moving Observer. Report GMR-4247, General Motors Research Laboratories, Warren, Mich, 1983.

JEFFERIS, R. P., "TELEMETRY LINK RELIABILITY IMPROVEMENT VIA "NO-HIT" DIVERSITY BRANCH SELECTION". IN: INTERNATIONAL TELEMETERING CONFERENCE (ITC/USA), 2004, SAN DIEGO. PROCEEDINGS ... SAN DIEGO: ITC/USA, 2004. P. 230-239.

JENKINS, F. A.; WHITE, H. E. Fundamentals of optics, 4th ed., McGraw-Hill, 1976.

JORDAN, L.F. Jr.; RITCHIE, V. S.; NASA TECHNICAL NOTE TN D-7217. Subsonic wind-tunnel tests of a trailing-cone device for calibrating aircraft static-pressure systems. Langley Research Center, Hampton, Va. 23365. May 1973

KIRSCH, R. Computer Determination of the Constituent Structure of Biological Images. *Comput. Biomed. Res.*, vol. 4, pp. 315-328, 1971.

KIVER, M. S.; *Color Television Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1965.

KOLLER, T. M.; GERIG, G.; SZÉKELY, G.; DETTWILLER, D. Multiscale detection of curvilinear structures in 2-D and 3-D image data. In: *International Conference on Computer Vision*, 5, 1995, Massachusetts. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, p. 864-869, 1995.

KOUNDINYA, K. N. V. L. N.; CHANDA, B.; Detecting lines in graylevel images using search techniques, *Signal Processing*, Vol. 37, No. 3, pp. 287-299, 1994.

LEITE, N. P. O.; WALTER, F.; “Multiple Time Base Synchronization Process Applied to the Flight Tests Campaign of a GPS Attitude Determination Algorithm”, *Proceedings of the International Telemetry Conference, ITC 2007, Las Vegas, 2007*, pp. 1048 ~ 1057.

LEITE, N. P. O.; LOPES, L. M. F. ; LIMA, W. O. ; ROBERTO, L. The Development of a Quasi-Real Time Data Processing Tool for the Calibration Flight Test Campaign of an Air Data System. In: *European Test & Telemetry Conference, 2009, Toulouse. European Test and Telemetry Conference Proceedings. Paris : The Association Aéronautique and Astronautique de France, 2009. p. 130-135.*

LEITE, N. P. O.; LOPES, L. M de F.; SOUZA, L. B. R.; Desenvolvimento de Ferramentas para aumento da segurança em ensaios em voo; 3º Simpósio de Segurança de Voo; Agosto, 2010, São José dos Campos, Brasil.

LEITE, N. P. O.; LOPES, L. M. F.; WALTER, F. The Integration of a GPS Receiver to a Quasi-Real Time Decision Aid Tool Used for the Air Data System Calibration Flight Tests Campaign. In: *International Telemetry Conference, 2009, Las Vegas. ITC/USA 2009 Conference Proceedings. Las Vegas : The International Foudation for Telemetry, 2009*

MARCHANDT-MAILLET, S.; SHARAIHA, Y. M. *Binary Digital Image Processing: A Discrete Approach*. San Diego:, Academic Press, 2000.

MEHTA, S. ; ETIENNE-CUMMINGS, R. A simplified normal optical flow measurement CMOS camera, *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, vol. 53, no. 6, pp. 1223-1234, Junho 2006.

MERCHANDT, D. C. *Analytical Photogrammetry. Theory and Practice, part I and II*. Columbus, Ohio. Department of geodesic science, The Ohio State University, 1979.

MIRANDA, J. I.; NETO, J. C.; Detecção de bordas com modelo de difusão anisotrópica. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. Anais do 13th Simpósio de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p. 5957-5964, 2007.*

MUKHOPADHYAY, S. ; CHANDA, B.; A multiscale morphological approach to local contrast enhancement, *Signal Processing*, Vol. 80, pp. 685-696, 2000.

MUÑOZ, X. et al. Strategies for image segmentation combining region and boundary information. *Pattern Recognition Letters*, v.24, n.1-3, p.375-392, Jan., 2003.

- NAIN, N. et al. Dynamic Thresholding Based Edge Detection. In: World Congress on Engineering, 2008, London. Proceedings. [S. l.: S. n.], v. 1, 2008. p.694-699.
- NARASIMHAN, R.; FORNANGO, J. P. Some Further Experiments in the Parallel Processing of Pictures. IEEE Trans. Elec. Computers, vol. EC-12, pp. 748-750, 1963.
- NORIEGA, P.; BASCLE, B.; BERNIER, O. Local Kernel Color Histograms for Background Subtraction. In: International Conference on Computer Vision Theory and Applications – VISAPP, 1, 2006, Setúbal. Proceedings [S. l.]: INSTICC Press, v.1, 2006, p.213–219.
- OLIVAS, M. A. A.; Calibração de câmaras fotogramétricas. Curitiba, 97f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 1980.
- PAINE, S. H.; LODWICK, G. D.; Edge Detection and Processing of Remotely Sensed Digital Images, Photogrammetria, v. 43, n. 6, p. 323-336, 1989.
- PARKER, J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. New York: Wiley Computer Pub., 1996.
- PINTO, F. H. L.; RODRIGUES, F. W., “Ordem de Ensaio - Calibração Anemométrica Document nº B11(A)/EFEV”, Grupo Especial de Ensaios em Voo, 2007.
- PREWITT, J. M. S. Object Enhancement and Extraction. In Picture Processing and Psychopictorics, Lipkin, B. S. and Rosenfeld, A., eds., Academic Press, New York, 1970.
- RAO, R. L.; PRASAD, L., Image segmentation by multiresolution histogram decomposition, Proc. SPIE 2569, 766; doi:10.1117/12.217630, 1995
- ROBERTS, L.G. Machine Perception of Three-Dimensional Solids. In Optical and Electro-Optical information Processing, Tippet, J.T., ed., MIT Press, Cambridge, Mass. 1965.
- ROBINSON, G. S.; Detection and Coding of Edges Using Directional Masks. University of Southern California, Image Processing Institute. Report no. 660, 1976
- ROERDINK, J. B. T. M. Computer Vision and Mathematical Morphology. In: THEORETICAL FOUNDATIONS OF COMPUTER VISION, 7, 1994, Dagstuhl. Proceedings... [S. l.]: Springer, 1996. p.131-148. (Computing Supplement, v.11).
- SCHALKOFF, R. J.; Digital Image Processing and Computer Vision, John Wiley & Sons, New York, 1989
- SCHOUTEN, T. E. et al. Finding Thresholding for Image Segmentation. In: Image and Signal Processing for Remote Sensing, 1994, Rome. Proceedings... [S. l.]: SPIE, v.2315, 1994. p.90-101.
- SEARA, D. M. Algoritmos para detecção de bordas. Florianópolis, 1998. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~visao/1998/seara/index.html>> Acesso em: 15 ago 2011.
- SERRA, J. Image Analysis and Mathematical Morphology. New York: Academic Press, 1982.

SLAMA, C. C.; THEURER, C.; HENRIKSEN, S.W.; Manual of Photogrammetry, 4th Edition. Chapter XIV, 729–731. ASPRS, 1980.

SOUSA, L. B. R. SALEV - Sistema de Automatização do Laboratório de Ensaio em Voo. Dissertação de Mestrado apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). 2005

SOUSA, L. B. R.; LEITE, N. P. O.; WALTER, F.; e CUNHA, W. C., “Automation System for the Flight Tests Laboratory - SALEV”. In: International Telemetry Conference (ITC/USA), 2006, San Diego. Proceedings ... Las Vegas: ITC/USA, 2006. p. 94-103.

STIEGER, C. An unbiased detector of curvilinear structures. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. v. 20, n. 2, p. 113-125, 1998.

TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3 (4), 323-344, 1987.

VASCONCELOS, L.E.G.; LEITE, N.P.O., PINHEIRO, C.A.M., CARPINTEIRO, O.A.S. Development of a Hi-Speed Near Real-Time 720i Image Processing Application for Flight Test. In: European Test & Telemetry Conference (ETTC), 2011, Toulouse, France. European Test and Telemetry Conference Proceedings. Paris : The Association Aéronautique and Astronautique de France, 2011a.

VASCONCELOS, L.E.G.; LEITE, N.P.O., PINHEIRO, C.A.M., CARPINTEIRO, O.A.S. The Development of a Tool for the Air Data System Calibration Flight Tests Campaign using Image Processing. In: XXIV Sibgrapi – IEEE Conference on Graphics, Patterns and Images, Maceió, Brasil, 2011b.

VASCONCELOS, L.E.G.; LEITE, N.P.O., PINHEIRO, C.A.M., CARPINTEIRO, O.A.S. Flight Test Evaluation of a High-Speed Near Real-Time 720i Image Processing Application. In: International Telemetry Conference (ITC), Las Vegas, USA, 2011c.

WALSH, J. W. T.; Photometry, Dover, New York, 1958.

WARD, D.T.; STRGANAC, T.W. Introduction to Flight Test Engineering, 2nd edition, Kendall/hunt Publishing Company, United States, 1998

WOLF, P. R.. Elements of photogrammetry. McGraw-Hill, New York, 628 p., 1983.

WSMR. White Sands Missile Range. Telemetry Applications Handbook. Document 119-06. Secretariat Range Commanders Council; U.S. Army White Sands Missile Range, May 2006.

ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.

ZIOU, D.; TABBONE, S.. Edge Detection Techniques – An Overview. Pattern Recognition and Image Analysis, v. 8, p. 4, 1998.

ANEXO I

Passos a serem realizados durante a execução de cada ponto de ensaio da calibração anemométrica.

```

%% 1° Passo - Carregar lista de imagens
[d,l] = GetDiretorio; % carrega o diretório

%% 2° Passo - Mostra imagem para Selecionar Placas
tam=size(l);
f = imread(strcat(d,'\ ',l(1).name));
figure, imshow(f)
rect = getrect(gca);

%% 3° Passo - Seleciona Placa1
[z,px1,py1] = GetPlaca(100,f,rect,2,2);
rect1 = getrect(gca);

%% 4° Passo - Seleciona Placa 2
[w,px2,py2] = GetPlaca(100,z,rect1,2,2);
imshow(w)

%% 5° Passo - Determina informações (dist e posição das placas) para
%% Calcular Altura
[mx1, mx2, my1, my2] = GetMeioPlacas (px1,px2,py1,py2);
[dist] = GetDistanciaPlacas (mx1,mx2,my1,my2,100,6);
s = struct('distancia',0,'mx1',0,'mx2',0,'my1',0,'my2',0);
s.distancia=dist;s.mx1=mx1;s.mx2=mx2;s.my1=my1;s.my2=my2;

%% 6° Passo - Executa IMAGENS posicionando Centroides e ALTURA
%% XAVANTE:
[tempo, P]=LocateAirplane(d, l, 1, tam(1,1), 1, 30, s, 5, 0.1, 10);

%% HELICÓPTERO:
[tempo, P]=LocateAirplane(d, l, 200, tam(1,1), 30, 100, s, 400, 0.05, 5);

%% 7° Passo - Plot de tempo de processamento de cada imagem, altura e
%% velocidade
plot(tempo,'g*')
plot(P(:,1),'g*') % altura

```

```
plot(P(:,2), 'g*') % velocidade
```

Funções desenvolvidas.

GetDiretorio

```
function [diretorio, listaimagens] = GetDiretorio()

diretorio = uigetdir('C:\Documentos\ ', 'Selecione o diretório da passagem
da aeronave');
listaimagens = dir(diretorio);
```

GetPlaca

```
function [imagemResultado, linhaHorizontal, linhaVertical, retorno] =
GetPlaca(indiceBranco, imagemOriginal, rect, ajuste, tipo)

retorno=1; %se continuar em 1 quer dizer que encontrou uma imagem de placa

x1 = rect(1,1);
x2 = x1 + rect(1,3);
y1 = rect(1,2);
y2 = y1 + rect(1,4);
croppedImage = imagemOriginal(y1:y2,x1:x2);

g3 = imadjust(croppedImage, [ ], [ ], ajuste);
b = g3;

[I,J] = find(b > indiceBranco);
Imin=min(I);
Imax=max(I);
Jmin=min(J);
Jmax=max(J);
b(Imin,Jmin:Jmax)=255;
b(Imax,Jmin:Jmax)=255;
b(Imin:Imax,Jmin)=255;
b(Imin:Imax,Jmax)=255;
```

```

[a1,a2]=size(Imin);
[a3,a4]=size(Imax);
if (a1>0)&&(a3>0)
    x=(x1+Imin):(x1+Imax);
    x = int16(x);
    y=(y1+Imin):(y1+Imax);
    y = uint16(y);
    z = imagemOriginal;

    % Coloca a borda na placa original
    switch tipo
        case 1
            tam = size(x);
            z(y,x(1,1))=255;
            z(y,x(1,tam(1,2)))=255;
            tam = size(y);
            z(y(1,1),x)=255;
            z(y(1,tam(1,2)),x)=255;
        end
        linhaHorizontal = x;
        linhaVertical = y;
        imagemResultado = z;
    else %se não encontrou a placa retorna 0;
        retorno = 0;
        linhaHorizontal = 0;
        linhaVertical = 0;
        imagemResultado = imagemOriginal;
    end;
end;

```

GetMeioPlacas

```

function [mx1, mx2, my1, my2] = GetMeioPlacas (px1,px2,py1,py2)

[1,c] = size(px1);
mx1 = sum(px1)/c;

[1,c] = size(px2);

```

```
mx2 = sum(px2)/c;
```

```
[l,c] = size(py1);
my1 = sum(py1)/c;
```

```
[l,c] = size(py2);
my2 = sum(py2)/c;
```

GetDistanciaPlacas

```
function [distancia] = GetDistanciaPlacas(mx1, mx2, my1, my2, tamPlaca,
numPixelPlacas)
```

```
cat2 = abs(my2-my1);
cat1 = abs(mx2-mx1);
hip=sqrt((cat1.^2)+(cat2.^2));
tamPixel = tamPlaca/ numPixelPlacas;
distancia = (tamPixel * hip)/100; % em metros
```

LocateAirplane

```
function [tempo, PARAMs]=LocateAirplane(pathname, framelist, iFrame,
nFrames, stepFrame, areaAirplane, stAltura, HzCam, HzPause, envergaduraAnv)
```

```
i = imread(strcat(pathname, '\', framelist(1).name)); % IB
```

```
% --- TRANSFORMAÇÃO DE DIMENSÕES ---
```

```
dimi = size(i);
if (length(dimi)>2)
    i=i(:,1:dimi(1,2));
end
```

```
% -- VARIÁVEIS PARA VELOCIDADE --
```

```
espacoFinal=0;
deltaEspaco=0;
tempoFinal=0;
deltaTempo=0;
```

```

velocidade=0;
espacoInicial=0;
tempoInicial=0;
espacoInicial = 0;
tempoInicial = 0;

% ARMAZENA VALORES DE VELOCIDADE E ALTURA DURANTE UM PONTO DE ENSAIO
PARAMauxs(nFrames,1:2)=zeros;
iPARAMContador = 0;
iTEMPOContador = 0;
yanv = 0;
xanv = 0;
for aux=iFrame:stepFrame:nFrames
    % Inicia contagem do tempo de processamento da imagem
    TInicioTotal = tic;
    % --- LEITURA DA IMAGEM ---
    iTEMPOContador=iTEMPOContador+1;
    f = imread(strcat(pathname, '\', framelist(aux).name));
    % --- TRANSFORMAÇÃO DE DIMENSÕES ---
    dimf = size(f);
    if (length(dimf)>2)
        f=f(:,1:dimf(1,2));
    end
    % --- DIFERENCIAÇÃO ---
    s1 = imabsdiff(f,i);
    si = imcomplement(s1);
    if (yanv==0)
        si = imcrop(si,[0 0 720 stAltura.my2]);
    else
        si = imcrop(si,[0 0 720 yanv+50]);
    end;
    % --- DETECÇÃO DE BORDAS ---
    [junk threshold] = edge(si, 'sobel');
    fudgeFactor = .5;
    BWs = edge(si,'sobel', threshold * fudgeFactor);
    se90 = strel('line', 3, 90);
    se0 = strel('line', 3, 0);
    % --- DETECÇÃO DE BORDAS - FIM ---
    % --- DILATAÇÃO E EROSÃO - INÍCIO ---
    BWsdil = imdilate(BWs, [se90 se0]);
    BWdfill = imfill(BWsdil, 'holes');

```

```

BWnobord = imclearborder(BWdfill, 4);
seD = strel('diamond',1);
BWfinal = imerode(BWnobord,seD);
BWoutline = bwperim(BWfinal);
Segout = f;
Segout(BWoutline) = 255;
% --- BINARIZAÇÃO ---
I = uint8(BWoutline);
level = graythresh(I);
bw = im2bw(I,level);
bw = bwareaopen(bw, areaAirplane);
% --- BINARIZAÇÃO ---
% --- DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS CCLs (ex. CENTROIDE) ---
s = regionprops(bw, 'all');
% Se não encontrar a área do helicóptero, passa para o próximo frame
if ~isempty(s),
    [nh,oh]=size(s);
    %Tem apenas uma CCL
    if (nh==1)
        centroids = cat(1, s.Centroid);
        [r,c] = find(bw == 1);
        h = f;
        tam = size(r);
        % Centróide da aeronave
        xanv = centroids(:,1);
        yanv = centroids(:,2);
        imshow(h)
        hold on
        % --- IMPRIME ALTURA ---
        [altura] = HPassagem(stAltura.distancia, stAltura.mx1,
            stAltura.mx2, stAltura.my1, stAltura.my2, xanv, yanv,
            xpista, ypista);

        text(centroids(:,1)+10, centroids(:,2)+10, strcat('H =
            ',num2str(altura), ' m'))

        % --- IMPRIME CENTROIDE ---
        plot(centroids(:,1), centroids(:,2), 'b*')
        % --- IMPRIME PONTO DE REFERENCIA ---
        plot(c(end,1), r(end,1), 'r*')
        % --- VELOCIDADE ---

```

```

espacoFinal = c(end,1);
if (espacoFinal~=espacoInicial)
    deltaEspaco = abs(espacoFinal - espacoInicial);
    distPixelsPlacas = abs(stAltura.mx2 -
    stAltura.mx1);
    distPlacas = stAltura.distancia;
    deltaEspaco =
        deltaEspaco * (distPlacas/distPixelsPlacas);
    tempoFinal = aux/HzCam;
    deltaTempo = abs(tempoFinal - tempoInicial);
    velocidade = (deltaEspaco/deltaTempo); % em m/s
    velocidade = velocidade * 3.6; % converte para km/h
    text(centroids(:,1)+10, centroids(:,2)+25,
        strcat('V = ',num2str(velocidade), ' km/h'))
    espacoInicial = espacoFinal;
    tempoInicial = tempoFinal;
end;
iPARAMContador = iPARAMContador + 1;
PARAMauxs(iPARAMContador,1)=altura;
PARAMauxs(iPARAMContador,2)=velocidade;
%CENTROIDES
PARAMauxs(iPARAMContador,3)=centroids(:,1);
PARAMauxs(iPARAMContador,4)=centroids(:,2);
% CAUDA
PARAMauxs(iPARAMContador,5)=c(end,1);
PARAMauxs(iPARAMContador,6)=r(end,1);
hold off
end;
end;
end;

```