

TESE DE DOUTORADO Nº 085

ANÁLISE EM ALTA RESOLUÇÃO
DE PERFIS MAGNÉTICOS DE
SENSORES A LAÇO INDUTIVO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

Hermes Aguiar Magalhães

DATA DA DEFESA: 26/05/08

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE EM ALTA RESOLUÇÃO DE PERFIS
MAGNÉTICOS DE SENSORES A LAÇO INDUTIVO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Hermes Aguiar Magalhães

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Hani Camille Yehia

Belo Horizonte - MG

Maio de 2008

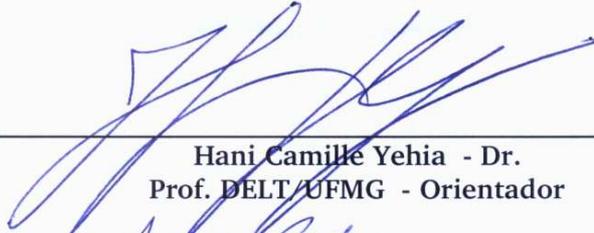
"ANÁLISE EM ALTA RESOLUÇÃO DE PERFIS
MAGNÉTICOS DE SENSORES A LAÇO
INDUTIVO PARA CLASSIFICAÇÃO DE
VEÍCULOS AUTOMOTORES"

HERMES AGUIAR MAGALHÃES

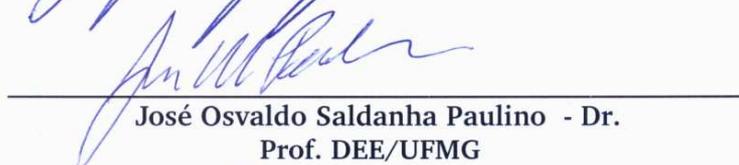
Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de *Doutor em Engenharia Elétrica*.

Aprovada em 26 de Maio de 2008.

Por:



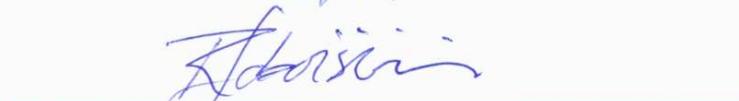
Hani Camille Yehia - Dr.
Prof. DELT/UFMG - Orientador



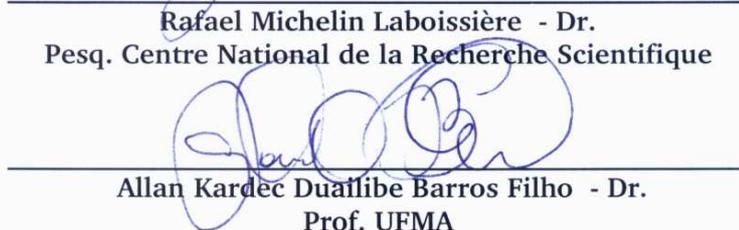
José Osvaldo Saldanha Paulino - Dr.
Prof. DEE/UFMG



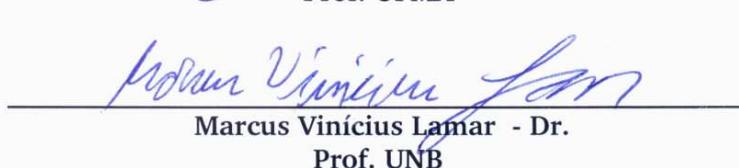
Renato Cardoso Mesquita - Dr.
Prof. DEE/UFMG



Rafael Michelin Laboissière - Dr.
Pesq. Centre National de la Recherche Scientifique



Allan Kardéc Duallibe Barros Filho - Dr.
Prof. UFMA



Marcus Vinícius Lamar - Dr.
Prof. UNB

Resumo

Esforços de pesquisa recentes têm buscado extrair de múltiplos tipos de detectores de veículos informações que, uma vez processadas de forma inteligente, podem resultar em medidas de classificação por áreas de abrangência e por trecho de vias de tráfego, em contraponto às limitadas medidas por ponto usualmente coletadas pelos profissionais da área de tráfego. Tendo como objetivo final a classificação de veículos, este trabalho traz um apanhado das diversas técnicas atualmente empregadas na detecção, classificação e re-identificação anônima de veículos ao longo de seu percurso. Por razões que vão de robustez ao baixo custo da tecnologia, foca-se na análise do perfil magnético dos detectores a laço indutivo. Propõe-se a extração do perfil magnético dos veículos utilizando técnicas de estimação frequencial em alta resolução pela *Decomposição Harmônica de Pisarenko – PHD* – para sinais coletados diretamente sobre os laços indutivos excitados por detectores comerciais. A seguir, propõe-se a medição de velocidade por correlação cruzada dos pares de perfis de dois laços em configuração *armadilha de velocidade*, onde é feita uma investigação da melhoria de acurácia alcançada no cálculo da velocidade. Devido à multiplexação de canais no tempo exercida pelos detectores comerciais para evitar *crosstalk*, é implementado um estimador de correlação cruzada modificado, capaz de tratar sinais com amostragem não-uniforme, obtendo assim a melhor estimativa possível com as amostras disponíveis, sem necessidade de interpolação. A validação em laboratório das técnicas propostas acima é feita pela realização de experimentos com estruturas metálicas reais, quando se discute qualitativamente a contribuição das correntes parasitas e do efeito ferromagnético na formação do perfil magnético. Um protótipo é construído e utilizado nos experimentos, capaz de coletar em campo os sinais dos laços indutivos, bem como capturar e armazenar as imagens dos veículos correspondentes. Seu software incorpora uma arquitetura orientada a serviços com uma concepção inovadora: é implementado um *framework* genérico de delegação voltado para o desenvolvimento de aplicações multitarefa em sistemas distribuídos de tempo real. Este *framework* é então instanciado pela primeira vez e validado tendo como aplicação alvo o software do protótipo. Esta arquitetura permite ao programador ajustar o compromisso eficiência *versus* rastreabilidade dos serviços executados em um ambiente *multithread*, pela escolha do nível de profundidade da publicação e da chamada de serviços. O mecanismo de delegação contido nesta arquitetura possibilita, ainda, uma eficiência potencialmente maior no despacho de serviços com troca de dados complexos, pela especialização sob demanda da classe responsável, uma vez que se trata de uma classe *template* tipificada pelos próprios tipos dos dados trocados. Adicionalmente, a verificação desses tipos é feita em tempo de compilação, quando os mesmos são examinados e usados no estabelecimento da ligação com o método a ser executado. Antecipa-se desta forma a depuração de erros de programação mais cedo no ciclo de desenvolvimento do software.

Abstract

Recent research efforts have been made to extract additional information from multiple vehicle detector technologies that, once processed in a more intelligent way, can lead to *wide-area/section-related* classification measurements, as opposed to limited point measurements, usually collected by traffic professionals. With efforts targeting vehicle classification, the current work presents a broad view of various current technologies used for classification, speed measurement and anonymous reidentification of vehicles through their paths. For reasons that span from technology robustness to low costs of implementation, the focus is on the magnetic profile analysis of inductive loop detectors (*ILD*). A proposition is made to use a high-resolution frequency estimation technique – the *Pisarenko Harmonic Decomposition – PHD* – for vehicle’s magnetic profile extraction from signals acquired directly over inductive loops, excited by standard loop detectors commercially available. Following, a proposition is made to measure speed through use of cross-correlation between signature pairs in a *speed trap* loop configuration, when the attained accuracy improvement of speed calculations is investigated. Due to time multiplexing of loop channels performed by commercial detectors to avoid crosstalk, a modified cross-correlation estimator is implemented, capable of extracting the best possible estimation from non-uniformly sampled signals, without the need for interpolation. The aforementioned techniques are investigated through experimental laboratory essays over real metallic structures, when the contribution of eddy currents and ferromagnetic effect on magnetic profile shaping are qualitatively discussed. A prototype is constructed and used in experiments, capable of collecting in-the-field real vehicle data, including loop sensor signals and images of corresponding vehicles. Its software incorporates an innovative concept of service-oriented architecture: a generic delegation framework is built, targeting the development of multitasking real-time distributed system applications. This framework is then for the first time instantiated and validated, with target application being the software of the prototype. This architecture lets the programmer adjust the efficiency-traceability tradeoff in a multithreading environment, what is made possible through choice of in-depth level of operation for publishing services and for requesting services. The delegate mechanism embedded in this architecture also allows a potentially higher efficiency in service dispatch with complex data to exchange, through on-demand specialization of dispatching class, since it is a template class typed by the exchanged data types themselves. Additionally, these data types are verified at compilation time, when they are examined and used upon binding to the method that will be executed. In this way, programming errors can be caught earlier in software development cycle.

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Marília pelo seu esforço e paciência ao me ajudar a conciliar seu trabalho com o desenvolvimento desta pesquisa e com a criação de três filhos pequenos. Agradeço aos meus pais Maria e Cleto, bem como aos meus sogros Marisa e Manoel, pela eterna disponibilidade e felicidade de cuidar das crianças um incontável número de vezes. Agradeço à sempre cordial disponibilidade de Elidiane Silva na resolução célere de questões administrativas e em especial pelo apoio e palavras de motivação nos momentos de dificuldade. Endereço um agradecimento especial também ao engenheiro Marcelo Ribeiro pelo auxílio no desenvolvimento do software e pela atuação em conjunto com os demais colaboradores, aos quais estendo minha gratidão, e que auxiliaram no projeto, execução e montagem da estrutura eletro-mecânica. Agradeço à empresa GCT – Gerenciamento e Controle de Trânsito LTDA, sintetizada e representada na pessoa de seu diretor, Guilherme Ribeiro, pelo apoio e cessão de infra-estrutura, ferramental e equipamentos para construção do protótipo sobre o qual a pesquisa foi feita. Finalmente, um agradecimento especial aos professores Hani Camille Yehia e Luciano de Errico, pelo acolhimento desta pesquisa no âmbito da Universidade Federal de Minas Gerais e pelo apoio na indicação dos excelentes estagiários.

“O ser humano será capaz de ultrapassar os limites deste universo antes que consiga alcançar o sistema solar mais próximo...”

Hermes Magalhães, 1988.

“Bastará procurar dentro de si mesmo.”

Hermes Magalhães, 2008.

Dedico este trabalho aos meus queridos e amados filhos Helena, Henrique e Tiago.

Sumário

Resumo	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos	iv
Dedicatória.....	v
Sumário.....	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Abreviaturas.....	xx
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Contribuições Científicas e Tecnológicas	2
1.3 Organização deste Trabalho	4
2 Detecção e Classificação de Veículos	6
2.1 Laços Indutivos	7
2.2 Informações Providas por um Único Laço	10
2.3 Classificação de Veículos.....	12
2.4 Re-identificação de Veículos e Medições de Tráfego por Trecho	14
2.5 Sistemas Não Invasivos de Detecção de Veículos	25
2.5.1 Considerações Envolvendo as Câmeras	29
2.5.2 Estratégias de Rastreamento de Veículos por Imagem	32
2.5.2.1 Rastreamento Baseado em Modelos.....	33
2.5.2.2 Rastreamento Baseado em Regiões.....	33

2.5.2.3	Rastreamento Baseado em Contornos Ativos	36
2.5.2.4	Rastreamento Baseado em Características	36
2.5.3	Extração de Imagem Estática de Fundo	37
2.6	Fusão de Dados de Sensores.....	38
2.7	Otimização Multi-Objetivo Lexicográfica	41
3	Aspectos Tecnológicos – Laços Indutivos	44
3.1	Detectores de Veículos por Laço Indutivo	45
3.2	Sensibilidade do Laço Indutivo	46
3.3	Extração do Perfil Magnético	49
3.4	Geometria do Laço Indutivo.....	52
3.5	Extração de Características do Perfil Magnético.....	55
3.6	Medição de Velocidade	59
4	Construção do Protótipo	63
4.1	Caixa Principal	71
4.1.1	CPU	71
4.1.2	Parametrizador.....	72
4.1.3	Placa de Monitoração e Controle (MCB).....	73
4.1.4	Rack de Detectores (DRP).....	74
4.1.5	Painel de Conexões e Sinalização (CSP).....	75
4.2	Caixa de Câmeras e Flash.....	78
4.3	Câmeras e Dispositivos Iluminadores	78
5	Descrição do Software.....	80
5.1	Arquitetura.....	81
5.1.1	Modelo Preliminar para Testes.....	82

5.1.2	Mecanismo de Delegação de Serviços	86
5.1.3	Mecanismo Proxy para Operação Distribuída.....	97
5.2	Captção dos Perfis Magnéticos.....	101
5.2.1	Captção Convencional	101
5.2.2	Captção para Análise em Alta Resolução.....	101
6	Resultados e Conclusões - Experimentos.....	104
6.1	Aparato para Coleta de Perfis Magnéticos	104
6.2	Resultados – Perfis Magnéticos.....	118
6.2.1	Contribuição dos Efeitos Físicos na Formação do Perfil Magnético	118
6.2.2	Medição de Velocidade por Correlação Cruzada dos Perfis Magnéticos	123
6.2.3	Algoritmo para Estimção de Correlação – Amostragem Não Uniforme.....	128
6.2.4	Exemplo de Análise de Perfil Magnético Complexo	130
6.3	Conclusões – Perfis Magnéticos.....	133
7	Conclusões Finais	137
Apêndice A Estimção Freqüencial de Sinais Baseada em Autovetores e Autovalores – Prony, PHD e MUSIC/EV.....		139
A.1	Introdução.....	139
A.2	Auto Análise da Matriz de Autocorrelação para Senóides em Ruído Branco.....	140
A.3	Técnicas de Prony.....	143
A.4	Estimção Espectral Auto-regressiva pela Matriz de Covariância Modificada	144
A.5	Auto Análise da Matriz de Dados para Senóides em Ruído Branco.....	149
A.6	Estimadores de Freqüência Baseados no Subespaço de Ruído.....	150
A.6.1	Decomposição Harmônica de Pisarenko	151
A.6.2	Funções Estimadoras de Freqüência.....	152

A.6.3	Relação do modelo AR com a Decomposição Harmônica de Pisarenko	154
Apêndice B	Interface Homem-Máquina do Software	157
B.1	Interface de Acesso Local ao Software Servidor.....	157
B.2	Software Cliente	162
Apêndice C	Delegate Software Usage.....	166
C.1	Example of SDelegate Usage (one-way data flow service dispatch)	171
C.1.1	<i>DelegateServiceProvider</i>	171
C.1.2	<i>DelegateServiceBinder</i>	173
C.1.3	<i>DelegateInterface</i>	174
C.1.4	<i>DelegatePort</i>	175
C.2	Example of RDelegate Usage (two-way data flow service dispatch)	176
C.2.1	<i>DelegateServiceProvider</i>	176
C.2.2	<i>DelegateServiceBinder</i>	179
Referências Bibliográficas.....		181

Lista de Figuras

- Figura 2-1: Detecção por laço indutivo: (A) Planta baixa dos laços indutivos em configuração "armadilha de velocidade" (B) Fotos de laços de diversos fabricantes. (C) Visão em perspectiva do projeto de instalação do protótipo construído neste trabalho, mostrando laços indutivos, caixa de passagem, cabo alimentador e cabine de eletrônica. (D) Detalhe da confecção do laço indutivo. 9
- Figura 2-2: Perfis magnéticos típicos mostram a variação de indutância do laço ΔL (nH) ao longo do tempo (ms): (A) veículo de passeio; (B) caminhonete (extraído de Oh et al., 2002, [75]). Note as diferenças dos perfis magnéticos em amplitude e forma. Note também que neste exemplo a ocupação do laço "O" é aproximadamente a mesma para ambos (580 ms).. 11
- Figura 2-3: Perfis diferentes para veículos diferentes em um laço indutivo usado para detecção veicular (extraído de Pfannerstill, 1989, [83]). Embora o autor não especifique a ordem de grandeza dos eixos, podemos atribuir ao eixo das abscissas o tempo, e ao eixo das ordenadas a frequência, ou contagem de ciclos do sinal oscilatório no laço indutivo, em ordens de grandeza similares à Figura 2-4. 16
- Figura 2-4: Diferença de perfis magnéticos para as diversas classes de veículos (Lai et al., 2000, [61]). 16
- Figura 2-5: Correção de Distorção ou "warping" da assinatura dos veículos. (a, c) – Assinaturas originais e (b, d) – assinaturas normalizadas de um carro e caminhão, respectivamente. As linhas tracejadas e contínuas referem-se a velocidades maiores e menores dos mesmos veículos, respectivamente. Normalização em três etapas: magnitude pelo valor máximo, transformação da escala de tempo em comprimento multiplicando-se pela velocidade, re-amostragem interpolada por *splines* para possibilitar comparações (extraído de Abdulhai, 2003, [1]). 19
- Figura 2-6: Ilustração da necessidade de correções de distorção temporal ou "warping" e normalização em amplitude: (A) Mesmo veículo em diferentes velocidades – necessita normalização em tempo; (B) veículos diferentes em mesma velocidade, normalizado em amplitude para comparação (extraído de Oh et al, 2002, [75], [76])..... 20
- Figura 2-7: Lâmina Sensora e seu perfil magnético em instalação provisória (Oh et al., [73], [74]). 22
- Figura 2-8: Lâmina sensora – disposição na via de tráfego e detalhes do perfil magnético para um veículo de passeio ⁶. O perfil mostrado permite distinguir a região do corpo do veículo – entre pontos 2 e 3 – da região correspondente aos eixos e rodas: entre pontos 1 e 2 e entre pontos 3 e 4 – (extraído de Oh et al. 2004, [73] e [74]). 22
- Figura 2-9: Identificação das rodas e do corpo do veículo no perfil gerado pela lâmina sensora (conforme Park et al., 2006, [81])..... 23
- Figura 2-10: Comparação entre perfis magnéticos ⁶ colhidos de sensores laço indutivo convencionais (1,82x1,82m) e utilizando a lâmina sensora para diferentes tipos de veículos ([73])..... 24
- Figura 2-11: AUTOSENSE II (Harlow, 2001, [39]) usa varredura de pulsos LASER: Mede-se a distância ao alvo a partir do atraso de retorno do eco ("False Color Range Image") e a intensidade da onda refletida ou refletância do objeto ("Intensity Image"). 26
- Figura 2-12: Uma transformada de projeção H_i ou *homografia* ([20]) é normalmente usada para mapear coordenadas da imagem (x,y) para coordenadas do mundo real (X,Y) 30
- Figura 2-13: Perda de nitidez de objeto em movimento devido ao prolongado tempo de exposição (abertura do obturador por tempo muito longo): o tempo de exposição para a figura à direita é maior do que para a figura à esquerda (extraído de Magalhães et al., 2005, [64]). 31
- Figura 2-14: Rastreamento por regiões *versus* rastreamento por características (A) Rastreamento por região: no tempo t_3 o veículo 2 ocluiu parcialmente o veículo 1. (B) Rastreamento por características. (C) As características são agrupadas em

- um conjunto, um rastro é selecionado como sendo representativo da trajetória do veículo. (D) Amostra de imagem com características agrupadas. (Extraído de Coifman et al., 1998, [20]). 35
- Figura 3-1: (A) Circuito equivalente do laço indutivo com representação das perdas envolvidas; (B) Efeito capacitivo em laços indutivos enterrados: entre espiras de condutores e entre condutores e a terra; (C) O resultado no comportamento em frequência do laço indutivo visto pelo circuito detector é o de um "aumento" na indutância com a frequência (extraído de FHWA, 1990, [28]). 47
- Figura 3-2: A modelagem AR (ou auto-regressiva, curva inferior) é uma versão suavizada da Decomposição Harmônica de Pisarenko (curva superior). A figura mostra um trabalho anterior do autor, onde se evidenciam em alta resolução as quatro frequências *formantes* para um sinal de voz correspondente à vogal sustentada /eé/. No gráfico, o eixo das ordenadas é logarítmico e tem relação com a potência do sinal para quadros de voz de 64 ms (extraído de Magalhães et al, 2000, [63]). 51
- Figura 3-3: Perfis magnéticos para um mesmo veículo (um ônibus), utilizando laços indutivos com comprimentos longitudinais diferentes. (A) Em (1): laço de 4m; em (2): laço de 50cm; (B) Laço de 10cm (extraído de Gajda et al., 2001, [33]). 53
- Figura 3-4: Extração de características do perfil magnético do laço indutivo convencional: (A) Assinatura bruta convencional; (B) Normalização dos eixos; (C) Interpolação para taxa de amostragem constante (*ESI* – "*Equally Spaced Interpolation*"); (D) Características extraídas da assinatura bruta; (E) Características extraídas da assinatura normalizada (adaptado de Oh et al., 2002, [75], [76] e Ritchie et al., 2005, [86]). 56
- Figura 3-5: Extração de características do perfil magnético da lâmina sensora: é possível o agrupamento de características por partes do veículo (Oh et al., 2004, [73], [74]). 56
- Figura 3-6: Estatística da distribuição do comprimento magnético para quatro categorias de veículos, realizada sobre banco de dados de veículos coletado na cidade de Curitiba, PR, (Calixto, 2006, [12]). 59
- Figura 3-7: Similaridade dos perfis magnéticos para um mesmo veículo passando em diferentes orientações sobre o par de laços indutivos em configuração "armadilha de velocidade" (extraído de Oh et al., 2002, [77]). 61
- Figura 4-1: Diagrama de blocos do equipamento registrador de veículos para coleta de perfis magnéticos e imagens. 63
- Figura 4-2: Visualização esquemática da instalação civil/mecânica dos componentes principais do MVFV. A caixa do processador pode ter poste exclusivo ou fazer uso mútuo com os registradores / iluminadores. 64
- Figura 4-3: (A) Vista frontal da caixa do processador, (B) Vista em perspectiva da caixa do processador. (C) Ilustração de instalação em campo, mostrando neste caso particular a possibilidade de intercalação dos laços indutivos para cobertura fechada de uma região da via de tráfego em configuração "armadilha de velocidade". 65
- Figura 4-4: Caixa da CPU e mini-estrutura de sustentação: o equipamento teve sua estrutura mecânica (caixa, postes, etc.) totalmente projetada neste trabalho, inclusive a mini-estrutura para testes de desenvolvimento em laboratório. Nesta figura estão mostrados: detalhe de projeto como as simulações 3D da caixa da CPU com parede dupla e as fotos correspondentes após montagem. 66
- Figura 4-5: Vista geral do protótipo do equipamento detector e registrador de veículos montado em mini-estrutura para desenvolvimento. Pode-se ver a CPU dentro de sua caixa, colocada sobre trilho deslizante. Pode-se ver também o rack de detectores ocupando o local das baias frontais do gabinete do PC. As caixas de câmeras e flash estão logo acima da caixa da CPU, onde se vêem os braços de sustentação por onde caminha o cabeamento. No detalhe, o projeto da mini-estrutura. 67
- Figura 4-6: Visão geral do protótipo de registro de veículos mostrando a mini-estrutura de desenvolvimento, caixa da CPU e das câmeras/flash (com uma das caixas de câmera fechada) e interface homem-máquina (software) para ajuste de câmeras no monitor. 68

- Figura 4-7: Detalhes da montagem do protótipo registrador de veículos. (A) CPU, rack com detectores e placa de monitoração e controle (MCB); (B) Detalhes de montagem abaixo da bandeja da CPU: à direita embaixo: barramento de terra e trilho DIN com disjuntor, proteções, tomadas e filtros; à esquerda, barramentos de distribuição AC protegidos por tampa acrílica; acima o painel de conexões e sinalização (CSP). 69
- Figura 4-8: Detalhe da parte superior da mini-estrutura mostrando braços de sustentação e caixas de câmera aberta e fechada. 70
- Figura 4-9: Parametrizador. (A) Placa em estágio inicial de desenvolvimento e placa final montada. (B) Caixa fechada..... 72
- Figura 4-10: Placa de Monitoração e Controle (MCB). (A) Estágio inicial de desenvolvimento da placa MCB em placa de prototipagem. (B) Visão 3D da placa durante o projeto da versão final. (C) Circuito impresso da placa MCB. (D) Placa MCB montada..... 73
- Figura 4-11: Rack de detectores de veículos. (A) Primeiro rack montado usando esquadrias de alumínio e blocos de engate rápido. (B) e (C) placa traseira do rack (placa DRP), lado de componentes e solda, respectivamente. (D) Rack atual mostrando detectores de veículos à direita e placa MCB à esquerda. 74
- Figura 4-12: Painel de Conexões e Sinalização (CSP): (A) visão 3D obtida durante o projeto mecânico; (B) painel aberto; (C) painel fechado; (D) Detalhe esquemático da placa superior; (E) Detalhe em 3D mostrando o circuito de sincronismo de vídeo; (F) PCB da placa superior (CSPU): fusíveis, chaves e LEDs, conexões de sincronismo de vídeo, sensor externo de temperatura e conector de sinais de controle de/para a CPU; (G) Placa inferior (CSPD): distribuição de energia AC/DC e conexões de comando provenientes dos equipamentos remotos e laços indutivos 76
- Figura 4-13: Caixa de câmeras de vídeo/fotográfica/flash mostrando montagem do flash. (A) e (B) Detalhes de desenhos de projeto para fabricação; (C) e (D) simulação 3D durante o projeto com a caixa aberta; (E) realização do projeto mostrando flash montado; (F) simulação 3D com a caixa fechada; (G) foto da caixa fechada..... 77
- Figura 4-14: Resultados alcançados pelo sistema de captura de imagem: a alta faixa dinâmica da câmera lida bem com situações de ofuscamento (note como é possível ver a cor do céu e algumas nuvens). O sincronismo entre o flash e o obturador da câmera de vídeo permite uma boa imagem, mesmo a 20 m e com obturador a 1/10.000 s. Há, portanto, folga para capturar objetos em movimento a distâncias maiores, bastando para isso aumentar o tempo de exposição. . 79
- Figura 5-1: Interface de teste dos módulos de software do MVFV. Com ela é possível monitorar a frequência e indutância dos laços indutivos, a imagem das câmeras de vídeo, testar o iluminador (flash), ler o conteúdo do parametrizador (EEPROM), bem como ligar e desligar pinos digitais de E/S existentes na placa de captura de vídeo..... 84
- Figura 5-2: Diagrama de classes do software de teste do equipamento em notação UML – *Unified Modeling Language* : padrão que define regras e notações para concepção, especificação e realização de software. 85
- Figura 5-3: Arquitetura Orientada a Serviços ou *SOA – Service Oriented Architecture*, vista como uma combinação dos paradigmas de projeto *publish-subscribe* e *find-bind-execute*: em um primeiro momento (1), o provedor publica seus serviços em um *registro* acessível aos potenciais consumidores de serviços. Um consumidor, ao necessitar de um serviço, procura-o (2) no "barramento" de serviços (*ESB – Enterprise Service Bus*) e ao achá-lo, estabelece um *contrato* com o provedor (3), consolidando assim a ligação entre ambos. Daí por diante, o consumidor passa a usufruir o serviço ofertado pelo provedor (4). 88
- Figura 5-4: Exemplo em tempo de execução de uma chamada de serviço usando o mecanismo de delegação mostrado na Figura 5-6. Os *ports* – simbolizados como pequenos quadrados na fronteira das classes – são conceitualmente comportamentais. Ligados a eles podemos ter *interfaces*, puramente estruturais. As *interfaces* são simbolizadas como um círculo quando ofertadas ou uma semicircunferência quando necessárias a uma classe. Uma conexão de ocorrência – o despacho de um serviço em tempo real, por exemplo – é simbolizada por um encaixe destes símbolos, como mostrado. 90

- Figura 5-5: Visualização do *Diagrama de Pacotes* constituintes do *Mecanismo de Delegação*. Neste diagrama, o pacote *Customizable* é composto de classes exemplo que ilustram a forma como as classes do aplicativo que irá usar o mecanismo devem ser construídas. Os pacotes *RDelegate* e *SDelegate* constituem-se nos mecanismos de delegação propriamente ditos, nas modalidades bidirecional (i.e. chamadas com parâmetros de "retorno", daí a letra *R*) e unidirecional, respectivamente (a letra *S* vem de "simples"). O pacote *Common* reúne as classes de uso comum a ambas as modalidades de delegação. 92
- Figura 5-6: Diagrama de classes do pacote *RDelegate* (mecanismo de delegação na modalidade com parâmetro de retorno), evidenciando a estrutura de programação em *templates* do mecanismo de delegação. O bloco embaixo à esquerda, envolto por linhas tracejadas, mostra a estrutura sugerida para uma classe customizável de nome simbólico "*DelegateServiceProvider*" que deseja oferecer serviços. A diagramação mostrada neste bloco sugere uma arquitetura que prioriza o uso de interfaces e portas para disponibilizar os serviços de forma ordenada e seletiva. O bloco entre linhas tracejadas embaixo e à direita mostra a estrutura que se deve incluir (através da diretiva *#include "DelegateServiceBinder.h"* no caso do C++) para que os objetos de uma classe passem a ser usuáries dos serviços ofertados pelos outros objetos desta e de outras classes usando o mesmo mecanismo de delegação 95
- Figura 5-7: Diagrama de classes do pacote *Proxy* para extensão do mecanismo de delegação de serviços para sistemas distribuídos: 100
- Figura 5-8: Interface do programa de aquisição de dados desenvolvido para capturar os sinais dos laços indutivos em taxas até 1MS/s usando o cartão A/D PCI1712 da Advantech. 102
- Figura 5-9: Interface do programa de visualização dos dados adquiridos via conversão A/D. São mostrados sinais capturados de dois laços indutivos pertencentes a um mesmo cartão detector de veículos de capacidade até quatro canais, no qual dois canais estão ativos (mostrados) e dois estão configurados como inativos (trechos de silêncio no sinal). Em (a) vemos a totalidade do sinal capturado. Em (b) é ilustrada a capacidade zoom sobre a imagem, evidenciando neste caso o instante de chaveamento entre os dois canais ativos e o efeito "*cross-talk*", onde os canais ativos contaminam-se por indução mutuamente: o canal "Ligado" (senóide de maior amplitude) induz sinal no canal "Desligado" (senóide de menor amplitude). 103
- Figura 6-1: Adaptação para coleta dos sinais nos laços indutivos em paralelo com o detector comercial. (A) Placa adaptada (à esquerda) e placa de concentração dos sinais para entrega (via cabo SCSI) à placa A/D (à direita). (B) Painel de Conexões adaptado às placas mostradas, coletando os sinais nos laços (cabos par trançado de rede) e sinais de eventos digitais como detecção e captura de imagem (cabo flat). 105
- Figura 6-2: Aparato de simulação de via de tráfego..... 106
- Figura 6-3: Sinal oscilatório no laço indutivo..... 108
- Figura 6-4: Obtenção de perfil magnético de uma folha de alumínio com dois cortes transversais, resultando em dois "vales" no perfil:..... 109
- Figura 6-5: A *ocupação O* do laço (Tabela 3-1) de um veículo de 3,68 m de comprimento viajando a 110 km/h sobre um laço de 1,82 m de comprimento longitudinal é de aproximadamente 180 ms. 111
- Figura 6-6: Conhecendo as limitações do aparato de teste e a qualidade do perfil magnético obtido: 113
- Figura 6-7: Filtro passa-baixas utilizado para restringir o estudo à oscilação de frequência fundamental, rejeitando os harmônicos gerados pelas imperfeições do oscilador..... 115
- Figura 6-8: Perfil magnético de uma sucessão de folhas de alumínio montadas em "sanduíche" usando os três discos de acrílico (espessura 2mm cada), nas camadas externa mais distante do sensor, interna distante, interna próxima e externa mais próxima (esquerda para direita, respectivamente). 116

- Figura 6-9: Efeito da distância do material condutivo não ferromagnético (no caso, o alumínio) e com área "infinita" na alteração da indutância do laço para o aparato de emulação de tráfego montado..... 117
- Figura 6-10: Contribuições antagônicas do efeito ferro-magnético e das correntes parasitas na alteração do perfil magnético:119
- Figura 6-11: Contribuições antagônicas do efeito ferromagnético e das correntes parasitas no perfil magnético: recortes eletricamente isolados de alumínio e de aço são montados sobre uma plataforma de alumínio de referência (primeira curva). Para cada tipo de material, as curvas mostram sempre as correntes parasitas contribuindo para a diminuição da indutância do laço – o que reflete no aumento da frequência (setas ascendentes) – e o efeito ferromagnético que age no sentido contrário, aumentando a indutância (setas descendentes)..... 121
- Figura 6-12: Perfis magnéticos da Figura 6-11 convertidos para variação de indutância ΔL e colocados em um mesmo gráfico. Vemos mais claramente nesta figura a maior contribuição do efeito ferromagnético do aço-silício de grão orientado (usado em construção de núcleos de transformadores) – devido à sua maior permeabilidade magnética em relação ao aço inox, pois o ΔL chega a ter um degrau máximo no sentido positivo de 2400 nH para o aço-silício, enquanto que para o aço inox o degrau máximo é de 2180 nH. 122
- Figura 6-13: Exemplo de montagem de perfil magnético que busca similaridade com o perfil de um veículo de passeio de 2 eixos passando sobre a lâmina sensora descrita na Seção 2.4: (A) Disposição do material usado na montagem da giga. (B) Curva da esquerda: perfil magnético em frequência. (B) Curva da direita: mesmo perfil magnético da esquerda convertido para variação de indutância ΔL correspondente no laço indutivo. 124
- Figura 6-14: Captação dos perfis magnéticos da estrutura mecânica mostrada na Figura 6-13 em dois laços indutivos consecutivos em configuração "armadilha de velocidade". Como se pode ver, os perfis foram captados em dois canais multiplexados de um mesmo detector Canoga C822. 127
- Figura 6-15: (A) Correlação cruzada dos perfis mostrados na Figura 6-14 para determinação de velocidade. O atraso de 121,5 ms no ponto máximo da curva corresponde à medida m_{Rmax} que buscamos: a separação no tempo dos perfis na Figura 6-14, i.e. o tempo de deslocamento do objeto no percurso de um laço para o outro. (B) Quantidade de valores disponíveis, usados pelo estimador de correlação, com linha de corte a 10% da contagem máxima: estimativas de correlação feitas com quantidade de realizações abaixo desta contagem não são mostradas..... 129
- Figura 6-16: Exemplo de montagem dos discos construídos para compor estruturas com perfis magnéticos de diferentes características, variando quanto ao material, textura e distância em relação ao laço indutivo. (A) Camada inferior. (B) Camada intermediária. (C) Camada superior. (D) Conjunto com as três camadas superpostas. (E) Perfil magnético correspondente, coletado em alta resolução pelo método proposto. Consulte o texto para acompanhar o significado da numeração mostrada. 131
- Figura 6-17: Sinal e perfil magnético correspondente, em dois momentos distintos (A e B), captados usando a montagem mostrada na Figura 6-13, onde a velocidade linear no aparato de teste é de 8m/s. A taxa de atualização do perfil em alta resolução é de 250 μ s. A descontinuidade do perfil corresponde ao trecho em que o detector comercial interrompe a alimentação do laço. Uma correspondência possível em escala do mundo real para este perfil seria a de um bólido de 2m de comprimento passando a 360 km/h sobre um laço de comprimento longitudinal à via igual a 30 cm. No detalhe da foto vemos uma Kawasaki ZX14, capaz de alcançar velocidades acima de 320 km/h. 135
- Figura B-1: Ícone do processo Servidor do MVFV na área de notificação da barra de tarefas..... 157
- Figura B-2: Campos funcionais da tela principal da IHM de acesso local. A seção funcional "Operação" mostrada informa a quantidade de registros de veículos armazenada, bem como informações de data da última coleta, diretório de destino dos registros e um botão para visualizar imagem das câmeras. 158

- Figura B-3: Menu principal: a ação "Sair" coloca o equipamento em estado de Aquisição (operação autônoma). Barra de informações inferior: com um click de mouse no campo apropriado, é possível mudar o modo de operação, visualizar os eventos de alerta ou atualizar data e hora. 160
- Figura B-4: Seção "Configuração": a guia "Dispositivos" permite visualizar a quantidade de sensores e dispositivos de captura de imagem alocados por região de detecção. Na guia "Registros" é possível escolher o diretório de armazenamento dos registros de veículos, bem como selecionar um dispositivo para coleta automática em campo. 161
- Figura B-5: Seções funcionais "Parametrização" e "Eventos". 162
- Figura B-6: Software "cliente": visão geral da IHM em ambiente MDI, mostrando superposição das janelas de Operação, Configuração, Estatísticas e Detalhamento. A barra inferior mostra o modo de operação atual do software (no caso, "desenvolvimento"), o número de registro no órgão regulador, as datas de última aferição e agendamento da próxima aferição, o status de proteção do parametrizador, o código do local de instalação e o status de eventos e falhas (no caso, "OK"). 163
- Figura B-7: Software "Cliente": tela resumo de operação, mostrando quantidade de registros armazenados, agendamento de ajustes, registro de eventos/falhas e informações de data/hora e de conexão cliente-servidor via IP. Os ajustes de câmeras de vídeo e fotográfica, bem como a consulta a eventos de falhas são feitos nas abas correspondentes. 164
- Figura B-8: Software "Cliente": tela resumo de configuração, mostrando alocação de recursos por faixa. Os recursos disponíveis constam da aba "Inventário de Recursos"; a atribuição de recursos é feita nas abas "Recursos por Faixa" e "Recursos por Equipamento". 164
- Figura B-9: Software "Cliente": telas de ajuste das câmeras de vídeo, com ferramenta de zoom e opções de visualização "ao vivo" ou "congelado". A origem da imagem pode ser o último registro efetuado (opção mostrada) ou imagem atual... 165
- Figura C-1: A zoom into lower left of Figura 5-6 shows the block where a class architecture is advised to represent service provider classes that want to use *RDelegate* mechanism. The same architecture is advised for use with *SDelegate* mechanism. You only need to change the functor's include file from "*RCallbackInfoWithTypedParams.h*" to "*CallbackInfoWithTypedParam.h*". 166
- Figura C-2: A zoom into lower right of Figura 5-6 shows the block where a global dispatcher binds service calls to service lists, with type checking made at compile time. The C++ classes that are service users need only to include *DelegateServiceBinder.h* in their definitions. The *typedefs* shown are samples of user-defined parameters for use in examples shown in items C.1 and C.2. 167

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Vantagens e Desvantagens de Tecnologias Detectoras de Veículos.....	8
Tabela 2-2: Classificação de veículos segundo FHWA ([12], [32], [87]):	13
Tabela 2-3: Classificação de veículos sugerida por Calixto ([12]):	14
Tabela 2-4: Classificação de veículos segundo o Código de Trânsito Brasileiro ([12]):	15
Tabela 3-1: Características extraídas de perfis magnéticos convencionais ([75], [76], [86])	57
Tabela 3-2: Resultado percentual da classificação de veículos efetuada por Calixto em 2006 para as quatro categorias de veículos mostradas na Figura 3-6 ([12]):	59
Tabela 5-1: Princípios de Qualidade para Processos de Desenvolvimento de Software para Sistemas de Tempo Real [27]	81
Tabela 5-2: Requisitos da Estrutura do Software de Gerenciamento de Serviços.....	86
Tabela 5-3: Vantagens do Mecanismo de Delegação de Serviços	87
Tabela B-1– Barra de Informações Inferior.....	159
Tabela B-2: Modos de Operação do Software Servidor do MVFV.....	159

Lista de Símbolos

O	<i>Ocupação do laço indutivo (duração, segundos)</i>
b	<i>Estimador de ocupação do laço indutivo – Eq. (6-1)</i>
SR	<i>Slew-Rate (Taxa de Subida)</i>
SR_N	<i>Normalized Slew Rate (Taxa de Subida Normalizada)</i>
ΔL	<i>Variação de Indutância</i>
I	<i>Imagem</i>
∇	<i>Operador gradiente aplicado à imagem</i>
H	<i>Homografia (Seção 2.5). Operação transposição Hermitiana (Apêndice A).</i>
t	<i>Tempo (segundos)</i>
Q	<i>Fator de Qualidade – Figura 3-1</i>
ω	<i>Frequência angular (rad/s)</i>
L_s	<i>Indutância Série Equivalente (H)</i>
R_s	<i>Resistência Série Equivalente (Ω)</i>
C_p	<i>Capacitância Paralela Equivalente (F)</i>
ω_0	<i>Frequência Angular de Ressonância – Figura 3-1</i>
S_L	<i>Sensibilidade do Laço Indutivo ou Indutância Normalizada – Eq. (3-1)</i>
L_A	<i>Indutância na ausência de veículo</i>
L_P	<i>Indutância na presença de veículo</i>
L	<i>Comprimento magnético (ou eletrônico) do veículo (metros)</i>
M	<i>Varição máxima de magnitude do perfil magnético (pode ser dada em contagem de ciclos, frequência em kHz, indutância em nano-Henries (ΔL) ou “por unidade” ($\Delta L/L$), ou ainda como S_L definido na Eq. (3-1) – distúrbio percentual em relação à indutância de repouso).</i>
M	<i>Quantidade de senóides complexas contidas no sinal “x”</i>
v	<i>Velocidade escalar (m/s)</i>
v_{t12}	<i>Velocidade do ponto 1 ao ponto 2 usando limiares fixos – Eq. (3-2)</i>
v_{r12}	<i>Velocidade (m/s) do ponto 1 ao ponto 2 usando a correlação cruzada – Eq. (3-5)</i>
A	<i>Área sob a curva do perfil magnético</i>
D	<i>Distância entre laços indutivos (metros)</i>
$R_{S_{L_1}, S_{L_2}}(\tau)$	<i>Correlação cruzada entre perfis magnéticos $S_{L_1}[n]$ e $S_{L_2}[n]$ dos laços 1 e 2</i>
$R_{S_{L_1}, S_{L_2}}[m]$	<i>Estimação discreta da correlação cruzada a partir das amostras disponíveis.</i>

τ	Atraso de tempo (s) entre amostras ao aplicar-se o operador correlação
m	Atraso de tempo “ τ ” discretizado (s)
m_{Rmax}	Atraso de tempo (s) correspondente ao ponto de máximo de $R_{S_{L1}S_{L2}}[m]$
$\ell_{veículo}$	Comprimento longitudinal do veículo (metros)
$\ell_{laço}$	Comprimento longitudinal do laço indutivo (metros)
ΔF	Variação de frequência (Hz)
τ_v	Tempo de deslocamento (segundos) do laço 1 ao laço 2.
\mathbf{R}_p	Matriz de auto-correlação de ordem “p” – Apêndice A
$r_{xx}[k]$	Valor da auto-correlação do sinal “x” para o atraso de tempo discreto “k”
P_b, f_i	Potência (W) e frequência linear (Hz), respectivamente, da i-ésima senóide.
j	Unidade complexa $j = \sqrt{-1}$
T	Passo de discretização temporal uniforme (segundos)
k	Variável tempo discreto seqüencial (adimensional, multiplica o passo T)
ρ_w	Variância do ruído branco complexo aditivo
\mathbf{I}	Matriz Identidade
$\delta[k]$	Função impulso unitário discreta em k (função delta discreta)
s_i	Vetor de sinal com informação da frequência da i-ésima senóide
\mathbf{S}_p	Matriz de auto-correlação do sinal
\mathbf{W}_p	Matriz de auto-correlação do ruído
λ_i	Autovalor correspondente ao i-ésimo autovetor \mathbf{v}_i da matriz \mathbf{S}_p de auto-correlação do sinal
\mathbf{v}_i	Autovetor correspondente ao i-ésimo autovalor da matriz \mathbf{S}_p de auto-correlação do sinal.
$\hat{x}_f[n], \hat{x}_b[n]$	Preditores lineares posterior e anterior, respectivamente, para modelos auto-regressivos de coeficientes \mathbf{a}_p^f e \mathbf{a}_p^b
$\mathbf{a}_p^f, \mathbf{a}_p^b, \mathbf{a}_p^{fb}$	Vetores com coeficientes dos modelos auto-regressivos por modelagem de predição posterior, anterior, e a combinação de ambos, respectivamente
\mathbf{a}_p	Vetor \mathbf{a}_p^{fb} aumentado, onde o primeiro elemento é o valor escalar “1”
$\alpha_p^f[k], \alpha_p^b[k]$	k-ésimo coeficiente do modelo auto-regressivo de ordem “p”, respectivamente do modelo de predição linear posterior e anterior
$e_p^f[n], e_p^b[n]$	Erros de predição linear posterior e anterior, respectivamente
\mathbf{X}_p	Matriz de dados $x[1] \dots x[N]$
ρ_p^f, ρ_p^b	Magnitude do erro quadrático de predição linear posterior e anterior, respectivamente

$\mathbf{e}_p^f, \mathbf{e}_p^b$	<i>Vetores erro de predição linear posterior e anterior dos modelos auto-regressivos de coeficientes \mathbf{a}_p^f e \mathbf{a}_p^b, respectivamente.</i>
\mathbf{e}_p	<i>Vetor erro de predição do modelo auto-regressivo de coeficientes \mathbf{a}_p^{fb} resultante da combinação dos modelos posterior e anterior.</i>
\mathbf{J}	<i>Matriz Reflexão</i>
P_{MUSIC}	<i>Estimador frequencial MUSIC</i>
P_{EV}	<i>Estimador frequencial EV</i>

Lista de Abreviaturas

<i>A/D</i>	<i>Analógico-digital</i>
<i>AC</i>	<i>Alternating Current (Corrente Alternada)</i>
<i>AGC</i>	<i>Automatic Gain Control (Controle Automático de Ganho)</i>
<i>AIC</i>	<i>Akaike Information Criterion (Critério de Informação de Akaike)</i>
<i>ALO</i>	<i>At Least Once (Pelo menos uma vez)</i>
<i>ALPR</i>	<i>Automatic License Plate Recognition (Reconhecimento Automático de Placas)</i>
<i>AMO</i>	<i>At Most Once (no máximo uma vez)</i>
<i>AR</i>	<i>Auto-regressivo</i>
<i>ARMA</i>	<i>Auto-regressivo com Média Móvel</i>
<i>BHTRANS</i>	<i>Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte</i>
<i>BPNN</i>	<i>Back-propagation Neural Network (Rede Neuronal tipo Propagação Reversa)</i>
<i>C³MIS</i>	<i>Command, Control, Communications and Management Information Systems</i>
<i>CCD</i>	<i>Charge Coupled Devices (Dispositivos Acoplados por Carga)</i>
<i>CD</i>	<i>Compact Disc (disco compacto de leitura ótica a LASER)</i>
<i>CPU</i>	<i>Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)</i>
<i>CSP</i>	<i>Connections and Signaling Panel (Painel de Conexões e Sinalização)</i>
<i>CSPD</i>	<i>Placa inferior do painel CSP (D = “down”)</i>
<i>CSPU</i>	<i>Placa superior do painel CSP (U = “up”)</i>
<i>CTB</i>	<i>Código de Trânsito Brasileiro</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normatização)</i>
<i>DMA</i>	<i>Direct Memory Access (Acesso Direto à Memória)</i>
<i>DOS</i>	<i>Degree of Symmetry (Grau de simetria)</i>
<i>DRP</i>	<i>Detector Rack Panel (Rack de Detectores)</i>
<i>DTW</i>	<i>Dynamic Time Warping (Deformação Temporal Dinâmica)</i>
<i>EO</i>	<i>Exactly Once (Exatamente uma vez)</i>
<i>EPLD</i>	<i>Erasable Programmable Logic Device (Dispositivo Lógico Programável e Apagável)</i>
<i>ESI</i>	<i>Equally Spaced Interpolation (Interpolação Uniforme)</i>
<i>EV</i>	<i>Eigenvalue (Autovalor)</i>
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)</i>
<i>FHWA</i>	<i>Federal Highway Agency</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)</i>

<i>HSI</i>	<i>Hue-Saturation-Intensity (espaço de cores Tom-Saturação-Intensidade)</i>
<i>I/O</i>	<i>Input-Output (Entrada e Saída)</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
<i>IHM</i>	<i>Interface Homem-Máquina</i>
<i>ILD</i>	<i>Inductive Loop Detector (Detector tipo Laço Indutivo)</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>ITS</i>	<i>Intelligent Transportation Systems (Sistemas de Transporte Inteligentes)</i>
<i>JPL</i>	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
<i>LASER</i>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)</i>
<i>LED</i>	<i>Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)</i>
<i>MCB</i>	<i>Monitoring and Control Board (Placa de Monitoração e Controle)</i>
<i>mcm</i>	<i>Método da Covariância Modificado</i>
<i>MDD</i>	<i>Model-Driven Development (Desenvolvimento Baseado em Modelos)</i>
<i>MDI</i>	<i>Multiple Document Interface (Interface de Múltiplos Documentos)</i>
<i>MUSIC</i>	<i>Multiple Signal Classification (Classificação Múltipla de Sinais)</i>
<i>MVFFV</i>	<i>Medidor de Velocidade e Fluxo Veicular (nome dado ao protótipo construído)</i>
<i>NEMA</i>	<i>The Association of Electrical and Medical Imaging Equipment Manufacturers</i>
<i>NHM</i>	<i>Number of High Magnitude (número de amostras de alta magnitude)</i>
<i>PARAMICS</i>	<i>Parallel Microscopic Simulation (Simulação Microscópica Paralela)</i>
<i>PC</i>	<i>Personal Computer (computador pessoal)</i>
<i>PCA</i>	<i>Principal Component Analysis (Análise por Componentes Principais)</i>
<i>PDF</i>	<i>Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidade)</i>
<i>PHD</i>	<i>Pisarenko Harmonic Decomposition (Decomposição Harmônica de Pisarenko)</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase-locked Loop</i>
<i>PNN</i>	<i>Probabilistic Neural Network (Rede Neuronal Probabilística)</i>
<i>PSD</i>	<i>Power Spectral Density (Densidade Espectral de Potência)</i>
<i>REID</i>	<i>Reidentification (Re-identificação de veículos)</i>
<i>RGB</i>	<i>Red-Green-Blue (triade de cores aditivas básicas Vermelho-Verde-Azul)</i>
<i>RPM</i>	<i>Rotações por Minuto</i>
<i>SNR</i>	<i>Signal to Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)</i>
<i>SOA</i>	<i>Service Oriented Architecture (Arquitetura Orientada a Serviços)</i>
<i>SOM</i>	<i>Self Organizing Maps (Mapas Auto Organizáveis)</i>
<i>SP</i>	<i>Shape Parameter (Parâmetro de Forma)</i>

<i>SPIE</i>	<i>Society for Optical Engineering</i>
<i>STD</i>	<i>Standard Deviation (Desvio Padrão)</i>
<i>TDNN</i>	<i>Time-delay Neural Network (Rede Neuronal por Atraso de Tempo)</i>
<i>TI</i>	<i>Tecnologia da Informação</i>
<i>UML</i>	<i>Unified Modeling Language (Linguagem de Modelagem Unificada)</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)</i>
<i>YC_RC_B</i>	<i>Luminance-Chrominance (espaço de cores Luminância-Crominâncias)</i>

1 Introdução

1.1 Motivação

Este trabalho aborda uma série de aspectos úteis à classificação de veículos, medida de velocidade e re-identificação de veículos em uma via de tráfego usando a tecnologia de detecção de veículos por laços indutivos, acompanhada ou não de imagens dos veículos correspondentes, obtidas de câmeras de vídeo. As informações que podem ser fornecidas por estes sensores são de extrema importância para o planejamento e operação de vias de tráfego tanto em ambiente urbano quanto em grandes áreas de abrangência como rodovias, por exemplo. O estado da arte e da prática em detecção e classificação de veículos utilizando as mais diversas tecnologias é confrontado com a robustez e o baixo custo da tecnologia dos laços indutivos, criada ainda na década de 60. Mais recentemente, a queda no custo das câmeras de vídeo e o incremento na capacidade de processamento dos computadores vieram somar à área inúmeras possibilidades, tornadas viáveis sem perder de vista o custo da solução. Inúmeros esforços foram feitos no passado para extrair informações de ambas as fontes de informação, i.e. laços indutivos e câmeras de vídeo, de forma separada. Cada uma destas abordagens vista de forma separada chegou aparentemente a um limite de acerto na classificação difícil de transpor, a não ser que para isso a barreira de custos seja desconsiderada, inviabilizando soluções comerciais.

Confrontados com esta barreira, mais recentemente os pesquisadores da área iniciaram um esforço de elaboração e teste de ambientes formais de fusão de dados de múltiplos sensores, mostrando resultados muito promissores: os índices de acerto na classificação e re-identificação de veículos em múltiplas estações coletoras sucessivas na via passaram da casa dos 70% para sensores em separado para a casa dos 90% no caso de fusão de sensores.

Outra abordagem igualmente promissora, capaz de imprimir um novo fôlego à utilização de laços indutivos na classificação de veículos, é a utilização de geometrias de laços cada vez menores para captar mais detalhes dos veículos. Esta possibilidade torna-se factível pelo uso de técnicas modernas de processamento digital de sinais para extração em alta resolução dos perfis magnéticos dos veículos, o que motivou a realização deste trabalho.

1.2 Contribuições Científicas e Tecnológicas

Além da extensa discussão sobre o tema e da construção de um protótipo para coleta de dados em campo, as principais contribuições deste trabalho à comunidade científica são listadas a seguir:

- Extração em alta resolução do perfil magnético dos laços indutivos (Seção 3.3) diretamente sobre o sensor, em laços indutivos excitados por detectores convencionais legados existentes no mercado, não necessariamente projetados para extração de perfis magnéticos. Para tanto, foram utilizadas técnicas de alta resolução em frequência baseadas em autovalores e autovetores da matriz de autocorrelação, mais especificamente a *Decomposição Harmônica de Pisarenko – PHD*.
- Discussão qualitativa acerca da contribuição do efeito ferromagnético e de correntes parasitas – ou correntes de Foucault – na formação do perfil magnético, exemplificadas usando estruturas metálicas reais e seus perfis magnéticos coletados em alta resolução usando a técnica proposta acima.
- Aumento da acurácia da medida de velocidade do veículo a partir do par de perfis magnéticos de laços consecutivos na via de tráfego, pela proposição da operação correlação cruzada entre eles (Seção 3.6). Concepção e implementação de um algoritmo modificado para estimação da correlação cruzada, passível de aplicação em sistemas multiplexados com amostragem não-uniforme dos sinais (Seção 6.2), condição esta requerida para operação em paralelo com a maioria dos detectores comerciais disponíveis atualmente. A eficácia do estimador de correlação proposto é constatada experimentalmente, seguida da quantificação do aumento da acurácia na medida de velocidade.
- Construção e implementação, em arquitetura de software orientado a objetos, de um *framework* genérico de delegação de serviços voltado para o desenvolvimento de aplicações *multithread* (Seção 5.1.2 – Mecanismo de Delegação de Serviços). Sua arquitetura inovadora facilita o desenvolvimento e a integração de sistemas de alta complexidade, sob supervisão de um mecanismo de delegação baseado em *templates* e ponteiros para métodos de instâncias genéricas de uma classe. Este *framework* genérico é então instanciado pela primeira vez e validado tendo como aplicação alvo o

software do protótipo coletor de perfis magnéticos usado neste trabalho. Algumas das características deste *framework*, listadas a seguir, constituem contribuições relevantes para a área de engenharia de software e programação genérica:

- O programador consegue ajustar o compromisso eficiência versus rastreabilidade dos serviços executados em ambientes *multithread*, pela escolha do nível de profundidade da publicação e da chamada de serviços. A prática do conceito de celebração de contratos entre as partes via *interfaces* e *ports* é incentivado em todos os níveis do software ao longo do processo de desenvolvimento.
- O aumento da eficiência no despacho de serviços que necessitem de troca de dados complexos é potencializado, pela especialização opcional da classe responsável pelo despacho, pois trata-se de uma classe *template* tipificada pelos próprios tipos dos dados a serem trocados.
- A depuração de erros de programação é antecipada para um momento mais cedo no ciclo de desenvolvimento do software, pois a verificação dos tipos de dados trocados é feita em tempo de compilação, quando os tipos são examinados e usados no estabelecimento da ligação (i.e. *binding*) – com o método a ser executado. As chamadas que fazem a ligação do nome do serviço com o método a ser executado usam templates, para que seus tipos de parâmetros e sua estrutura de passagem sejam verificados em tempo de compilação, mas a escolha do método específico correspondente ao serviço é feita em tempo de execução (i.e. *late binding*).
- Desenvolvimento de um *Proxy* integrado ao mecanismo de delegação (Seção 5.1.3), que possibilita a extensão de seus benefícios além da fronteira de espaço de endereçamento local. A solução implementada permite a construção de arquiteturas orientadas a serviços ou *SOA* – *Service Oriented Architecture* – para desenvolvimento de sistemas distribuídos de tempo real.

A seguir descrevemos como estas contribuições são apresentadas ao longo do presente texto.

1.3 Organização deste Trabalho

Dentro do enfoque de observação do perfil magnético em alta resolução feita em paralelo com detectores comerciais, as diversas contribuições aqui propostas são detalhadas nos capítulos que se seguem e acompanhadas de suas respectivas validações por experimentos reais, depois de vencidas as etapas de construção e teste do protótipo de coleta de sinais de detectores de veículos e de imagens de câmeras de vídeo. Os resultados alcançados são especialmente úteis para extração de características de sensores a laço indutivo para classificação de veículos, soluções estas aplicáveis também ao problema da re-identificação anônima de veículos em múltiplas estações. A organização do trabalho é conforme se segue:

O Capítulo 2 tem o objetivo de situar o leitor quanto aos diversos aspectos técnicos e de aplicação envolvidos na detecção, classificação e re-identificação de veículos. Inicialmente, são apresentadas as diversas tecnologias usadas na detecção de veículos. São introduzidos a seguir conceitos como perfil magnético, configuração dos laços em armadilha de velocidade, detecção não invasiva, fusão de sensores e otimização multi-objetivo lexicográfica, sempre com foco no objetivo final de classificação de veículos.

O Capítulo 3 detalha conceitos de sensores a laço indutivo, como seu princípio de funcionamento e a definição de sensibilidade do laço. A seguir são abordados os aspectos específicos da tecnologia considerados relevantes para a classificação de veículos, como a dependência da sensibilidade com a geometria do sensor, a formação do perfil magnético e a extração de suas características. Ao mesmo tempo, algumas das inovações propostas, referentes ao tema laço indutivo, são detalhadas: a extração em alta resolução do perfil magnético (Seção 3.3) pela Decomposição Harmônica de Pisarenko – cuja descrição matemática formal encontra-se no Apêndice A – e o conceito de medição da velocidade por correlação cruzada (Seção 3.6). A contribuição de cada proposta é situada no contexto das demais soluções atualmente disponíveis.

O equipamento projetado e construído para coleta dos dados reais de veículos em campo tem seu hardware descrito no Capítulo 4.

O Capítulo 5 traz uma descrição sucinta da arquitetura do software – complementado pelo Apêndice B – que traz a descrição de sua interface homem-máquina e pelo Apêndice C, com um exemplo de uso do mecanismo de delegação de serviços. Adicionalmente, este capítulo

traz a descrição dos dois *frameworks* construídos para auxiliar no processo de desenvolvimento e aumentar a flexibilidade da solução final: o *Mecanismo de Delegação de Tarefas* (Seção 5.1.2) e o mecanismo “*Proxy*” (Seção 5.1.3) que quando juntos, possibilitam que uma arquitetura orientada a serviços seja estabelecida e estendida desde o nível interno a um equipamento (mesmo espaço de endereçamento, sistemas *multithread*) até o nível de sistemas distribuídos. Ainda no Capítulo 5, a Seção 5.2 traz a descrição do software para coleta em alta resolução dos sinais nos laços indutivos desenvolvido em paralelo com o software de funcionamento convencional do equipamento.

O Capítulo 6 traz os resultados experimentais alcançados na coleta e processamento de perfis magnéticos em alta resolução. Nele são apresentados o aparato construído para coleta em laboratório de perfis magnéticos reais (Seção 6.1) e os resultados experimentais alcançados (Seção 6.2) – o que inclui na Sub-seção 0 a descrição do algoritmo modificado de estimação da correlação cruzada para sinais com amostragem não uniforme. As conclusões dos experimentos com laços indutivos estão na Seção 6.3.

Por fim, as conclusões finais são colocadas no Capítulo 7, que é seguido dos apêndices. Como já mencionado, o Apêndice A traz uma descrição matemática formal da *Decomposição Harmônica de Pisarenko – PHD* – usada na extração em alta resolução da frequência do sinal nos laços indutivos. O Apêndice B apresenta as formas de interação do operador com o equipamento, isto é, uma descrição das interfaces homem-máquina dos softwares *Servidor* e *Cliente*. O Apêndice C detalha a forma de uso do *framework* que implementa o mecanismo de software usado para delegação de serviços.

2 Detecção e Classificação de Veículos

Existem diversas tecnologias de sensores relevantes para detecção de veículos (FHWA, 1997, [32]). A maioria delas está listada na Tabela 2-1, que traz também uma relação de suas vantagens e desvantagens.. Entre as tecnologias mais importantes podemos citar os detectores por laço indutivo, infravermelho, cabos piezo-elétricos, ultra-som, radar, microondas, pneumáticos, laser e vídeo. No Brasil, os sistemas “fixos” de coleta e monitoração – aqueles em instalação permanente na via de tráfego – utilizam normalmente os cabos piezo-elétricos e os laços indutivos. Cabos piezo-elétricos para tráfego, embora sejam confiáveis na detecção especialmente dos eixos dos veículos, têm custo elevado, sendo mais utilizados para aplicações de peso em movimento em postos de fiscalização. Eles são normalmente combinados com laços indutivos, pois somente detectam o veículo quando a sua roda está sobre o sensor. Neste caso o laço indutivo é instalado como um grande laço preenchendo a região entre os dois cabos piezo-elétricos e se encarrega de detectar a “presença” do veículo, enquanto cabe ao par de cabos piezo-elétricos a contagem de eixos, a determinação da velocidade (Sroka, 2004, [92]) e eventualmente o peso em movimento.

A seguir na Seção 2.1, descrevemos com mais detalhe os aspectos práticos observados no desempenho dos sensores a laço indutivo como percebidos pelos profissionais da área de transportes, introduzindo ainda o conceito de perfil magnético e a configuração de sensores a laço indutivo em *armadilha de velocidade*. Na Seção 2.2 são descritos os esforços de pesquisa realizados para extração de informações de tráfego a partir de um único laço. A Seção 2.3 introduz o problema da classificação de veículos, que evolui rapidamente para o problema mais complexo da re-identificação (ou *REID*) de veículos em múltiplos laços indutivos ao longo da via de tráfego (Seção 2.4). Esforços de implementação de classificadores de veículos usando sistemas não invasivos de diversas tecnologias são apresentados na Seção 2.5. Neste momento evidencia-se o limite alcançado ao empregar-se uma única tecnologia sensora na solução do problema da classificação/*REID*, quando aparecem no cenário os esforços de pesquisa com fusão de diferentes sensores e detectores de veículos, descritos na Seção 2.6. A Seção 2.7 sugere uma metodologia para a fusão dos dados dos sensores: a *otimização multi-objetivo lexicográfica*, uma abordagem seqüencial de se resolver a otimização multi-objetivo, aplicável quando os vários objetivos sob consideração não podem ser quantitativamente comparados um com o outro. Nesta abordagem, cada objetivo é ordenado de acordo com sua

importância, e cada conjunto de soluções da etapa seguinte é um subconjunto da etapa de otimização anterior.

2.1 Laços Indutivos

A mais tradicional das tecnologias de detecção de veículos é sem dúvida por laço indutivo (também conhecido como ILD - “*Inductive Loop Detector*”), que capta mudanças na indutância de uma bobina enterrada quando um veículo (metálico) passa por sobre ela. Muitas vezes são usados em configuração simples (um único laço) para medição de tráfego e operação de trânsito de forma inteligente. Outras vezes pode ser instalado em “*armadilha de velocidade*”¹, configuração esta ilustrada na Figura 2-1. O laço indutivo consiste em: um sensor formado por 3 a 5 voltas de um fio isolado enterrado em um corte raso no pavimento, preenchido posteriormente com uma resina selante; um cabo alimentador da caixa de passagem próxima à localização dos fios sensores até a cabine de eletrônica e a eletrônica propriamente dita.

Os detectores convencionais por laço indutivo, na sua grande maioria, fornecem apenas saídas ambivalentes, ou seja, “*presença*” ou “*ausência*” de veículo. O avanço tecnológico ocorrido desde a introdução dos primeiros laços indutivos em 1960 possibilitou mais recentemente que se pudesse adquirir a forma de onda de variação da indutância ao longo do tempo, ou seja, a “*assinatura*” ou “*perfil magnético*”, do veículo. Isto motivou diversos estudos em busca da extração de informações adicionais dos laços indutivos (Pfannerstill, 1989, [83], Sun et al., 1999, [98], [99], Gajda, 2001, [33], Abdulhai et al., 2003, [1]). Sinais gerados por diferentes classes de veículos sobre o laço diferem em forma, amplitude, parâmetros estatísticos, duração, espectro de frequência, etc.

¹ Configuração “*speed trap*” ou em *armadilha de velocidade*: dois laços indutivos consecutivos próximos, normalmente usados para registro de infrações de trânsito por excesso de velocidade (Figura 2-1).

Tabela 2-1: Vantagens e Desvantagens de Tecnologias Detectoras de Veículos
(relação revista e ampliada pelo autor após Klein, 1997, [53])

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
<i>Ultra-sônico</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tamanho compacto, fácil instalação. 	<ul style="list-style-type: none"> Pode ser sensível à temperatura e turbulência do ar
<i>Microondas Doppler</i>	<ul style="list-style-type: none"> Bom para condições meteorológicas adversas Mede velocidade dos veículos diretamente 	<ul style="list-style-type: none"> Não consegue detectar veículos parados ou com velocidade inferior a 6 km/h
<i>Microondas – presença real</i>	<ul style="list-style-type: none"> Bom para condições meteorológicas adversas Detecta veículos parados Opera com visada lateral da via 	<ul style="list-style-type: none"> Requer uma antena de feixe estreito para confinar área de interesse a uma única faixa no modo de visualização no sentido da via
<i>Infravermelho passivo (somente recebe sinal)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Distância de alcance sob neblina maior do que sensores de imagem na área da luz visível 	<ul style="list-style-type: none"> Degradação potencial por chuva ou neve intensa. Imprecisão na medida de velocidade
<i>Infravermelho ativo (transmite e recebe)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Distância de alcance sob neblina maior do que sensores de imagem na área da luz visível Mede velocidade diretamente 	<ul style="list-style-type: none"> Degradação potencial por substâncias que obscurecem a atmosfera e por condições meteorológicas adversas.
<i>Processadores de imagem e vídeo no espectro de luz visível</i>	<ul style="list-style-type: none"> Provê dados para gerenciamento de tráfego e imagem para gerenciamento de incidentes Uma única câmera e processador podem cuidar de muitas faixas Riqueza de informações sobre tráfego torna-se disponível 	<ul style="list-style-type: none"> Degradação potencial por condições meteorológicas adversas. Veículos grandes podem ocultar veículos menores Sombras, reflexos do chão molhado e transições dia/noite podem resultar em detecções falsas ou perdidas.
<i>Laser pulsado</i>	<ul style="list-style-type: none"> Alta direcionalidade Grande alcance Portátil, normalmente instalado na lateral da via 	<ul style="list-style-type: none"> Custo elevado Degradação potencial por condições meteorológicas adversas. Obstrução por outros veículos
<i>Laser de varredura</i>	<ul style="list-style-type: none"> Excelente classificação dos veículos 	<ul style="list-style-type: none"> Custo elevado Necessidade de ser colocado sobre a via, verticalmente
<i>Fibra ótica</i>	<ul style="list-style-type: none"> Imunidade a adversidades meteorológicas Imunidade a distúrbios eletromagnéticos 	<ul style="list-style-type: none"> Custo elevado Necessita interrupção da via e cortes no pavimento
<i>Acústico passivo</i>	<ul style="list-style-type: none"> Instalação lateral à via Auxilia na classificação 	<ul style="list-style-type: none"> Adequado apenas à detecção de passagem de veículos
<i>Cabos piezo-elétricos</i>	<ul style="list-style-type: none"> Sensível ao peso do veículo, permite peso em movimento. Imune a adversidades meteorológicas 	<ul style="list-style-type: none"> É preciso interromper a via e fazer cortes no pavimento Não permite detecção de presença (a menos que o veículo pare exatamente sobre o sensor)
<i>Pneumático</i>	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo Usado em contagem de veículos para gerenciamento de tráfego 	<ul style="list-style-type: none"> Componentes mecânicos envolvidos: manutenção freqüente. Instalação normalmente provisória.
<i>Microloop (3M)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Cortes no pavimento são mínimos Fácil instalação. 	<ul style="list-style-type: none"> Não permite instalação em latitudes próximas à linha do equador, pois detecta variações no campo magnético da terra.
<i>Laços indutivos (ILD – Inductive Loop Detectors)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo Imune a adversidades meteorológicas Robusto Permite classificação pela assinatura magnética 	<ul style="list-style-type: none"> É preciso interromper a via e fazer cortes no pavimento Instalação permanente

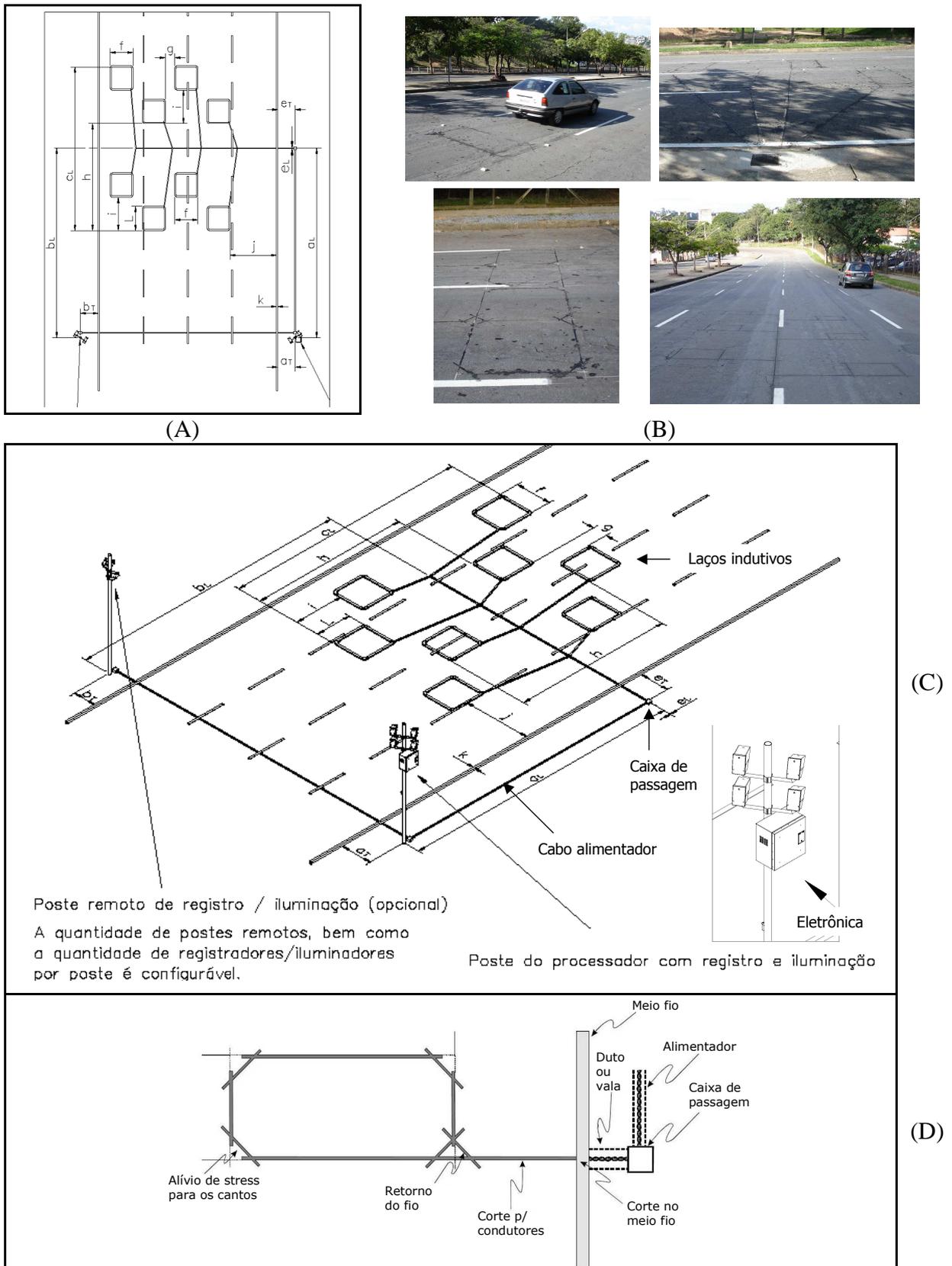


Figura 2-1: Detecção por laço indutivo: (A) Planta baixa dos laços indutivos em configuração “armadilha de velocidade” (B) Fotos de laços de diversos fabricantes. (C) Visão em perspectiva do projeto de instalação do protótipo construído neste trabalho, mostrando laços indutivos, caixa de passagem, cabo alimentador e cabine de eletrônica. (D) Detalhe da confecção do laço indutivo.

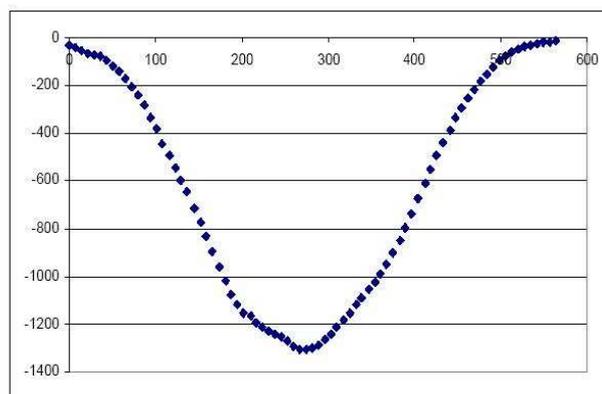
O detector por laço indutivo funciona bem em qualquer condição climática e para qualquer tipo de veículo (Juba, 1996, [46]). Foi relatada acurácia na detecção em níveis acima de 99% (In: Harlow e Peng, 2001, [39])². Mas laços indutivos cometem erros do tipo contar eixos de uma carreta como veículos separados, ou perder a detecção de pequenos veículos com pouca superfície metálica como motocicletas, por exemplo. Os detectores por laço indutivo também tendem a superestimar a contagem em congestionamentos (Avery, 2004, [5]). Além disto, por estarem embutidos no pavimento, estes sensores estão sujeitos a defeitos em vias sob tráfego pesado ou quando a via de tráfego sofre pouca manutenção. Eles também contribuem para diminuir a vida útil do pavimento no ponto onde são instalados, quando não são originalmente previstos no projeto da via. Sob tais condições os laços indutivos apresentam uma taxa de defeito alta e seu reparo é caro, além de requerer a interrupção da via para o tráfego normal. Além disso, uma vez instalado, o laço indutivo não pode ser movido para outras posições onde possa ser mais necessário em virtude de mudanças nas condições de tráfego no longo prazo. Devido a estes problemas operacionais, os órgãos e agências de transportes relatam (Oh et al., 2002, [75]) que em geral os laços indutivos instalados em uma área de grande abrangência geográfica não conseguem ter uma acurácia na contagem de veículos maior do que 90 a 95%. No entanto, os laços indutivos ainda dominam o campo de detecção veicular, nem tanto por sua superioridade tecnológica, mas pelo imenso legado de investimentos realizados até hoje (Abdulhai, 2003, [1]). Isto significa que qualquer avanço conseguido na extração de informação adicional a partir do processamento de sinais de laços indutivos tem enorme impacto financeiro sobre o retorno do investimento já realizado.

2.2 *Informações Providas por um Único Laço*

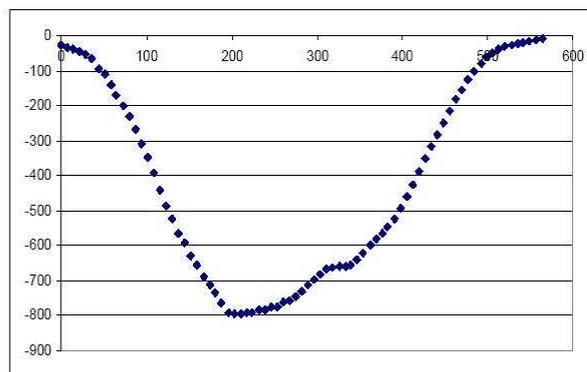
Exemplos de tentativas de extração de informações adicionais, além da simples detecção, são extensivamente encontrados na literatura. Algumas delas buscam a estimação das *variáveis fundamentais de tráfego* como velocidade média da via, comprimento dos veículos, densidade de tráfego, volume, ocupação, fluxo, etc. A variável de tráfego *densidade da via*, por

² Foi feita uma pesquisa com profissionais da área de transportes (In: Harlow et al, 2001 [39]), onde determinou-se que um nível mínimo aceitável de desempenho para um sistema de detecção de veículos é de 99% com não mais do que 3% de taxas de alarmes falsos (falsas detecções quando não há veículos presentes).

exemplo, pode ser estimada a partir de um parâmetro denominado “*ocupação do laço*”, que é a medida do tempo em que um veículo permanece sobre o laço (veja a Figura 2-2). A definição formal do parâmetro “*O*” ou *ocupação* é feita mais adiante na Seção 3.5, onde a Tabela 3-1, traz também a definição de outros parâmetros normalmente extraídos dos perfis magnéticos.



(A) Perfil magnético de um veículo de passeio.



(B) Perfil magnético de uma caminhonete.

Figura 2-2: Perfis magnéticos típicos mostram a variação de indutância do laço ΔL (nH) ao longo do tempo (ms): (A) veículo de passeio; (B) caminhonete (extraído de Oh et al., 2002, [75]). Note as diferenças dos perfis magnéticos em amplitude e forma. Note também que neste exemplo a *ocupação do laço* “*O*” é aproximadamente a mesma para ambos (580 ms).

A velocidade, uma das variáveis fundamentais de tráfego, por exemplo, pode ser interpretada como uma indicação da eficácia do sistema de transporte, pois o seu inverso, uma vez associado a um trecho específico, fornece a variável fundamental “*duração do percurso*” entre dois pontos. O método mais comumente aplicado na obtenção da velocidade do veículo a partir de um único laço utiliza relações como estas entre as variáveis fundamentais de tráfego. Este enfoque foi inicialmente desenvolvido por Athol (1965, [4]) e foi estendido por muitos

outros pesquisadores como Mikhalkin et al. (1972, [68]), Courage et al. (1976, [22]), Hall et al. (1989, [38]), Dailey et al. (1993, [24]), Coifman (1996, [18]), Wang et al. (2000, [102]) e Cherrett et al. (2000, [16]). Em 2001, Jia et al. ([43]) apresentaram um método para extrair uma estimativa do *comprimento efetivo* (conhecido na área de transportes como “*fator g*”, equivalente à *ocupação*) dos veículos em um determinado período de tempo a partir de um único laço indutivo. É claro que dois laços consecutivos podem ser usados em uma configuração de *armadilha de velocidade* para uma medida bem mais acurada de velocidade. Contudo o legado de laços instalados individualmente para contagem de tráfego e controle de semáforos justificou ampla pesquisa sobre medição de velocidade e outras variáveis de tráfego usando-se um único laço.

Em um trabalho mais recente, Oh et al. (2002, [75]) aprimoraram um método apresentado por Sun e Ritchie (1999, [98]) que se baseia em processamento de sinais e regressão linear com resultados iniciais muito promissores. A partir do trabalho original de Sun e Ritchie, que estimava a velocidade a partir de regressão linear feita sobre a *Taxa de Subida* (ou *Slew-Rate*) da onda de perfil magnético³, notou-se uma clara diferença de comportamento para veículos com comprimentos superiores e inferiores a 6 metros. A partir daí, Oh et al. optaram por pré-classificar os veículos com base na sua classe (basicamente relacionada ao comprimento), antes de se aplicar regressão linear, conseguindo com isso resultados melhores. Para pré-classificar os veículos foi utilizada uma rede neural probabilística (“*PNN – Probabilistic Neural Network*”), que é uma implementação em redes neurais do conhecido classificador Bayesiano multivariável, usando estimadores de Parzen para construir as funções densidade de probabilidade (ou “*PDF – Probability Density Functions*”) das diferentes classes [91].

2.3 Classificação de Veículos

Outra aplicação a ser explorada a partir da disponibilidade dos sinais do laço indutivo é a classificação de veículos em categorias previamente definidas. A classificação de veículos é o processo de se reconhecer o tipo do veículo, dadas algumas de suas características, tendo diversas aplicações na área de transportes. Um exemplo é a manutenção das rodovias, que é

³ Para ser mais específico foi usado no trabalho de Sun e Ritchie a *Taxa de Subida Normalizada* ou *SR_N – Normalized Slew Rate*, definida na Tabela 3-1, Seção 3.5).

extremamente relacionada com a monitoração de veículos pesados. Outra aplicação é fornecer subsídios para planejamento de contingenciamento de segurança, pois sabe-se que a severidade dos desastres de trânsito tem um relacionamento direto com o tipo de veículos envolvidos. Análises de impacto ambiental de estradas também se beneficiam das informações estatísticas de classificação de veículos.

Desde a década de 70, muita pesquisa foi feita para classificação de veículos. Podemos citar alguns trabalhos recentes envolvendo exclusivamente sinais provenientes de laços indutivos: Sroka, 2004, [92], Gajda et al., 2001, [33], Oh et al., 2003, [76] e Calixto, 2006, [12]. Um sistema que simula laços indutivos através de processamento de imagem para identificação do tipo de veículo é também apresentado por Lai et al. em 2000 ([61]). Existem diversas formas de classificações de veículos relatadas na literatura e adotadas pelos diferentes órgãos de transporte, que variam dependendo do país ou região e da aplicação. Por exemplo, o órgão de transportes norte americano FHWA – Federal Highway Administration – utiliza a classificação em 13 categorias mostrada na Tabela 2-2. (FHWA, 1997, ou Ritchie et al., 2005, [87], tradução para o português em Calixto, 2006, [12]).

Tabela 2-2: Classificação de veículos segundo FHWA ([12], [32], [87]):

1	Motocicleta
2	Carro de Passeio
3	Outros Veículos de 2 eixos e 4 pneus
4	Ônibus
5	Caminhões de dois eixos e 6 pneus
6	Caminhões de três eixos
7	Caminhões de quatro ou mais eixos
8	Carretas de até quatro eixos
9	Carretas de cinco eixos
10	Carretas de seis ou mais eixos
11	Carretas de mais de um reboque com até cinco eixos
12	Carretas de mais de um reboque com seis eixos
13	Carretas de mais de um reboque com sete eixos ou mais

No trabalho realizado por Calixto, 2006, [12], encontramos um classificador de veículos *Fuzzy* a partir dos sinais de perfil magnético, que utiliza uma forma simplificada de classificação, mostrada na Tabela 2-3.

Tabela 2-3: Classificação de veículos sugerida por Calixto ([12]):

1	Carro
2	Moto
3	Ônibus
4	Caminhões
5	Utilitários
6	Carretas
7	Outros veículos

A Tabela 2-4 traz a classificação conforme o CTB – Código de Trânsito Brasileiro [26]. Em seu artigo 96, o CTB classifica os veículos de três formas: quanto à tração, espécie e categoria. Dentro da classificação “espécie” existe uma sub-classificação na qual encontramos os veículos mais comuns, como veículos de passageiros, carga, mistos e tração.

2.4 Re-identificação de Veículos e Medições de Tráfego por Trecho

Um ramo de pesquisa extremamente ativo no momento, e que pode ser visto como um passo seguinte em aplicações de classificação é a solução do problema da re-identificação de veículos, também conhecida na área pela sua abreviação “*REID*”. Laços indutivos fornecem inerentemente medidas “pontuais” como fluxo, ocupação, velocidade, etc. no local particular onde foi instalado. Medidas por “trecho” são diferentes, pois representam o comportamento do fluxo de veículos ao longo de um comprimento da via, em oposição a medidas pontuais. Historicamente, e devido às limitações tecnológicas da época de início de sua adoção (1960), a base instalada de detectores por laço indutivo convencionais na sua grande maioria fornece apenas saídas ambivalentes, ou seja, “*presença*” ou “*ausência*” de veículo. A disponibilização mais recente da “*assinatura*” ou “*perfil magnético*” do veículo por detectores mais modernos possibilitou diversos estudos em busca da extração de informações adicionais dos laços indutivos (Pfannerstill, 1989, [83], Sun et al., 1999, [98], [99], Gajda, 2001, [33], Abdulhai et al., 2003, [1]). Estes trabalhos demonstraram ser possível usar os laços indutivos para fornecer informações adicionais por “trecho” (e não apenas “pontuais”) como duração de percurso, velocidade média por trecho, densidade de seções de vias,

movimentos relacionados com troca de faixas de rolamento e proporções de demandas parciais origem/destino, diminuindo os erros inerentes à extrapolação dos dados pontuais.

Tabela 2-4: Classificação de veículos segundo o Código de Trânsito Brasileiro ([12]):

Classificação quanto à ...			
I - Tração	II - Espécie		III - Categoria
	Espécie	Sub-classificação	
a) Automotor b) Elétrico c) Propulsão Humana d) Tração Animal e) Reboque ou Semi-Reboque f) Especial g) Coleção	a) Passageiros	1 – Bicicleta 2 – Ciclomotor 3 – Motoneta 4 – Motocicleta 5 – Triciclo 6 – Quadriciclo 7 – Automóvel 8 – Microônibus 9 – Ônibus 10 – Bonde 11 – Reboque ou Semi-Reboque 12 – Charrete	a) Oficial b) Representação Diplomática e afim c) Particular d) Aluguel e) Aprendizagem
	b) Carga	1 – Motoneta 2 – Motocicleta 3 – Triciclo 4 – Quadriciclo 5 – Caminhonete 6 – Caminhão 7 – Reboque ou Semi-Reboque 8 – Carroça 9 – Carro-de-mão	
	c) Misto	1 – Caminhonete 2 – Utilitário 3 – Outros	
	d) Competição		
	e) Tração	1 – Caminhão Trator 2 – Trator de Rodas 3 – Trator de Esteira 4 – Trator Misto	

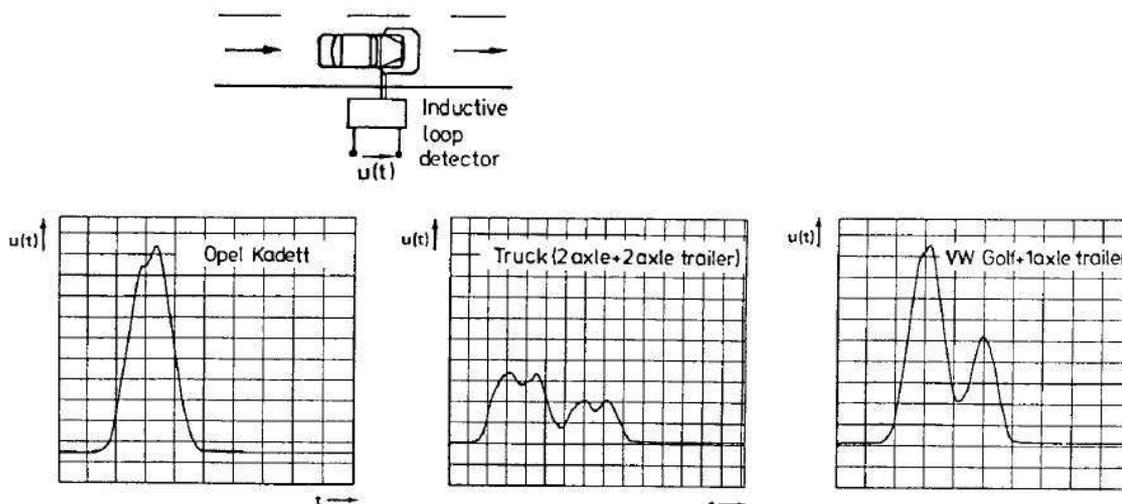


Figura 2-3: Perfis diferentes para veículos diferentes em um laço indutivo usado para detecção veicular (extraído de Pfannerstill, 1989, [83]). Embora o autor não especifique a ordem de grandeza dos eixos, podemos atribuir ao eixo das abscissas o tempo, e ao eixo das ordenadas a frequência, ou contagem de ciclos do sinal oscilatório no laço indutivo, em ordens de grandeza similares à Figura 2-4.

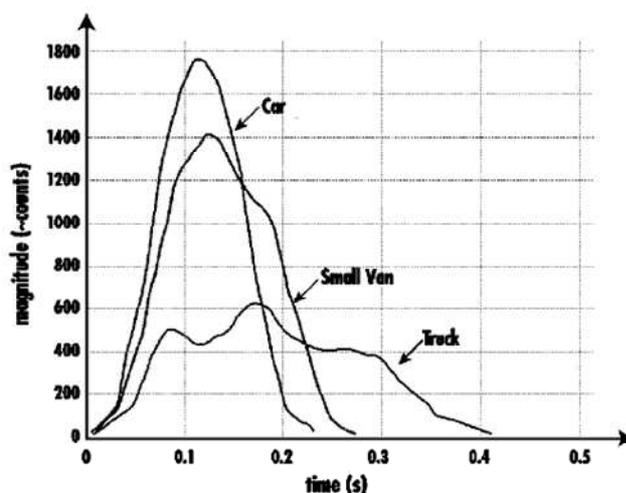


Figura 2-4: Diferença de perfis magnéticos para as diversas classes de veículos (Lai et al., 2000, [61]).

Existem então duas classes de técnicas para se obter medições por trecho. A primeira delas usa informações de medições pontuais como as descritas acima, associadas à modelagem estocástica do fluxo de tráfego. Um exemplo é o trabalho de Dailey (1993, [23]), que usou técnicas de correlação cruzada para medição do tempo de propagação do tráfego. A outra classe de técnicas envolve a re-identificação de veículos ou *REID*. Por sua vez, a *REID* pode ser classificada em *anônima* e *não anônima*.

A *REID não anônima* de veículos é baseada na sua grande maioria em sistemas de reconhecimento da placa dos veículos, na identificação por “tags” – i.e. “transponders” – instalados nos veículos ou por GPS. As principais desvantagens do GPS, embora seja uma valiosa ferramenta de medição de tráfego, são sua baixa penetração na frota existente, acurácia variável e perda de sinal em ambientes urbanos devido a prédios altos, túneis, árvores, etc. Os métodos mais usados atualmente são os “tags” e o reconhecimento automático de placas – *ALPR* – “*Automatic License Plate Recognition*” (Oh e Ritchie, 2003, [76]).

A *REID anônima* pode ser definida neste contexto como a tarefa de se casar um veículo detectado em um determinado local “A” (normalmente a montante do fluxo ou “*upstream*”) com o mesmo veículo detectado em outro local “B” (normalmente a jusante ou “*downstream*”) algum tempo depois, a partir de um conjunto plausível de veículos detectados em “A”, mas sem captação de informações que possibilitem invadir a privacidade do condutor. Por exemplo, um carro de passeio tem normalmente uma assinatura unidimensional que consiste em um pico alto e pontudo, enquanto um caminhão, por causa de sua grande distância da base do chassi ao chão (onde está o laço sensor) e de seu comprimento maior, tem uma forma de onda achatada em seu topo, e com uma duração que é mais que o dobro da observada para o carro (veja ilustração nas Figura 2-3 e Figura 2-4).

Existe uma tendência na sociedade brasileira em tornar obrigatória a instalação nos veículos, de dispositivos que possibilitem sua re-identificação *não* anônima. Esta tendência suscita discussões acerca de aspectos relacionados à invasão de privacidade do cidadão, à qual seus defensores freqüentemente se contrapõem citando os benefícios alcançados com relação ao aspecto segurança, gerenciamento de sistemas de rodízio de tráfego, ou até mesmo praticidade nas praças de pedágio, etc. Contudo a re-identificação anônima continua sendo útil, por exemplo, para ajudar a coibir fraudes neste novo tipo de identificação, ao cruzar dados de classificação obtidos por meios físicos com aqueles obtidos via *transponder* ou *tag* associado a uma consulta a banco de dados.

Embora a captação em alta resolução da assinatura magnética tenha como objetivo primário melhorar a possibilidade de *classificação* de veículos, é relevante a investigação do problema da re-identificação anônima, uma vez que as soluções desenvolvidas para a *REID* são úteis à investigação e solução do problema da classificação, embora ainda não seja observada demanda por *REID* anônima no mercado brasileiro atual.

Alguns esforços focados na re-identificação usando apenas o perfil magnético captado pelos laços indutivos são relatados na literatura. Böhnke e Pfannerstill (1986, [10]) discutiram o uso da Transformada de Karhunen-Loeve na re-identificação de veículos. Kühne et al. (1997, [60]) apresentaram um apanhado dos projetos europeus, que usam laços indutivos de menor comprimento longitudinal, em contraste com os laços indutivos adotados nos Estados Unidos. Pfannerstill, (1989, [83]), introduziu um sistema intitulado MAVE, que extrai características do perfil magnético e usa princípios de reconhecimento de padrões e métodos de correlação para, pela primeira vez, extrair de laços (medidas pontuais) parâmetros por trecho, como duração de percurso e densidade de tráfego. Coifman (1998, [19]) demonstrou que era possível se re-identificar automaticamente veículos baseando-se no casamento de seqüências de comprimentos dos veículos, obtidas a partir de laços em configuração de *armadilha de velocidade*¹. Os dois pontos para re-identificação estavam a 1,6km de distância. Sun et al. (1998, [97]) desenvolveram um processo de extração de características e casamento de padrões e a subsequente obtenção dos parâmetros de trecho. Todas estas técnicas até aqui descritas tratavam não da re-identificação de um único veículo, mas de uma seqüência cronologicamente ordenada de veículos próximos uns dos outros (denominada “platô”), assumindo-se a hipótese de que a mudança de faixa era um evento raro nas vias observadas para as distâncias consideradas quando a velocidade média nas diversas faixas era próxima.

Mais tarde, Sun et al. (1999, [98], [99]) aprimoraram sua abordagem, observando veículos individuais, diferentemente dos trabalhos anteriores. O trabalho de Sun et al. difere também do trabalho desenvolvido por Kühne et al (1997, [60]) relatado acima, no que se refere às dimensões dos laços, tendo sido usadas no primeiro as dimensões comumente adotadas nos Estados Unidos. Eles formularam a re-identificação como um problema de otimização lexicográfica, ou seja, uma formulação multi-objetivo preemptiva, combinando programação por objetivo, classificação e técnicas de análise Bayesianas, estas últimas acrescentadas ao modelo para incorporar conhecimento de bases históricas de tráfego e também para compensar pela aleatoriedade das formas de onda dos veículos. A re-identificação foi dividida em duas atividades principais: extração de características e classificação de veículos. A extração de características se dava em três etapas que transformavam o perfil magnético em uma assinatura normalizada. A classificação dos veículos consistia em um enfoque de otimização lexicográfica com cinco níveis. Para uma distância de 1,9 km entre laços individuais, a taxa de acerto na re-identificação relatada foi de 75% para veículos de

passageiros (carros e peruas) e 78% para veículos de carga (caminhões, caminhonetes, utilitários e carretas).

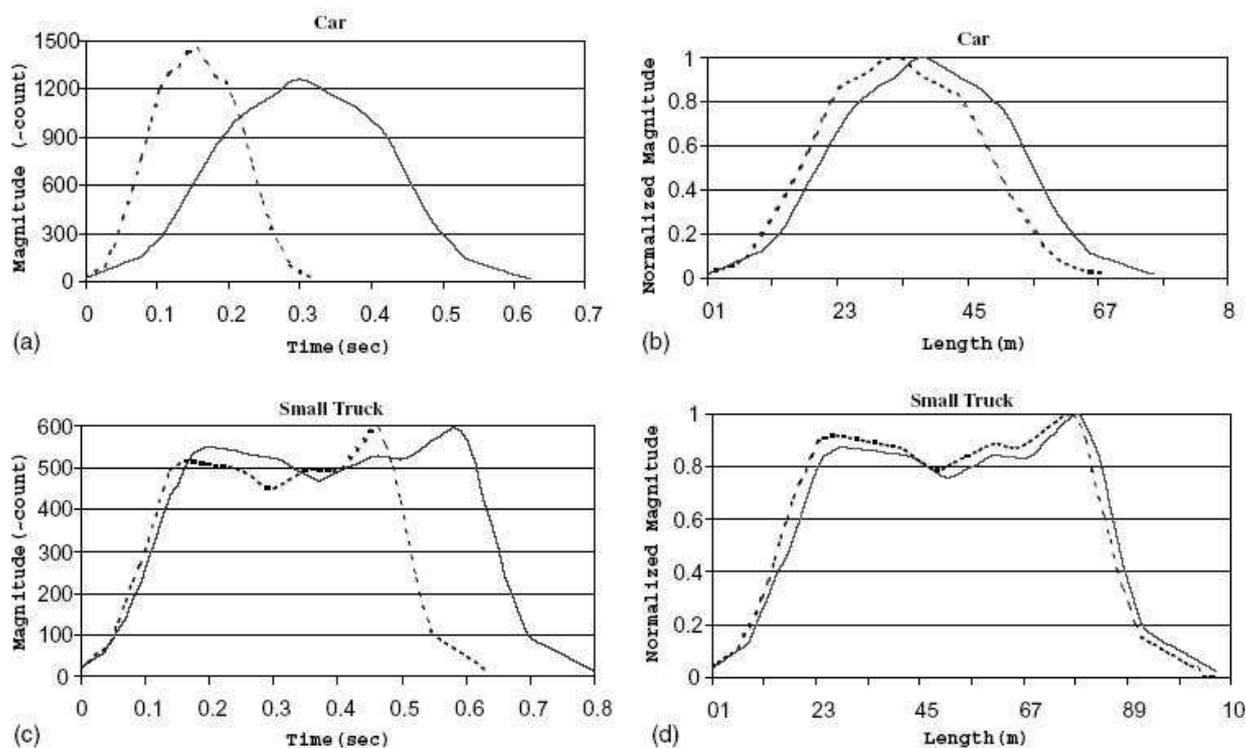
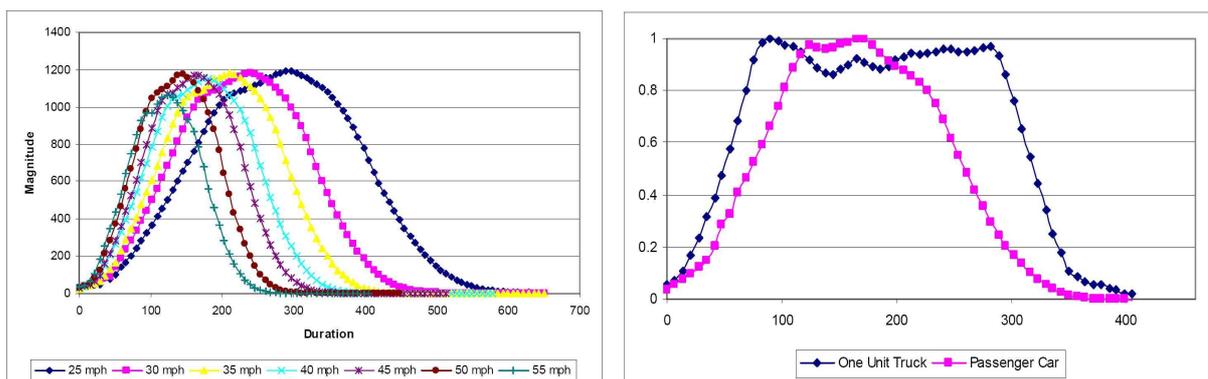


Figura 2-5: Correção de Distorção ou “warping” da assinatura dos veículos. (a, c) – Assinaturas originais e (b, d) – assinaturas normalizadas de um carro e caminhão, respectivamente. As linhas tracejadas e contínuas referem-se a velocidades maiores e menores dos mesmos veículos, respectivamente. Normalização em três etapas: magnitude pelo valor máximo, transformação da escala de tempo em comprimento multiplicando-se pela velocidade, re-amostragem interpolada por *splines* para possibilitar comparações (extraído de Abdulhai, 2003, [1]).

Abdulhai et al. (2003, [1]) estenderam e melhoraram este enfoque, utilizando um novo conjunto de medidas de proximidade de padrões que incluíam medidas estatísticas, medidas baseadas em redes neurais e medidas imunes a distorções ou “warping”⁴ (esta última ilustrada na Figura 2-5 e na Figura 2-6). Das medidas de redes neurais experimentadas (“PNN, TDNN e BPNN – Probabilistic, Time-Delay and Back-Propagation Neural Networks”, respectivamente), a BPNN foi a que apresentou melhor desempenho na

⁴ A idéia de usar o algoritmo DTW – “Dinamic Time Warping” – para aplicação em normalização de assinatura de laços indutivos também foi apresentada por Guoqing et al (2004, [34]). Uma abordagem alternativa ao DTW denominada pelo autor como “diferenciação horizontal” é apresentada por Sun et al., 1998, [97])

classificação, pela sua característica não linear de modelagem de fenômenos. Os resultados foram apresentados por classe de veículos, mas, em resumo, foram alcançados índices de acerto para caminhões tão altos quanto 100%. Os piores índices de acerto ficaram para os automóveis de passeio, tão baixos quanto 25%. Esta diferença se deveu ao fato de o universo de carros de passeio ser muito maior que a quantidade de caminhões na amostra estudada, e principalmente por estes últimos possuírem uma assinatura bem característica.



(A) Mesmo veículo, diferentes velocidades
(ΔL em contagem de ciclos *versus* tempo em ms)

(B) Mesma velocidade, diferentes veículos
(amplitude normalizada, tempo em ms)

Figura 2-6: Ilustração da necessidade de correções de distorção temporal ou "warping" e normalização em amplitude: (A) Mesmo veículo em diferentes velocidades – necessita normalização em tempo; (B) veículos diferentes em mesma velocidade, normalizado em amplitude para comparação (extraído de Oh et al, 2002, [75], [76]).

Oh et al. (2003, [76]), em um estudo voltado para a *REID* em cruzamentos, que é um grau de dificuldade maior do que a *REID* em trechos de vias, utilizou redes SOM – "Self Organizing Maps"⁵ em uma etapa preliminar à classificação para aglutinar ou "clusterizar" os veículos em diferentes categorias ou "grupos". A partir daí aplicaram sobre os grupos pré-

⁵ A rede SOM – "Self Organizing Maps" proposta por Kohonen (2001, [55]), é uma rede neural de duas camadas dentro da categoria das metodologias de aprendizado não supervisionado para "clusterização" e redução dimensional. Uma vantagem da rede SOM sobre outros algoritmos de clusterização é sua habilidade de "visualizar" dados multidimensionais usando uma malha (ou "grade") bidimensional, enquanto preserva similaridade entre dados pontuais tanto quanto possível. As observações são automaticamente organizadas em uma ordem bidimensional com significado perceptível, onde grupos similares estão mais próximos uns dos outros na malha do que grupos dissimilares. Embora a rede SOM identifique um neurônio vencedor baseado nos mesmos métodos empregados pelas técnicas de aprendizado competitivo convencionais, ele difere destas técnicas no sentido de que todos os neurônios em uma região vizinha ao neurônio vencedor também são ajustados (Oh et al., 2003, [76]), ao invés de se ajustar apenas o neurônio vencedor. Após a organização dos mapas, os clusters podem ser nomeados, estabelecendo-se uma correspondência que permite uma interpretação física de sua formação.

categorizados os métodos anteriores já mencionados para classificação, quais sejam, regressão linear sobre o taxa de subida do sinal do laço indutivo, *PNN* e *BPNN* (Sun e Ritchie, 1999, [98], Oh et al., 2002, [75]). Como o enfoque do trabalho de Oh et al. é a obtenção de resultados dentro de um modelo microscópico de simulação de tráfego de veículos (o ambiente de software PARAMICS – “*Parallel Microscopic Simulation*”), os resultados do emprego da rede SOM não são explicitamente relatados no seu trabalho de forma separada, de forma a registrar sua direta contribuição no índice de acerto na classificação.

Em 2004, Oh et al. ([73], [74]) investigaram o problema *REID* em cruzamentos sinalizados utilizando um sistema heterogêneo de laços indutivos, ou seja, com o emprego de duas tecnologias diferentes de sensor para os pontos a montante e a jusante da via. Foi utilizado a montante o laço indutivo convencional de 1,82×1,82m, com período de amostragem em torno de 10 ms, usualmente adotado para coleta de perfis magnéticos a partir dos cartões de detecção de veículos disponíveis no mercado. A jusante, no entanto, tiveram pela primeira vez a oportunidade de testar uma nova tecnologia sensora, denominada *Lâmina Sensora* (instalação provisória para testes ilustrada na Figura 2-7), baseada também no princípio dos laços indutivos, mas com geometria de laço e abordagem de detecção totalmente diferentes. Esta tecnologia tornou-se possível pelos recentes avanços tecnológicos experimentados pelas áreas de eletrônica e processamento digital de sinais. A motivação do desenvolvimento da *lâmina sensora* foi o crescente interesse pela extração de características dos veículos a partir do perfil magnético registrados nos laços indutivos. Para este fim, os laços indutivos de 1,82 × 1,82 metros não são os mais adequados. Sua área relativamente grande tem o efeito de integrar as variações da indutância, mascarando características do veículo, como veremos na Seção 3.4 - Geometria do Laço Indutivo.

O conceito físico embutido na *lâmina sensora* é a utilização de dois circuitos osciladores RLC casados, cujas bobinas de indução estão contidas em uma mesma lâmina sensora a ser embutida no pavimento em um corte de aproximadamente 0,5cm (no caso de instalação permanente). A bobina sensora é orientada na direção da superfície do pavimento, enquanto a bobina de referência é orientada em direção à base do corte. Como a bobina sensora está posicionada mais próxima da base dos veículos, ela responde mais a seus estímulos que a bobina de referência.

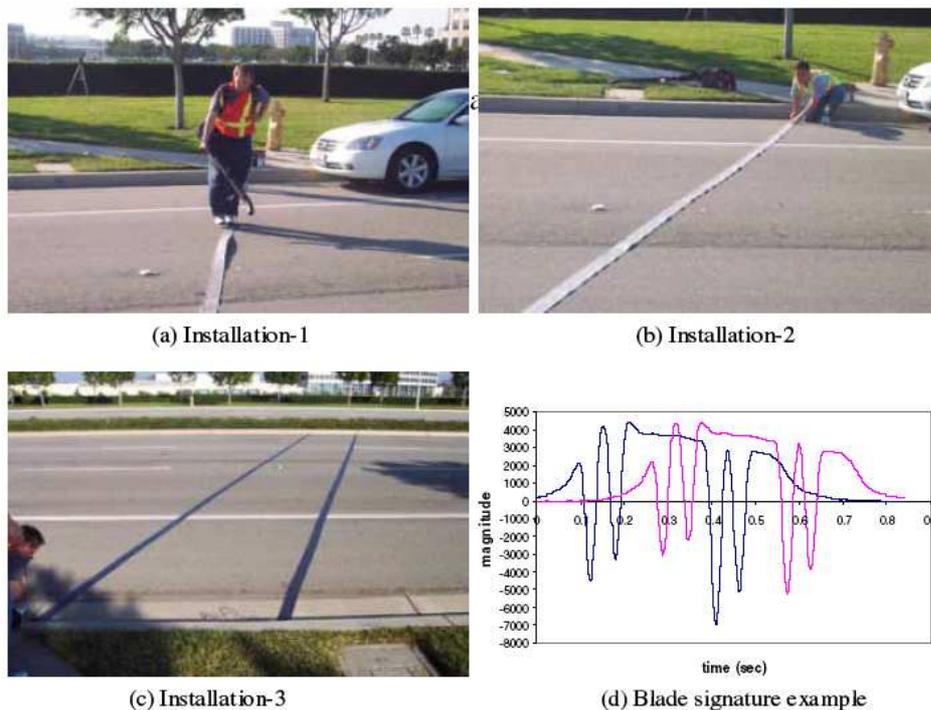


Figura 2-7: Lâmina Sensora e seu perfil magnético ⁶ em instalação provisória (Oh et al., [73], [74]).

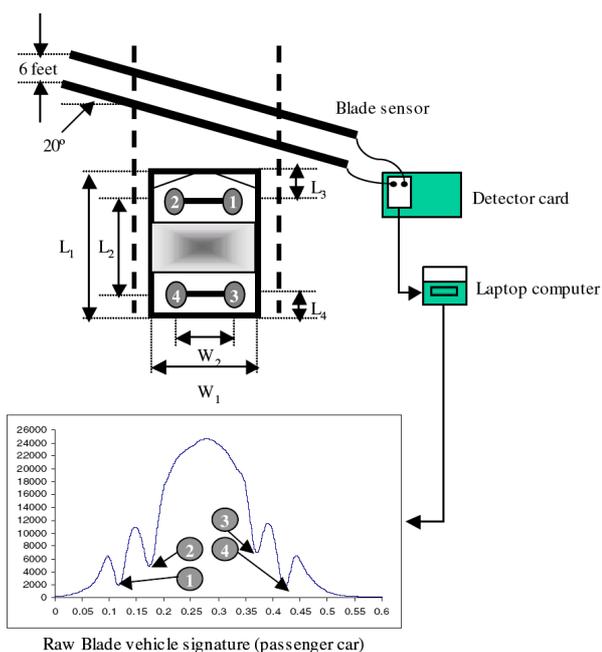


Figura 2-8: Lâmina sensora – disposição na via de tráfego e detalhes do perfil magnético para um veículo de passeio ⁶. O perfil mostrado permite distinguir a região do corpo do veículo – entre pontos 2 e 3 – da região correspondente aos eixos e rodas: entre pontos 1 e 2 e entre pontos 3 e 4 – (extraído de Oh et al. 2004, [73] e [74]).

⁶ Na curvas mostradas as abscissas mostram o tempo em segundos e as ordenadas, a variação de indutância ΔL . Os autores não especificam a ordem de grandeza das ordenadas.

Embora a lâmina sensora seja o primeiro sistema que utiliza a configuração diferencial dos laços em aplicações de tráfego e na aquisição de características adicionais dos veículos a partir de seu perfil magnético, a captação diferencial de sinais em sistemas indutivos baseados em correntes parasitas não é novidade, especialmente na área de ensaios não destrutivos: segundo Buckley [11], em contraposição à configuração absoluta (apenas um enrolamento série) um arranjo de indutores em configuração diferencial (em ponte, por exemplo) propicia maior imunidade a interferências e a variações de temperatura, uma vez que ambos os enrolamentos estarão imersos no mesmo ambiente, submetidos portanto às mesmas condições de distúrbio. A tecnologia de lâmina sensora procura então tirar proveito desta tecnologia propiciando inovação na área de monitoração de tráfego e re-identificação de veículos.

Na configuração apresentada em [73] e [74], a lâmina sensora coleta dados de dois sensores paralelos, inclinados de 20° em relação à direção do fluxo de tráfego como ilustrado na parte inferior Figura 2-8, separados de 1,82 m (6 pés) no sentido longitudinal da via. Esta orientação permite um aumento significativo de informação gerada a partir do sensor, incluindo velocidade, número de eixos e comprimento baseado na distância entre rodas. Os “vales” acentuados mostrados na Figura 2-7-D e Figura 2-8 (pontos 1, 2, 3 e 4) representam as rodas passando sobre a lâmina sensora, como revela em mais detalhe a Figura 2-9.

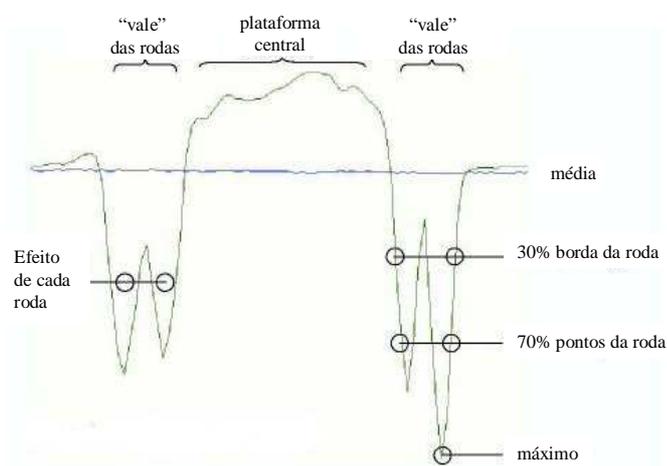
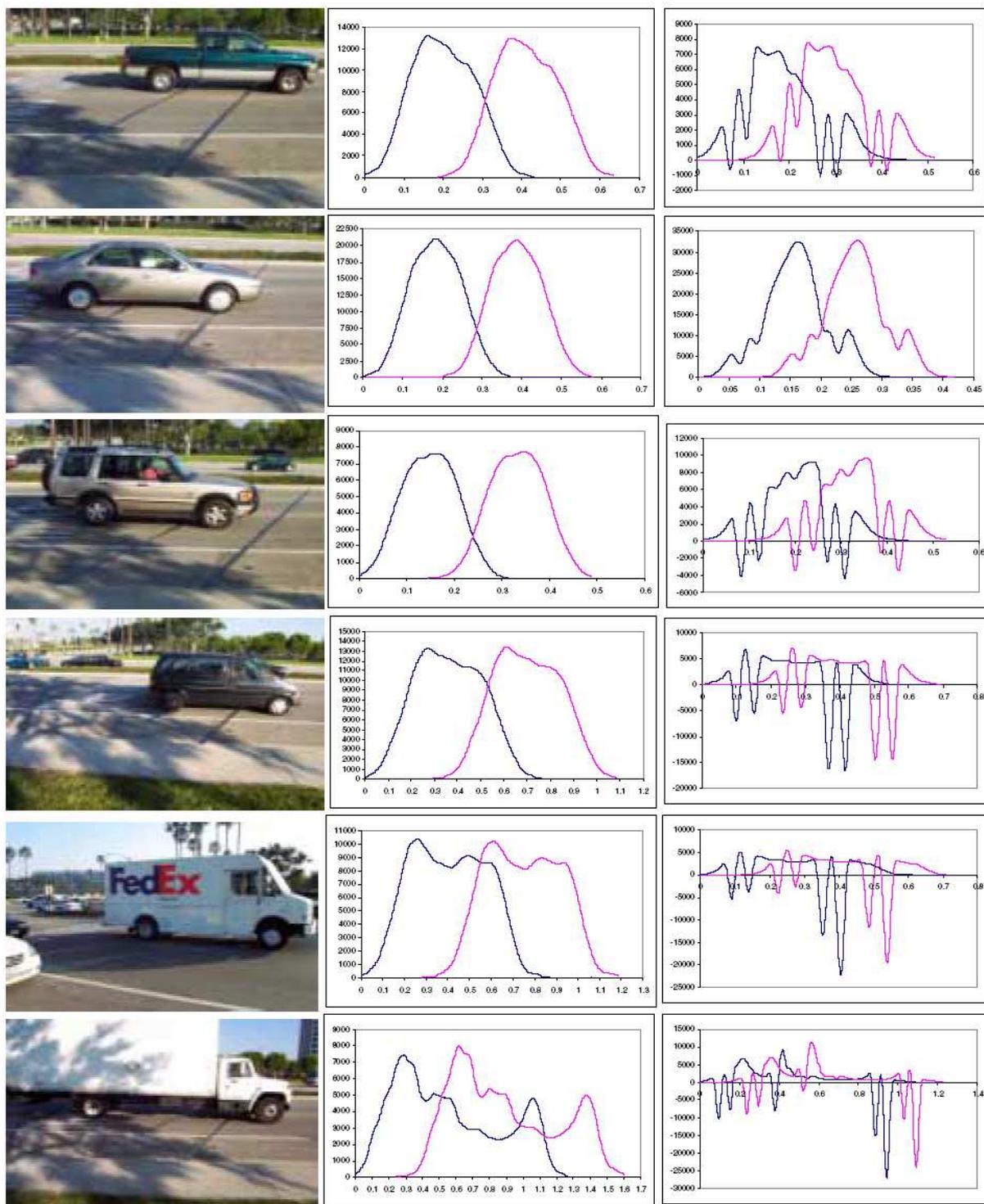


Figura 2-9: Identificação das rodas e do corpo do veículo no perfil gerado pela lâmina sensora (conforme Park et al., 2006, [81]).



(A) Tipo de veículo

(B) Assinatura convencional

(C) Assinatura da lâmina sensora

Figura 2-10: Comparação entre perfis magnéticos ⁶ colhidos de sensores laço indutivo convencionais (1,82x1,82m) e utilizando a lâmina sensora para diferentes tipos de veículos ([73]).

Também é possível visualizar o perfil de composição metálica do veículo, que permite diferenciar a parte relativa ao corpo do veículo (este entre os pontos 2 e 3) da parte relativa aos eixos e rodas (primeiro eixo entre 1 e 2, segundo eixo entre 3 e 4), o que é impossível no caso do laço de dimensões $1,82 \times 1,82$ m, como ilustra a Figura 2-10. Nesta figura é mostrada uma comparação entre os perfis magnéticos colhidos de laços indutivos convencionais e da lâmina sensora para diversos tipos de veículos. A partir da lâmina sensora, um conjunto maior de características pode ser extraído do que aquele usualmente extraído dos laços indutivos convencionais. A extração de características dos sensores a laço indutivo é apresentada em maior detalhe mais adiante na Seção 3.5 - Extração de Características do Perfil Magnético.

2.5 Sistemas Não Invasivos de Detecção de Veículos

As pesquisas atuais em sistemas não invasivos para detecção de veículos têm se concentrado em sistemas e técnicas de processamento relacionadas a imagens de vídeo. Estes sistemas geralmente conseguem detectar veículos e medir sua velocidade em boas condições meteorológicas e de tráfego. Mas eles têm problemas à noite, na transição de luminosidade no entardecer e alvorecer, problemas com sombras de veículos adjacentes, reflexos dos faróis no pavimento molhado ou com o clarão do reflexo do sol no asfalto ao entardecer, neblina, chuva, neve, etc. (Juba, 1997, [47], FHWA, 1997, [32]). Em 2001, Harlow e Peng, ([39]) apresentaram como alternativa à imagem convencional (captura de intensidade luminosa e cor), um sistema não invasivo de imagem⁷ baseado na medida de distância e refletância dos objetos a feixes de LASER, de forma a ficar mais imune às condições ambientais e de iluminação (veja a Figura 2-11). São dois feixes posicionados diretamente sobre a via de tráfego. A taxa de classificação de veículos alcançada para 14 categorias em 2001 foi acima de 92%. Atualmente para este sistema o fabricante⁷ relata uma taxa de acerto na detecção de veículos em 99,98% e taxa de acerto na classificação em 95%. O problema deste sistema, assim como o de todos os sistemas que atualmente usam LASER é seu alto custo. Portanto a

⁷ AUTOSENSE II fabricado pela Schwartz Electro-Optics (<http://www.seo.com>): produz duas linhas de varredura de LASER separadas de 10° , com uma taxa de varredura de 720 linhas por segundo e 30 medidas de distância (pixels) por linha, e uma acurácia em distância de 3 polegadas. Cada valor de "pixel" (intensidade da imagem) equivale à refletância do ponto, ou à distância até o sensor, dependendo do modo de operação escolhido.

pesquisa continua em torno da melhoria de técnicas que visam extrair informações de imagens convencionais, mas que levem a soluções bem mais baratas.

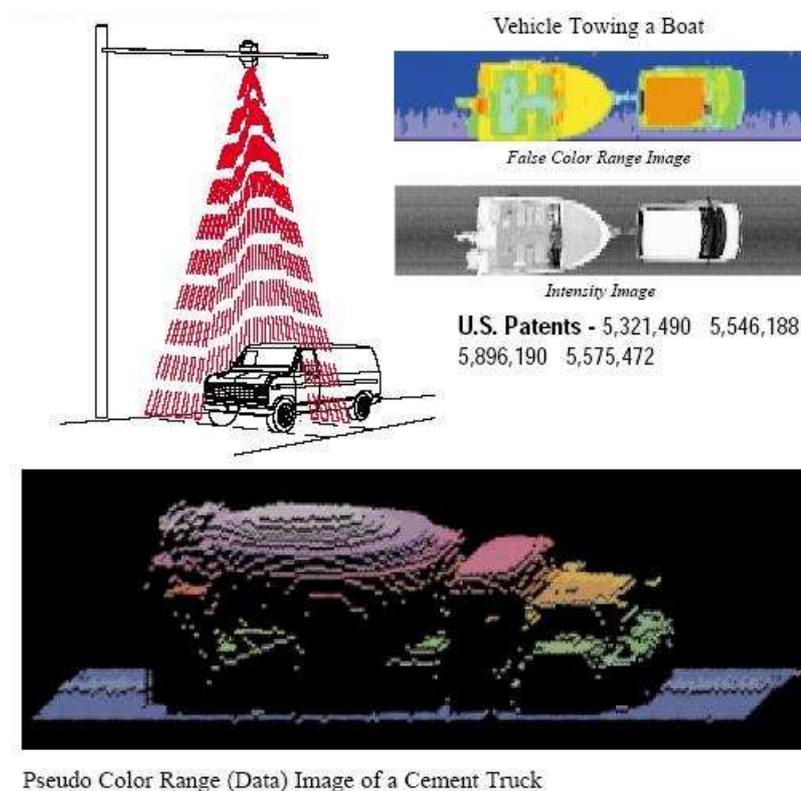


Figura 2-11: AUTONSENSE II (Harlow, 2001, [39]) usa varredura de pulsos LASER: Mede-se a distância ao alvo a partir do atraso de retorno do eco ("False Color Range Image") e a intensidade da onda refletida ou refletância do objeto ("Intensity Image").

Testes extensivos em sistemas não invasivos de detecção de veículos foram conduzidos em [59], [6] e [32] (Kranig, 1998, Bahler, 1998, FHWA, 1997). Foram comparados os sensores infravermelho passivo, magnético passivo⁸, radar, microondas Doppler, passivo acústico, pulso ultra-sônico e vídeo. Temperaturas muito baixas e condições meteorológicas adversas afetaram o desempenho dos detectores passivos acústicos e magnéticos. Sob condições adversas, detectores por vídeo e acústicos passivos contaram apenas 10% dos veículos contados pelos laços indutivos, enquanto os ultra-sônicos, infravermelhos passivo e ativo, microondas Doppler e dispositivos magnéticos contaram apenas 3%. Dispositivos

⁸ Sensores magnéticos passivos: são colocados sob o pavimento e detectam a passagem de veículos pela distorção do campo magnético da Terra. Têm a desvantagem de não funcionar bem em regiões próximas da linha do equador (como é o caso do Brasil), pois nestas regiões o campo magnético da Terra tem suas linhas de fluxo paralelas à superfície.

infravermelhos ativos foram afetados principalmente pela neve, que foi a condição meteorológica que mais afetou o desempenho segundo o estudo [32]. Foi relatado também que as condições de iluminação afetaram bastante os sistemas baseados em vídeo.

Sistemas baseados em vídeo e visão computacional se tiverem seu funcionamento aprimorado por novas tecnologias e algoritmos, podem trazer muitas vantagens por serem não invasivos, além de possibilitar outras aplicações. Eles podem vir a detectar incidentes automaticamente, por exemplo. Os sistemas poderiam limitar automaticamente o acesso de novos veículos a áreas de acidentes, enviar informações aos serviços de resgate, enviar informações de tráfego para os motoristas, além é claro de controlar o tráfego para fluir de forma mais regular. Outra aplicação é a classificação de veículos, que pode melhorar o planejamento de expansão de vias, ajudar na determinação correta da espessura do pavimento e prover medidas relacionadas com o tráfego, como ocupação, densidade e tempo de viagem por trecho.

Para um sistema de processamento de imagens de vídeo ser uma ferramenta eficaz nas aplicações de tráfego, ele deve obedecer a uma série de requisitos ([20]):

1. Segmentação automática de cada veículo a partir da imagem de fundo (“*background*”) de forma que possam ser detectados.
2. Detectar corretamente todos os tipos de veículos encontrados – motocicletas, carros de passageiros, ônibus, caminhões, betoneiras, carretas, etc.
3. Funcionar para grandes variações de condições de tráfego: tráfego com semáforos e tráfego livre (“*freeways*”), congestionamento, diferentes velocidades em diferentes faixas de tráfego, mudança de faixas, etc.
4. Funcionar sob diversas condições de iluminação: ensolarado, nublado, entardecer, alvorecer, noite, chuva, neve, etc.
5. Operar em tempo real.

Embora existam vários sistemas comerciais em operação que se propõem a extrair informações de tráfego por processamento de imagens de vídeo, muitos destes critérios ainda não são satisfeitos.

A maioria dos sistemas disponíveis são sistemas que tentam imitar a operação de laços indutivos, mas não *rastreiam* de fato os veículos. Ou seja, eles não identificam veículos como

alvos únicos para seguir seus movimentos ao longo do tempo, distinguindo-os dos outros veículos⁹. Tipicamente tais sistemas permitem que o usuário delimite regiões de detecção na imagem de vídeo e então o sistema monitora mudanças na intensidade da imagem nestas regiões para sinalizar a presença ou passagem de um veículo. As principais vantagens destes sistemas são o baixo custo computacional, a facilidade de reposicionamento das regiões de detecção e o fato de não haver necessidade de se quebrar o pavimento. Alguns destes sistemas usam um grande número de pequenas regiões para seguir veículos por detecções sucessivas na imagem, mas eles não *rastreiam* o veículo.

Alguns sistemas comerciais realmente rastreiam o veículo¹⁰. Geralmente estes sistemas usam estratégias de rastreamento baseadas em regiões, ou seja, o alvo (incluindo sua sombra) é segmentado pelo seu movimento. Infelizmente, quando um veículo tampa ou “oclui” o outro, dois alvos passam a ser tratados como um único alvo pelo software de rastreamento.

A avaliação feita em [41], [15], [72], [54] e [70] (por Hockadei, 1991, Chatziioanou et. al., 1994, Nihan et al., 1995, Klein e Kelley, 1996, e MNDOT, 1997, respectivamente) dos diversos sistemas de processamento de imagens de vídeo para aplicações em tráfego concluiu que tais sistemas sofrem de diversos problemas quando em congestionamentos, em grande fluxo de veículos, oclusão, vibração das câmeras devido ao vento, transições de iluminação no entardecer e alvorecer e longas sombras ligando veículos adjacentes. A necessidade de sistemas de monitoração de tráfego sob todas as circunstâncias levou a pesquisas mais avançadas de detecção de veículos. Por exemplo, Chao et al. (1996, [14]) desenvolveram um algoritmo baseado em “*wavelets*” para segmentar veículos e diferenciá-los de suas sombras, empregando a seguir redes neurais para classificá-los. Em uma escala maior, o órgão governamental americano Federal Highway Administration – FHWA – patrocinou um grande esforço de pesquisa administrado pelo Jet Propulsion Laboratory – JPL – para obter avanços na tecnologia de detecção de veículos para aplicações em tráfego em áreas abrangentes (Condos, 1996, [21], JPL, 1997, [45]). Cinco sistemas nasceram destas pesquisas, dos quais três a partir de iniciativas comerciais (AUTOSCOPE, CMS Mobilizer e Nestor Traffic

⁹ Exemplos de sistemas que funcionam imitando laços indutivos são: AUTOSCOPE, CCATS, TAS, IMPACTS e TrafficCam ([41], [42], [15], [54] e [70])

¹⁰ Exemplos de sistemas que rastreiam veículos: CMS Mobilizer, Eliop EVA, PEEK VideoTrack, Nestor TrafficVision e Sumitomo IDET ([15], [54], [70], [72]).

Vision^{9,10}) e os demais produzidos em laboratórios de universidades: Autocolor (Chachich et al., 1996, [13], Zeng e Crisman, 1996, [105]), que usa características de cor dos veículos para identificá-los, segmentá-los da imagem de fundo e rastreá-los por sua trajetória em frente ao campo de visão da câmera de vídeo; e Roadwatch (Coifman et al. 1998, [20]), que detecta como características as “bordas” dos veículos, definidas como regiões em uma imagem em tons de cinza nas quais o brilho varia em mais de uma direção. Esta detecção é operacionalizada procurando por regiões na imagem I onde o rank da matriz janelada de segundo momento definida por $\nabla I \cdot \nabla I^T$ é igual a dois (Beymer et al., 1997, [9]). A seguir estas bordas são rastreadas usando um filtro de Kalman (Maybeck, 1979, [67]) para prever a sua posição e velocidade no quadro seguinte.

2.5.1 Considerações Envolvendo as Câmeras

Os parâmetros da câmera do ponto de vista do algoritmo de rastreamento de veículos em geral incluem:

1. Correspondências para mapeamento de projeções na imagem, ou *homografia*.
2. Uma região de entrada do alvo na imagem (geralmente na parte de baixo para câmeras panorâmicas) e uma região de saída (normalmente na parte superior).
3. Múltiplos pontos fiduciais (ou confiáveis) para estabilização da câmera.

Como na sua grande maioria as vias de tráfego são planas, algoritmos de agrupamento geralmente assumem que o movimento do veículo é paralelo ao plano da via. Esta aproximação assume que a distância entre a câmera e os carros é grande o suficiente para considerar a altura do carro desprezível. Para descrever o plano da via, o operador simplesmente especifica quatro ou mais linhas ou pontos de correspondência entre a imagem de vídeo da via de tráfego (i.e. o *plano da imagem*) e um plano do “*mundo real*”, como mostrado na Figura 2-12. Em outras palavras, o operador precisa conhecer a distância relativa entre as coordenadas do mundo real e as coordenadas de pelo menos quatro pontos na imagem visualizada. Ao estabelecer este mapeamento, obtemos a capacidade de incluir no modelo diversas características associadas a restrições físicas que fazem parte do problema, como movimento do veículo (por exemplo, aceleração finita, velocidade máxima, etc.). Adicionalmente, podemos converter distâncias na imagem em distâncias físicas, como posição, velocidade, densidade, etc.

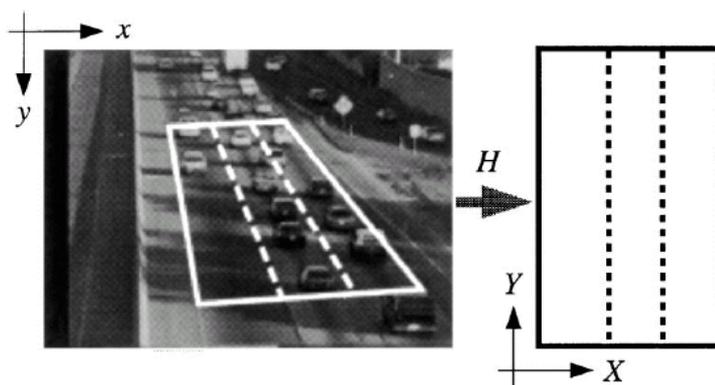


Figura 2-12: Uma transformada de projeção H , ou *homografia* ([20]) é normalmente usada para mapear coordenadas da imagem (x,y) para coordenadas do mundo real (X,Y) .

A situação ideal de mapeamento homográfico envolve a tomada de medidas em campo, mas existem trabalhos (Coifman et. al, 1998, [20]) que tentam extrair esta transformação a partir de cálculos aproximados usando o próprio “*stream*” de vídeo, sabendo a priori a largura das faixas de tráfego e um ou mais veículos viajando a velocidade constante. A velocidade do veículo em diferentes instantes de tempo pode ser usada para medir distâncias relativas ao longo da via. A largura das faixas pode ser usada para extrair distâncias relativas entre dois pontos laterais. Quando medimos as grandezas necessárias ao mapeamento homográfico, dizemos que estamos trabalhando com câmeras “calibradas”. Por outro lado, quando trabalhamos com câmeras não calibradas, estimamos os parâmetros homográficos indiretamente a partir da imagem de vídeo.

A imagem da câmera também precisa ser estabilizada, para resolver problemas como vibração causada pelo vento ou pela passagem de veículos pesados. Para isto, escolhem-se sub-campos da imagem nos quais não se espera que haja movimento. Estes sub-campos são monitorados com precisão em nível de sub-pixel e qualquer movimentação do bloco é usada para corrigir todos os demais elementos da imagem. Os blocos monitorados desta forma são denominados pontos de confiança ou “*fiduciais*” (Coifman et. al, 1998, [20]).

A seleção da câmera também é uma etapa de vital importância para a solução de problemas relacionados à monitoração de tráfego e detecção de veículos. (Juba, 1996, [46] e 1997, [47], FHWA, 1995, [31] e 1997 [32]). Câmeras CCD monocromáticas são mais sensíveis à energia da luz do que as câmeras CCD coloridas. Este é um fator importante ao se adquirir imagens de tráfego durante o entardecer, à noite ou no alvorecer. Para visualizar as vias à noite com iluminação artificial permanente, deve-se casar a resposta espectral da câmera com aquela da

lâmpada utilizada, especialmente quando se deseja usar a cor do veículo como uma de suas características de entrada no processo de classificação. Outro importante aspecto é a adaptação da câmera a diferentes condições de luminosidade. Se escolhermos uma câmera muito sensível para condições de baixa luminosidade, ela tende a ficar “cega”, ao saturar sob condições de alto brilho como em um dia ensolarado. Cenas durante o dia podem ter uma luminância de 10.000 lux, enquanto cenas noturnas de rodovias têm luminância típica de 0,1 lux. Normalmente neste caso, como as transições de luminosidade são lentas, as câmeras incorporam circuito de controle automático de ganho (ou “AGC – *Automatic Gain Control*”) combinado com controles automáticos de velocidade de abertura do obturador ou “*shutter*”. Câmeras com obturadores eletrônicos na faixa de 1/60s a 1/100.000s são facilmente encontradas no mercado.

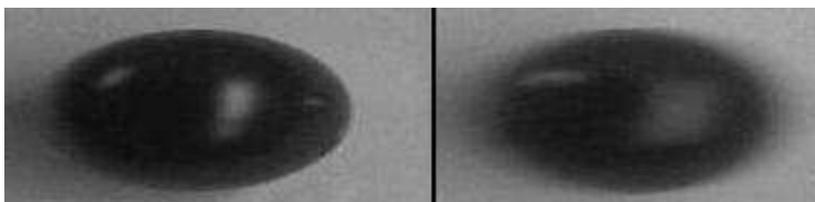


Figura 2-13: Perda de nitidez de objeto em movimento devido ao prolongado tempo de exposição (abertura do obturador por tempo muito longo): o tempo de exposição para a figura à direita é maior do que para a figura à esquerda (extraído de Magalhães et al., 2005, [64]).

A velocidade de abertura do obturador determina o tempo de exposição do elemento sensor de imagem da câmera à cena captada. Como vimos, este recurso pode ser combinado com o AGC em ajustes automáticos pelo circuito da câmera para melhorar sua resposta a condições de iluminação extremas, como é o caso de aplicações de captação de imagens no ambiente externo (ao tempo ou “*outdoor*”). No entanto, nas condições de baixa luminosidade, a tendência do ajuste automático é aumentar o tempo de exposição. O efeito desta exposição prolongada para objetos em movimento (como é o caso dos veículos em uma via de tráfego) é a perda de nitidez. Eles aparecem borrados como ilustra a Figura 2-13. Normalmente para a fotografia de veículos em movimento com nitidez, utiliza-se uma velocidade de abertura do obturador de 1/500s no mínimo (ou exposição de 2 ms no máximo). Uma alternativa, portanto, é fixar o tempo de abertura desejado para o obturador e utilizar lentes auto-íris e o AGC da câmera para fazer a compensação de luminosidade ao longo do dia. Mas sob esta restrição, observamos experimentalmente que mesmo câmeras extremamente sensíveis, com sensibilidade da ordem de 0,003 lux não são capazes de captar imagens com níveis aceitáveis

de contraste e brilho e boa *Relação Sinal-Ruído* (“*SNR – Signal-to-Noise Ratio*”) em ambientes externos à noite, necessitando de iluminação artificial. O aumento da sensibilidade da câmera nem sempre é possível, pois acarreta um aumento considerável no custo do sistema, podendo vir a inviabilizá-lo para uso comercial. Os sistemas de vigilância panorâmica de tráfego atualmente em funcionamento levam em conta o fato de os veículos estarem distantes da imagem e optam por câmeras mais sensíveis, com velocidade do obturador ajustadas automaticamente em função apenas do nível de iluminação, em detrimento da nitidez. Esta decisão leva a uma série de problemas de detecção de veículos nas mais diversas abordagens de rastreamento de veículos por imagens de câmeras de vigilância como as descritas mais adiante na Seção 2.5.2.

Outro fator de especial importância em aplicações “*outdoor*” é a faixa dinâmica da câmera, ou seja, a sua capacidade de distinguir com bom contraste imagens muito claras e muito escuras simultaneamente em uma mesma imagem, sem que uma delas fique saturada (branca) e a outra obscurecida. Um exemplo é a imagem de uma rodovia filmada contra o sol ao entardecer, ou ainda um carro à noite filmado de frente com farol alto e do qual se deseja visualizar o número da placa. Para resolver estes problemas, os avanços recentes incorporam ao projeto das câmeras sensibilidades combinadas linear e logarítmica para faixas de intensidade de luz diferentes. Este aspecto é de fundamental importância para o sucesso da implementação, tendo sido levado em conta na escolha das câmeras para a plataforma de coleta de dados usada neste trabalho, descrita no Capítulo 4.

2.5.2 Estratégias de Rastreamento de Veículos por Imagem

O rastreamento (“*tracking*”) de múltiplos objetos em uma cena tem recebido atenção considerável no campo de visão computacional. Mas a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos não se refere a aplicações associadas a transportes. Da literatura de visão computacional, as diferentes abordagens de rastreamento de veículos em imagens de vídeo podem ser classificadas em quatro grandes grupos: rastreamento baseado em modelos, regiões, contornos ativos e características. Nesta seção fazemos uma breve revisão dos trabalhos que vêm sendo realizados dentro de cada uma destas abordagens com foco na aplicação de rastreamento de veículos, área esta relacionada diretamente com a detecção não invasiva de veículos usando câmeras, e para a qual deixamos preparado o protótipo construído.

2.5.2.1 RASTREAMENTO BASEADO EM MODELOS

Vários grupos de pesquisa já investigaram sistemas de rastreamento de veículos baseados em modelos tridimensionais. Os mais importantes foram os grupos em Karlsruhe (Koller et al. 1993, [58]) e na Universidade de Reading, (Baker & Sullivan, 1992, [7], Sullivan, 1992, [95]), onde os autores utilizaram em seu rastreamento descrições 3-D baseadas em modelos de diversos tipos de veículos, o conhecimento de parâmetros de calibração da câmera e o fato de que os veículos movem-se em um plano. As projeções de tais modelos foram então comparadas com características extraídas das imagens. Em [94] (Sullivan et al., 1995), este enfoque foi estendido de forma a considerar que as características extraídas das imagens agiam como forças no modelo, o que reduziu o número de iterações e melhorou o desempenho. Eles também parametrizaram os modelos como “*templates*” deformáveis e usaram análise por componentes principais (PCA) para reduzir o número de parâmetros. Em [93] (Sullivan et al., 1997), foi desenvolvida uma versão simplificada de rastreamento baseada em modelos usando aproximações ortográficas para alcançar desempenho em tempo real. Mais recentemente, em [40] Hinz, 2003, reduziu o erro na detecção de veículos adotando modelos 3-D de veículos como parte de uma visão “local” para identificá-los em imagens aéreas, fundindo tais modelos com outros de uma visão mais “global” da área observada, onde se buscam filas de automóveis (configuração mais comumente esperada de se encontrar um grupo de automóveis) modeladas como “fitas”.

A ênfase nestes estudos é a recuperação de trajetórias e desenvolvimento de modelos com grande acurácia para um pequeno número de veículos. O maior ponto fraco desta abordagem é que ela se baseia em modelos geométricos detalhados dos objetos. Não é realista esperarmos que seríamos capazes de desenvolver modelos geométricos para todos os veículos que surgem na via de tráfego.

2.5.2.2 RASTREAMENTO BASEADO EM REGIÕES

Neste enfoque, os sistemas de processamento de imagens de vídeo identificam uma região “conectada” na imagem, uma “bolha” associada a cada veículo e a rastreia no tempo usando medidas de correlação cruzada. O procedimento inicia tipicamente com alguma técnica de subtração da imagem de fundo ou “*background*”. Um modelo baseado em filtro adaptativo de Kalman foi usado em [49] por Karmann e Brandt (1990) e em [50] por Kilger (1992) de

forma a permitir que uma estimativa da imagem de fundo se adaptasse à medida que as condições climáticas e a hora do dia alteravam as condições de luminosidade. Objetos no plano de interesse ou “*foreground*”, ou seja, os veículos são detectados subtraindo-se da imagem recém adquirida a imagem de fundo estimada para o momento atual, procurando por pixels que estejam acima de algum limiar de decisão. A partir daí acham-se componentes da imagem conectados entre si.

Este enfoque funciona relativamente bem quando o tráfego está fluindo. Contudo, em condições de tráfego congestionado, alguns veículos podem ocluir outros parcialmente dependendo da posição da câmera, ao invés de se mostrarem como regiões espacialmente separadas na imagem, o que torna a tarefa de segmentação de veículos individuais muito mais difícil. Tais veículos são considerados uma única região e são agrupados em uma grande “bolha” que fará parte do “*foreground*”. Chung-Lin e Wen-Chieh (2004, [17]) adotaram um enfoque baseado em regiões para rastrear e classificar veículos, utilizando restrições denominadas “coerência de forma” e “coerência de caminho” para seguir os veículos quadro a quadro. Para detecção de oclusão e separação de objetos, eles assumem que o veículo é um corpo rígido, o que pode ser uma boa aproximação dependendo da distância da câmera. Contudo, quando a câmera está mais próxima pode não ser uma aproximação apropriada, pois a imagem captada pela câmera não é a de um objeto simples em movimento, mas o resultado deste objeto caminhando em um ambiente exterior sujeito a diversas condições mutáveis climáticas e de iluminação, tanto natural quanto artificial da via e de faróis de veículos adjacentes e contrários, que alteram enormemente o aspecto das características originais (como reflexões, sombras, etc.). Os autores não mencionam problemas relacionados a este aspecto, provavelmente porque a câmera está posicionada bem longe dos objetos. Relatam ter encontrado problemas apenas quando dois veículos próximos estão com velocidade muito parecida ou, devido à pré-definição que fizeram de tamanhos esperados para os veículos de forma a viabilizar a separação de regiões, há problemas quando dois veículos pequenos estão próximos, sendo então considerados como um só.

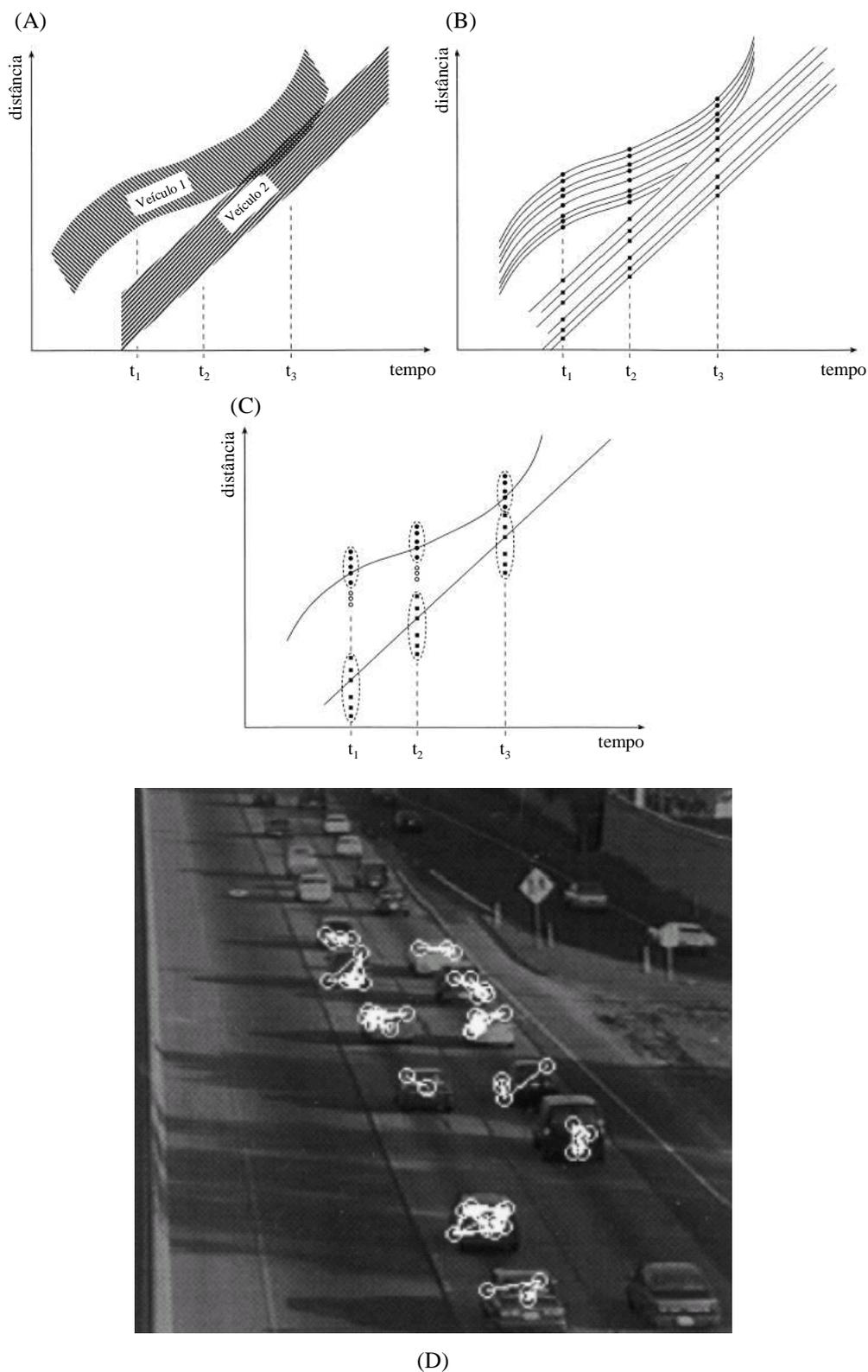


Figura 2-14: Rastreamento por regiões *versus* rastreamento por características (A) Rastreamento por região: no tempo t_3 o veículo 2 ocluiu parcialmente o veículo 1. (B) Rastreamento por características. (C) As características são agrupadas em um conjunto, um rastro é selecionado como sendo representativo da trajetória do veículo. (D) Amostra de imagem com características agrupadas. (Extraído de Coifman et al., 1998, [20]).

2.5.2.3 RASTREAMENTO BASEADO EM CONTORNOS ATIVOS

Uma abordagem similar ao enfoque de busca por regiões é o rastreamento baseado em modelos de contorno ativo ou “snakes” (i.e. cobras). A idéia básica é obter uma representação da fronteira de contorno do objeto e atualizá-la constantemente. O trabalho de Koller et al. em 1994-a, b ([56], [57]), foi baseado neste enfoque. A vantagem de se ter uma representação baseada em contornos de objetos ao invés da representação em regiões é a redução da complexidade computacional. Contudo, a inabilidade para segmentar veículos que estão parcialmente escondidos ou “ocluídos” permanece. Se fosse possível inicializar um contorno separado para cada veículo, o rastreamento seria possível mesmo na presença de oclusão parcial (Koller et al, 1994, [56]). Contudo, a inicialização é a etapa mais difícil do problema (Coifman, 1998, [20]).

2.5.2.4 RASTREAMENTO BASEADO EM CARACTERÍSTICAS

Um enfoque alternativo para o rastreamento abandona a idéia de rastrear objetos como um todo. Ao invés disso, rastreiam-se sub-características como pontos ou linhas discerníveis no objeto. A vantagem deste enfoque é que mesmo na presença de oclusão parcial, algumas das características do objeto em movimento continuam visíveis. Além disso, o mesmo algoritmo pode ser usado para rastrear durante o dia, ao entardecer ou à noite. Ele se auto regula porque, dadas certas condições de iluminação da imagem, o algoritmo seleciona as características mais proeminentes dos objetos sob tais condições. São ressaltadas características como cantos de janelas ou bordas da carroceria refletindo a luz solar de dia, e detalhes dos faróis e lanternas à noite, por exemplo.

Enquanto detectar e rastrear as características de um veículo torna o sistema mais robusto a oclusões parciais, um veículo terá múltiplas características. Isto introduz um novo problema de agrupamento, i. e. qual conjunto de características pertence a um mesmo veículo? Para resolver este problema, Coifman et al. ([20], 1998) usou uma restrição de movimento conjunto: características que são vistas movendo-se rigidamente juntas são agrupadas em um mesmo conjunto, conforme ilustra a Figura 2-14. Podemos visualizar em (A) um exemplo de rastreamento por região: no tempo t_3 o veículo 2 ocluiu parcialmente o veículo 1, o que resulta em uma série de problemas em potencial na fase de segmentação. Já em (B) vemos um exemplo de rastreamento por características, mostradas em três instantes de tempo. Note que

as características individuais são indistinguíveis para o algoritmo rastreador a princípio, mas são mostradas aqui com símbolos diferentes para ilustração. Em (C) as características são agrupadas em um conjunto pela restrição de corpo rígido. Um rastro é selecionado como sendo representativo da trajetória de um veículo. Os círculos vazios representam características que se perderam devido à oclusão, etc., no decorrer da trajetória dos veículos do ponto de entrada até o ponto de saída da imagem, não sendo considerados na determinação final da trajetória. Portanto a consideração de apenas algumas das características obtidas no decorrer da passagem do veículo pela imagem, aquelas que permanecerem por toda a extensão da imagem pertencendo a um mesmo conjunto (veículo), torna mais robusta a determinação de sua unicidade e de sua trajetória, velocidade, manobras, etc. Em (D) vemos um exemplo de imagem rastreada por características dos veículos. No entanto o agrupamento de características tomando como base um corpo rígido, como foi feito por Coifman et al. ([20], 1998), é uma fator complicador e não reflete a realidade do problema, a menos que os veículos estejam bem distantes da câmera. Para veículos próximos, já vimos que as próprias características sofrem modificações devidas a diversos fatores, como alterações de reflexos, iluminação, etc.

2.5.3 Extração de Imagem Estática de Fundo

Na literatura são encontradas basicamente duas técnicas ¹¹ de remoção de imagens estáticas de fundo em aplicações de tráfego (Sun et al., 2004, [100], Ramachandran et. al., 2002, [85], Avery et al., 2004, [5], Chung-Lin e Wen-Chiao, 2004, [17], Gupte et al., 2002, [35], Coifman et al. 1998, [20], Dailey et al., 2000, [25]). A primeira delas obtém um quadro de imagem apenas com a imagem de fundo, de onde os veículos serão subtraídos. Este quadro é então atualizado para corresponder às variações de luminosidade ambiente ao longo do período de observação. Este método é não só caro do ponto de vista computacional, como também pode ser impossível de ser implementado, especialmente em vias com tráfego intenso ou congestionamentos, onde é impossível adquirir imagens sem a presença de veículos.

¹¹ Em [84], Rajagopalan et al. sugerem uma terceira técnica baseada na separação entre imagem de fundo (ou “background”) e imagem de interesse (ou “foreground”) pela sua distribuição estatística de ordem superior, mas o experimento envolve apenas imagens estáticas.

A segunda técnica usa quadros de imagens seqüenciais de vídeo e executa operações diferenças entre estes quadros. Dailey et al. (2000 [23]) implementam uma solução de processamento de imagens baseado em regiões para rastreamento de veículos, na qual utiliza-se uma taxa de quadros de 5 imagens por segundo, considerando que ao tratar imagens espaçadas em períodos muito curtos de tempo (i.e. períodos nos quais os veículos não andam mais do que o equivalente ao comprimento mínimo esperado para um veículo), os veículos podem ser rastreados entre imagens *sem* o uso de técnicas de reconhecimento de padrões¹², utilizando apenas operações diferenças.

2.6 Fusão de Dados de Sensores

A partir da constatação das limitações de se usar apenas laços indutivos na solução do problema de re-identificação (classificação insatisfatória, em torno de 60% a 70% em média, (Sroka, 2004, [92]) e devido à grande variação nos índices de acerto na re-identificação de veículos em diferentes classes, a busca por um melhor desempenho levou os diversos pesquisadores na área de classificação de veículos e *REID* a focar em técnicas de fusão de informações obtidas de diferentes tecnologias de sensoriamento em um mesmo ambiente de processamento ou “*framework*” (Sun et al. 2004, [100], Ritchie et al., 2005, [87]). Já há mais de uma década são intensivamente pesquisadas e desenvolvidas técnicas de conexão de métodos e algoritmos por “*fusão de dados*” (Waltz e Llinas, 1990, [101], Hall, 1992, [36], Hall, 1997, [37], Klein, 1999, [51] e 2004, [52], Kadar (Ed.), 2005, [48]). Sob esta ótica, desenvolve-se um ambiente formal que inclui teorias, técnicas e ferramentas, manipuladas para unir dados de entrada derivados de uma ou mais fontes (sensores, bases de dados, conhecimento humano, etc.). O propósito de tal esforço é obter informações ou tomar decisões justificadas, melhor embasadas tanto no sentido quantitativo quanto qualitativo, assim como fazer uso da sinergia contida nos dados medidos de forma a obter informações mais completas ou mesmo novas informações, impossíveis de serem obtidas por outros

¹² A teoria de reconhecimento de padrões refere-se a um modelo de decisão baseado em estatística, onde entidades (objetos) são caracterizadas por um vetor de características que é estimado diretamente da imagem de entrada, referindo-se no caso a propriedades bem definidas. Cada entidade é considerada um “cluster” convexo no espaço multidimensional de características que pode ser discriminado de outras entidades pela aplicação de ferramentas bem conhecidas (classificadores) da teoria estatística (Paragios, 2000, [80]).

métodos ou por fontes isoladas. É possível aplicar simultaneamente muitos algoritmos conhecidos de conexão de dados, como redes neurais artificiais, métodos relacionados à lógica *fuzzy*, clusterização, lógica votante, estatística Bayesiana, métodos hierárquicos, etc. Entre as organizações que fomentam pesquisas na área de fusão de dados de múltiplos sensores estão o “*Institute of Electric and Electronic Engineers*” (IEEE), “*The International Society for Optical Engineering*” (SPIE), “*Military Operations Research Society*” (MORS) e sociedades com uma divisão na *C³MIS* (“*Command, Control, Communications, and Management Information Systems*”) dos Estados Unidos.

Sroka et al. (2004, [92]) apresentam a forma de construção e a comparação de cinco diferentes métodos de fusão de características (denominadas funções “*And*”, “*Or*”, “*Power*”, “*Produto*” e “*ponderada*”) extraídas dos sinais de dois tipos de sensores de veículos: laços indutivos e cabos piezo-elétricos¹³. Os sensores piezo-elétricos proporcionam a medida de velocidade, quantidade de eixos e distância entre eixos sucessivos. O laço indutivo acusa a presença de um mesmo veículo (podendo-se associar vários eixos a ele posteriormente) e fornece o perfil magnético. Os parâmetros extraídos do perfil magnético são: valor médio, desvio padrão, valor quadrático médio, valor máximo, uma função “*saltus*” não especificada, e momentos de 3^a ordem. Os modelos de classes de veículos adotados baseiam-se em medidas *fuzzy* com formas triangular e gaussiana, cujos parâmetros são obtidos estatisticamente. Os resultados de processamento isolado dos sensores levam a classificações insatisfatórias, em torno de 60% a 70% ([92]). Já com a fusão de dados de apenas estes dois tipos de sensores, os resultados passam a variar entre 92% e 95%, observados para formas gaussianas e fusão simples (função “*And*”) sob as mesmas circunstâncias experimentais.

O mesmo grupo de Sun et al. já mencionado anteriormente, a partir de dados coletados em 30 de junho de 1998 em Irvine, Califórnia, expandiu em 2002 seu trabalho anterior (que considerava apenas os laços indutivos) sobre re-identificação de veículos individuais ([98], [99]), incorporando ao algoritmo informações valiosas sobre o fluxo de tráfego (Ramachandran et al., 2002, [85]), conseguindo com isso uma melhoria na acurácia do processo, a partir de dois pontos em configuração *armadilha de velocidade*, separados de 130

¹³ Esta configuração é comumente encontrada na prática: um grande laço preenchendo a região entre os dois cabos piezo-elétricos transversais à via, como já descrito no início deste capítulo. Em algumas aplicações também são utilizadas fibras óticas em substituição aos cabos piezo-elétricos nesta mesma configuração.

metros. Foram usadas quatro diferentes características a partir dos dois pontos de re-identificação: a velocidade dos veículos, o vetor de perfil magnético captado pelos laços indutivos, a cor dos veículos captada por câmeras de vigilância (quantificado em 5 níveis, i. e. $5^3 = 125$ tríades¹⁴ *RGB*) e o tempo de travessia entre os pontos de re-identificação. Também foi considerado um novo enfoque mais geral no tratamento de platôs, com a quantidade de veículos no platô variando de *um único veículo* para tráfego livre até a situação limite de *todos os veículos* do trecho em tráfego extremamente congestionado. Foi determinado experimentalmente que o melhor tamanho de platôs é o de três veículos. E mesmo no processamento do platô de múltiplos veículos, torna-se possível extrair a re-identificação individual por veículo com maior acurácia. O trabalho foi feito com pontos de re-identificação relativamente próximos (130 metros) e considerou apenas uma faixa de tráfego, pois investigava a viabilidade de usar reconhecimento de padrões em uma configuração mais simples, em torno da qual cenários mais complexos poderiam ser construídos. A fusão de dados das quatro modalidades de informação levou a índices de acerto de 91%. Contudo, neste experimento os pesos ideais atribuídos a cada fonte para efetuar a fusão foram estimados sem aplicação de técnicas de otimização mais elaboradas, mas sim efetuando-se a variação de cada um dos pesos em passos infinitesimais e combinando-os exaustivamente, pinçando-se o conjunto de pesos com o melhor resultado final sobre a base de dados disponível. Este trabalho foi estendido sobre o mesmo conjunto de dados em Sun et al. (2004, [100]), onde se utilizou a técnica “*linear opinion pool*” normalmente usada em solução de problemas de reconhecimento de locutor (Soong, 1998, [90]) para combinar os pesos na fusão dos sensores. Nesta técnica os coeficientes dos pesos são determinados varrendo-se uma malha n-dimensional de números reais e achando-se a combinação ótima entre eles que resulte no melhor desempenho nos dados de treinamento. Arr et al. (2004, [3]) incorporou transformadas *wavelet*¹⁵ sobre os sinais de perfil magnético, mostrando que alguns componentes de freqüência dos sinais dos laços têm mais relevância do que outros na

¹⁴ Outros espaços de descrição de cores como *HSI* (“*Hue, Saturation, Intensity*”) ou $YCrCb$ (que separa a crominância da luminância [89]) não são investigados no trabalho citado, sendo considerada pelos autores a possibilidade de serem mais robustos e menos sensíveis a alterações observadas em aplicações “outdoor”.

¹⁵ O experimento envolveu a análise de diferentes wavelets com variação no número de momentos evanescentes ou “*vanishing moments*” e vários níveis de decomposição para determinar qual deles resultaria na melhor acurácia na ausência de fusão com as demais características. As wavelets *Daubechies*, *Coiflet* e *Symlets* foram investigadas com o número de “*vanishing moments*” variando de 1 a 8 e o número de decomposições variando de 2 a 20. Concluiu-se que a wavelet *Daubechies* com 1 “*vanishing moment*” e 8 níveis de decomposição mostrou os melhores resultados. Esta é a wavelet de *Haar* (Addison, 2002, [2]).

classificação, além de reduzir a dimensão do vetor de características e aumentar o índice de acerto para 92,92% sob as mesmas condições experimentais e mesma base de dados coletada em Irvine em 1998.

Como vimos, características como cor do veículo captada pela câmera e número de eixos contados por cabos piezo-elétricos, colocados em conjunto com as informações providas pelos laços indutivos e informações estatísticas de tráfego, aumentaram significativamente a taxa de acerto da classificação e re-identificação. A este arsenal de técnicas, criamos a possibilidade de disponibilizar um volume adicional de informações, a partir da análise em alta resolução dos perfis magnéticos. Possibilitamos assim a construção de laços indutivos com geometrias mais curtas, proporcionando maior detalhamento acerca dos veículos. Com isso esperamos um aumento das taxas de acerto na classificação, tanto para aplicações que usem exclusivamente laços indutivos, quanto em aplicações que envolvam fusão de sensores.

2.7 Otimização Multi-Objetivo Lexicográfica

Na investigação de possíveis alternativas de fusão de sensores, mostra-se mais promissora a otimização lexicográfica apresentada por Sun et al. em 1999 ([99]), que no trabalho citado foi formalizada para a solução do problema da *REID*, usando apenas dados de sensores a laço indutivo em dois pontos da via. Esta abordagem foi desde então adaptada por inúmeros autores de trabalhos na área de *REID*. A otimização lexicográfica apresentada por Sun et al. é uma formulação preemptiva multi-objetivo hierarquizada, que combina *programação por objetivo* (ou “*goal programming*”), *classificação, média ponderada* (ou “*weighted average*”) e *técnicas de análise Bayesiana*.

Como veremos na Seção 3.5, as formas de onda dos laços indutivos com geometria mais comumente encontrada contêm uma grande variedade de informações (veja a Tabela 3-1), incluindo magnitude máxima da variação de indutância, comprimento, forma da superfície metálica da plataforma do veículo, número de eixos, etc. Cada informação embutida no perfil magnético pode ser extraída e colocada sob a forma de vetores de características. Adicionalmente, outras características inerentes à aplicação em uma via de tráfego real, como velocidade, ocupação, faixa de tráfego, hora do dia, etc., podem ser coletados e associados às formas de onda de perfil magnético em um banco de dados mais abrangente.

A escolha natural, portanto, para uma futura abordagem de fusão de sensores recai na otimização multi-objetivo¹⁶ lexicográfica¹⁷. Note que embora o objetivo geral seja a atribuição de um determinado veículo a uma classe previamente definida, a atribuição a determinadas classes intermediárias pode ser considerado um objetivo por si só, e muitas vezes até desejável. Por exemplo, a classificação de veículos por número de eixos é útil por si só em pontos de pedágio. Portanto, classificar por *número de eixos* é um objetivo e classificar por *velocidade* é outro objetivo. Ao perseguirmos a abordagem multi-objetivo, que combina estes múltiplos objetivos individuais, passa a existir a necessidade de se determinar a relevância e a hierarquização de cada um. Um veículo com 5 eixos, por exemplo, com certeza não pertencerá à classe de veículos de passeio, o que coloca a contagem de eixos, quando disponível, no topo da hierarquia de decisão quanto à classificação. Daí a adequação da abordagem lexicográfica, que é um método seqüencial de otimização multi-objetivo, no qual cada conjunto da etapa seguinte é na realidade um subconjunto da etapa de classificação anterior, restringindo o espaço de soluções do nível hierárquico corrente. Mais importante do que isso, espera-se que cada nível forneça como resultado um conjunto de múltiplas soluções para implementação do esquema hierárquico. Este procedimento resulta naturalmente nas várias modalidades de classificação usualmente almejadas pelos profissionais de tráfego. O processo continua até que todos os níveis de classificação estabelecidos tenham sido considerados.

O termo *otimização* normalmente está relacionado com a minimização, escolhido um objetivo específico, de distâncias entre pares de vetores de características. Note que isto é equivalente a escolher alguma característica como *critério*, podendo esta otimização ser, portanto, chamada também de abordagem *multi-critério*. Para algumas características do veículo, a redução do espaço de soluções possíveis é feita por satisfação de critérios ao invés de

¹⁶ Qualitativamente, a otimização multi-objetivo é a busca por pontos ótimos x^* dentro de um conjunto plausível de dados x que são “os melhores possíveis de se obter” quando julgados perante múltiplos critérios (Rentmeesters, 1998, citado por Sun et al.,1999 em [99]). As soluções ótimas para problemas multi-objetivo são denominadas Conjunto de Pareto, que contém todos os pontos para os quais não existe qualquer outro ponto que seria uniformemente melhor em todos os objetivos. Um conjunto de Pareto é conhecido como a *fronteira de eficiência* e os pontos pertencentes a este conjunto são os *pontos eficientes*.

¹⁷ O método lexicográfico é uma abordagem seqüencial de se resolver a otimização multi-objetivo, aplicável quando os vários objetivos sob consideração não podem ser quantitativamente comparados um com o outro (Rentmeesters et al, 1996, citado por Sun et al.,1999 em [99]). Nesta abordagem, cada objetivo é ordenado de acordo com sua importância, e cada conjunto de soluções da etapa seguinte é um sub-conjunto da etapa de otimização anterior.

envolver minimização de funções objetivo. Felizmente isto é verdade especialmente para etapas que naturalmente se posicionam em níveis hierárquicos superiores, como a classificação por contagem de eixos ou por comprimento do veículo, por exemplo.

Um conceito usado na área de otimização é o de *programação lexicográfica por meta*. Na definição mais geral, *programação por meta* (ou “*goal programming*”) é o estabelecimento de graus de alcance para cada critério (em outras palavras, condições de parada). Os métodos de programação por meta conhecidos lidam com o estabelecimento de *alvos* ou valores para cada objetivo e buscam a minimização de uma função objetivo maior, formada pela soma de desvios em relação aos alvos de todos os objetivos individuais. Uma *meta* (ou *conjunto de alvos*) pode ser usada para restringir o espaço de soluções. A introdução de metas visando à restrição do espaço de soluções de forma hierarquizada é exatamente a definição do conceito de *programação lexicográfica por meta*.

Devido à natureza completamente diferente entre as diversas grandezas mapeadas na forma de características, a otimização multi-objetivo lexicográfica desponta como meio mais natural de proceder à fusão de dados. Sua forma de distribuição hierárquica dos resultados vem a ser extremamente útil, pois se molda naturalmente a diversos objetivos específicos de classificação. Esta abordagem, aliada aos avanços constatados e demonstrados, constitui ponto de partida para, em conjunto com o protótipo construído, coletar e trabalhar sobre dados de veículos reais, em atividades subsequentes de campo.

SÍNTESE

Ao longo deste capítulo, ao nos inteirmos do estado da arte na pesquisa para classificação de veículos, tomamos consciência da sua importância para a área de transportes. Das diversas tecnologias citadas, concentramos no laço indutivo e possibilitamos, na concepção do protótipo construído, a possibilidade de realizar trabalhos posteriores envolvendo o processamento concomitante de imagens adquiridas por câmeras de vídeo. Embora o presente trabalho não envolva fusão de dados de sensores, consideramos este um caminho natural na evolução da técnica. Abordamos, portanto, o estado da técnica quanto à fusão multi-objetivo lexicográfica das informações providas por ambos os sensores, i.e., laços indutivos e câmeras de vídeo, por considerá-la promissora. No próximo capítulo, iremos explorar em maior detalhe os desafios postos diante de nós pela tecnologia de laço indutivo.

3 Aspectos Tecnológicos – Laços Indutivos

No capítulo anterior, posicionamos o estado da arte e da prática tanto em centros de pesquisas quanto em soluções comerciais para resolver problemas de classificação de veículos. Vimos que tecnologias como imageamento por laser e detecção veicular por cabos piezo-elétricos, dentre as muitas tecnologias citadas na Tabela 2-1, são bem eficientes quando empregados em classificação de veículos, mas seu custo é muito alto.

Constatamos que o legado de investimentos já realizados ao redor de todo o mundo em laços indutivos é digno de nota, não podendo ser desprezado. É inegável o impacto econômico de soluções que utilizem tal base instalada. Alie-se a este fato o baixo custo de confecção dos laços e sua robustez, características essas adequadas a aplicações no cenário brasileiro e temos o laço indutivo como o sensor escolhido para estudo. Este capítulo traz a descrição daqueles aspectos relacionados a esta tecnologia considerados relevantes à classificação de veículos, bem como apresenta e contextualiza algumas das inovações propostas, quais sejam: a extração dos perfis magnéticos em alta resolução e a medição de velocidade por correlação cruzada.

Por outro lado, as soluções de visão computacional a partir de câmeras de vigilância de trânsito são também fontes de informação de classificação de baixo custo. No entanto, muito do esforço de pesquisa observado no passado e constatado pela consulta à bibliografia especializada visa contornar problemas que aparecem simplesmente porque se tenta aproveitar estas câmeras de vigilância, que em sua maioria não foram originalmente especificadas nem instaladas com o propósito de propiciar a aplicação de algoritmos de visão computacional.

O emprego de algoritmos de visão computacional para classificação de veículos tem se mostrado uma tendência firme, e como vimos anteriormente, vem proporcionando ganhos consideráveis nos índices de acerto da classificação, especialmente quando as câmeras são combinadas com laços indutivos em ambientes de fusão de sensores. Portanto, desde o início o protótipo do equipamento foi especificado e construído de forma que suas câmeras, iluminadores e CPU o tornassem capaz de implementar processamento de imagens de vídeo

de forma eficaz para aplicações de tráfego¹⁸. Deixamos a descrição dos aspectos tecnológicos referentes às câmeras e iluminadores e a exemplificação de alguns resultados de captura de imagem obtidos para o Capítulo 4 (mais especificamente na Seção 4.3), quando é apresentado o equipamento construído: detectores laço indutivo em configuração *armadilha de velocidade* e câmeras de vídeo para monitorar simultaneamente quatro faixas de tráfego. No presente capítulo concentramos nossa atenção nos aspectos tecnológicos do laço indutivo.

A organização deste capítulo é conforme se segue: a Seção 3.1 descreve o princípio de funcionamento do sensor a laço indutivo. A Seção 3.2 descreve os fatores físicos que interferem na medida de indutância do laço e define o que vem a ser a sensibilidade do laço indutivo. A Seção 3.3 introduz o conceito de perfil magnético e detalha sua obtenção usando técnicas de análise espectral de alta resolução. A Seção 3.4 descreve a influência da geometria do laço indutivo na formação do perfil magnético. A Seção 3.5 mostra como é feita usualmente a extração de características dos perfis magnéticos de laços cujas geometrias são mais comuns. Por fim, a Seção 3.6 introduz o conceito de medição de velocidade por correlação cruzada de perfis magnéticos obtidos de laços em configuração “armadilha de velocidade”.

3.1 Detectores de Veículos por Laço Indutivo

Desde sua criação nos idos de 1960, o detector por laço indutivo tornou-se a forma mais popular de detecção de veículos. Os componentes principais de um sistema detector por laço indutivo incluem (FHWA, 1990, [28], 2006 [29]): o sensor, formado por 3 a 5 voltas de um fio isolado enterrado em um corte raso no pavimento; um cabo alimentador ou “*home-run*”, da caixa de passagem próxima à localização dos fios sensores até a cabine de eletrônica (veja na Figura 2-1) e a eletrônica propriamente dita, que alimenta o sensor e capta as variações do sinal, localizada dentro de uma cabine protegida. Colocado de forma simples, as unidades eletrônicas de detecção passam energia através do sistema sensor ou “laço” em frequências normalmente na faixa de 10 kHz a 200 kHz. O sistema eletrônico forma, em conjunto com o laço, um circuito elétrico sintonizado. Quando um veículo passa sobre o laço ou pára sobre

¹⁸ Os objetivos para que um sistema de processamento de imagens de vídeo seja eficaz em aplicações de tráfego foram listados anteriormente, Seção 2.5, página 27.

ele, a indutância do laço diminui. Este decréscimo na indutância faz atuar a saída eletrônica do detector (um sinal digital, relé convencional ou de estado sólido) que, por sua vez, envia a informação que um veículo foi detectado para a unidade de controle e monitoração de tráfego. Um modelo de circuito equivalente detalhado para laços indutivos é apresentado por Mills, 1989, em [69].

Dissemos que a eletrônica do detector acusa a passagem de veículos por notar um decréscimo em sua indutância. Mas é verdade que a pesada massa ferrosa dos veículos tende a aumentar a indutância, se analisarmos do ponto de vista de campos estáticos. Contudo, devido às altas frequências normalmente empregadas nesta aplicação, há uma diminuição na profundidade de penetração do campo magnético no material, provocada pela circulação de correntes parasitas, também denominadas correntes de *Foucault*. Este comportamento faz predominar a influência do material metálico periférico da carcaça sobre sua massa, produzindo o efeito contrário, isto é, a observação de uma diminuição da indutância. É incorreto, portanto, assumir que a massa do veículo (devido ao efeito ferromagnético) é a causa da detecção. Na realidade, a sensibilização observada está relacionada com a superfície metálica paralela ao sensor. Com as distâncias dos veículos ao solo e as dimensões usadas para confeccionar os laços indutivos de forma convencional na maioria das aplicações de monitoração de tráfego, observa-se na prática que o decréscimo de indutância causado pelas correntes parasitas suplanta o efeito de aumento da indutância causado pelo fenômeno ferromagnético (FHWA, 1990, [28], 2006, [29]), para as faixas de frequência de operação escolhidas. O efeito final resultante irá, no entanto, depender da distribuição de campo no interior do material, que é função da frequência de excitação do campo magnético, da composição do material e da geometria da configuração laço-veículo.

3.2 Sensibilidade do Laço Indutivo

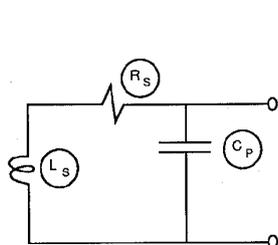
Laços indutivos convencionais e cabos alimentadores normalmente são feitos utilizando fios #12, a #16AWG (seção transversal $3,3 \text{ mm}^2$ a $1,3 \text{ mm}^2$ respectivamente), que ao serem enrolados e colocados em série com o cabo alimentador, resultam em valores de resistência DC na casa de unidades de ohms. Esta resistência é inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro do fio. À medida que a frequência do sinal aumenta, a resistência do fio também aumenta devido à distribuição não uniforme da corrente dentro do condutor, comportamento

conhecido pelo nome de efeito pelicular. O laço instalado no pavimento também apresenta uma *resistência induzida*, conhecida como “resistência de terra”, devida à perda após uma ação de transformação que acontece entre o laço e correntes induzidas no solo e nos substratos do pavimento. Mais detalhes a este respeito podem ser encontrados em [28], [29] e [69] (FHWA, 1990 e 2006; Mills: 1989).

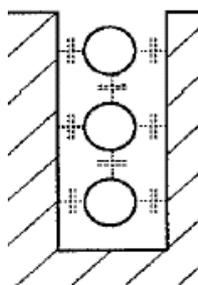
$$\text{Fator de Qualidade } Q = \frac{\omega L_S}{R_S}$$

$$\text{Freq. ressonância } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_P \left(1 + \frac{1}{Q_0^2}\right)}}$$

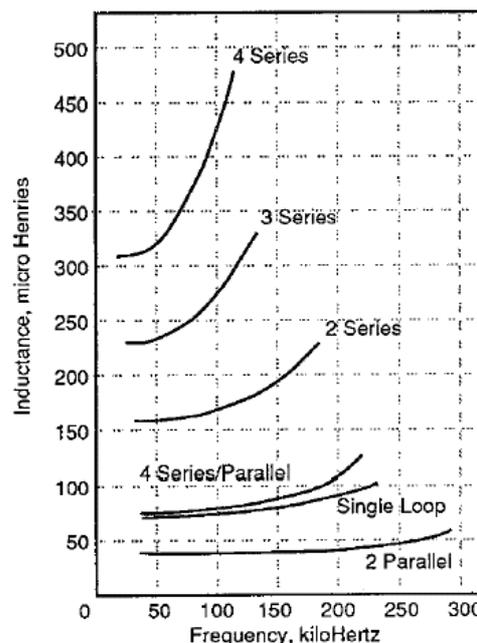
$$Q_0 = \sqrt{\frac{1}{R_S^2 C_P} L_S} - 1$$



(A)



(B)



(C)

Figura 3-1: (A) Circuito equivalente do laço indutivo com representação das perdas envolvidas; (B) Efeito capacitivo em laços indutivos enterrados: entre espiras de condutores e entre condutores e a terra; (C) O resultado no comportamento em frequência do laço indutivo visto pelo circuito detector é o de um “aumento” na indutância com a frequência (extraído de FHWA, 1990, [28]).

Existe também o acoplamento capacitivo entre as várias espiras do mesmo fio formando o laço, bem como do fio para a terra, como ilustram a Figura 3-1. A maior parcela da capacitância é aquela entre os condutores e a parede do corte no pavimento. A capacitância é diretamente proporcional à constante dielétrica do material selante utilizado. Se supusermos que o laço indutivo é composto por um circuito indutivo puro (a menos da resistência já considerada), esta “indutância” vista então pela eletrônica do detector é modificada por este efeito capacitivo. O efeito observado é de uma indutância que “aumenta” com o aumento da frequência de trabalho (Figura 3-1C). Se o material selante for higroscópico (i.e. absorve e retém umidade) ou incompleto (i.e. não preenche todo o espaço vazio do corte), permitindo que a água penetre por entre os condutores, a capacitância irá alterar-se bastante devido à alta constante dielétrica da água. Muitas voltas em laços com grande área para aumentar o

componente indutivo irão agravar o problema, pois esta ação aumentará em demasia a capacitância dos mesmos, diminuindo com isso sua frequência de auto-ressonância. Isto pode resultar em medida de indutância nula na ressonância pelos detectores de veículos. O resultado final é uma operação instável do detector de veículos. Em baixas frequências, digamos 1 kHz, as capacitâncias têm efeito desprezível, mas para frequências acima de 20kHz elas realmente devem ser levadas em conta. Normalmente utiliza-se a frequência de 1kHz para medição da indutância de laços já enterrados, de forma a não ser influenciado pelas capacitâncias presentes e determinar o número de espiras do referido laço (Mills, 1989, [69]).

Além das capacitâncias descritas acima, a indutância do cabo alimentador também interfere na medida efetuada pelo laço. Após deduções de modelos de circuito e simulações, Mills (1989, [69]) mostra que a indutância do cabo pode ser considerada irrelevante se sua indutância é um décimo da indutância do laço quando o circuito como um todo apresenta um fator de qualidade Q acima de 5. Para considerações sobre o cálculo e medições de Q para o circuito típico do laço indutivo considerando as capacitâncias e resistências de fiação e de carga, refira-se a FHWA (1990, [28], 2006, [29], [30]).

A eletrônica associada aos laços indutivos de agora em diante será referida como “detector” em contraposição aos laços, de agora em diante denominados “sensores”. Para que os detectores possam operar sensores contíguos em uma mesma via de tráfego, eles são projetados para trabalhar em várias bandas selecionáveis de frequência de forma a minimizar a interferência cruzada entre laços (“*crosstalk*”). Como descrevemos no parágrafo anterior, a medida indireta da variação da indutância via alteração de frequência é afetada pela indutância do cabo, pelo Q do circuito e pelas capacitâncias parasitas. Como esperamos trabalhar em canais de frequência que podem estar em uma região ampla (i.e. de 10kHz a 200kHz nos detectores comerciais), o problema é contornado utilizando-se a chamada “*indutância normalizada*” ou “*Sensibilidad*”, definida por:

$$S_L = 100 \times \frac{L_A - L_P}{L_A} = 100 \times \frac{\Delta L}{L} \quad (3-1)$$

Onde os índices “A” e “P” referem-se respectivamente aos valores de indutância na ausência e na presença de veículo. Esta medida é a magnitude normalmente mostrada nas figuras que apresentam perfis magnéticos. Outras grandezas equivalentes também podem aparecer na ilustração de um perfil magnético, como por exemplo a frequência do sinal oscilatório, a

contagem de ciclos em uma janela fixa de tempo, ou mesmo o próprio valor de variação de indutância ΔL .

Sobre esta definição de S_L , pode-se demonstrar (FHWA, 1990, [28], 2006, [29], [30]) que a sensibilidade do laço decresce para áreas dos laços que sejam muito maiores que a área inferior dos chassis dos veículos (chamemos aqui de “plataforma” do veículo). Pode-se mostrar também que a sensibilidade independe da quantidade de espiras do laço¹⁹ e que ela decresce com o quadrado da distância da plataforma ao laço. Todo este comportamento reflete a predominância do efeito das correntes parasitas sobre o efeito ferromagnético na determinação da sensibilidade dos laços para aplicações de monitoração de tráfego de veículos.

3.3 Extração do Perfil Magnético

Nos detectores convencionais, extrai-se a informação de detecção veicular medindo-se indiretamente a alteração da indutância ΔL ou a sensibilidade S_L pela observação da alteração correspondente na frequência causada pela passagem do veículo. Usa-se, por exemplo, um circuito PLL (“*Phase-Locked Loop*”) para acoplar-se ao sinal de entrada, que fornece por sua vez como saída o sinal analógico de controle da malha de realimentação, que é proporcional à frequência observada. Se não há necessidade de se avaliar o perfil magnético, este sinal analógico já é suficiente para ser comparado contra um limiar de decisão ajustado de acordo com a sensibilidade desejada, levando à tomada de decisão da detecção do veículo. Quando se deseja analisar o perfil magnético do veículo, o sinal analógico proporcional à frequência deve ser digitalizado por um conversor A/D, ficando então disponível para aplicação das diversas técnicas de análise do perfil magnético. Barbosa et al., 2004 ([8]) discutem os desafios encontrados na construção de um circuito de coleta de perfis magnéticos, apresentando também, embora de forma superficial, uma análise do perfil magnético de um carro de passeio e de um caminhão no domínio da frequência, usando a transformada rápida de Fourier (*FFT* – “*Fast Fourier Transform*”, [88], [66]), uma técnica clássica considerada

¹⁹ Na realidade pode-se aumentar a sensibilidade do laço aumentando-se a distância entre as espiras (FHWA, 1990, [28], 2006, [29]), pois o comprimento do solenóide formado pelas espiras aumenta, ao custo de um corte mais profundo no pavimento.

robusta, mas de baixa resolução. Cabe mencionar que em 2003, Abdulhai et al. ([1]) já haviam proposto a combinação da FFT do perfil magnético com outras medidas de distância para extração de informações de laços indutivos visando à classificação de veículos e *REID*.

Neste trabalho, foi proposta e implementada uma forma alternativa de extração das grandezas ΔL ou S_L , obtidas diretamente no sensor do laço indutivo a partir da monitoração da frequência do sinal oscilatório existente, portanto antes do circuito *PLL* ou outros circuitos de função similar nos detectores convencionais legados existentes e em paralelo com estes. Uma vez digitalizado por conversão A/D rápida, o sinal foi submetido à *Decomposição Harmônica de Pisarenko* para extração do conteúdo em frequência do sinal, antes de qualquer suavização proporcionada pelas etapas subseqüentes dos circuitos dos detectores comerciais. Investigações efetuadas posteriormente revelaram componentes de alta frequência presentes no sinal, mas que na realidade não traziam informação útil à classificação de veículos: eram harmônicos da frequência fundamental, facilmente atribuídos a imperfeições do circuito oscilador, pois existiam mesmo quando não existiam estruturas metálicas ao alcance do sensor.

Por outro lado, a técnica de processamento em alta resolução dos perfis magnéticos tornou possível o projeto de sistemas com sensores mais curtos longitudinalmente, capazes de captar mais detalhes dos veículos, como fica claro na discussão dos resultados apresentada mais adiante no Capítulo 6. A assinatura coletada na forma atual é uma forma suavizada de perfil magnético tanto pela área interna ao laço – relativamente grande – quanto devido aos circuitos de filtragem dos detectores, o que é adequado para detecções simples, mas inadequado para atender a atual demanda por classificação de veículos.

A classe de técnicas baseadas na auto-análise da matriz de autocorrelação²⁰ ou da matriz de dados para extração de conteúdo espectral tem sido citada na literatura (Marple, 1987, [66], Magalhães e Araújo, 2000, [63]) como tendo uma melhor resolução na estimação de características no domínio da frequência do que técnicas espectrais tais como as auto-regressivas ou de Prony. Isto é verdade especialmente em baixos valores de relação sinal ruído, onde estas últimas técnicas frequentemente falham para estimar sinais senoidais ou

²⁰ As definições formais da matriz de autocorrelação e da matriz de dados estão no Apêndice A, equações (A 3) e (A 22), respectivamente.

componentes espectrais de faixa estreita, como é o caso para os sinais provenientes dos laços indutivos. A Figura 3-2 ilustra de forma visualmente comparativa a alta resolução do método de estimação de frequências por análise de autovalores, quando comparada ao método auto-regressivo, em uma aplicação de extração das quatro frequências formantes de um sinal de voz. A chave para este desempenho é a divisão da informação contida na matriz de autocorrelação ou na matriz de dados em dois espaços vetoriais: um subespaço de sinal e um subespaço de ruído. Estas técnicas, cujos aspectos mais relevantes são destacados a seguir para mantermos continuidade na abordagem do tema, estão detalhadas no Apêndice A.

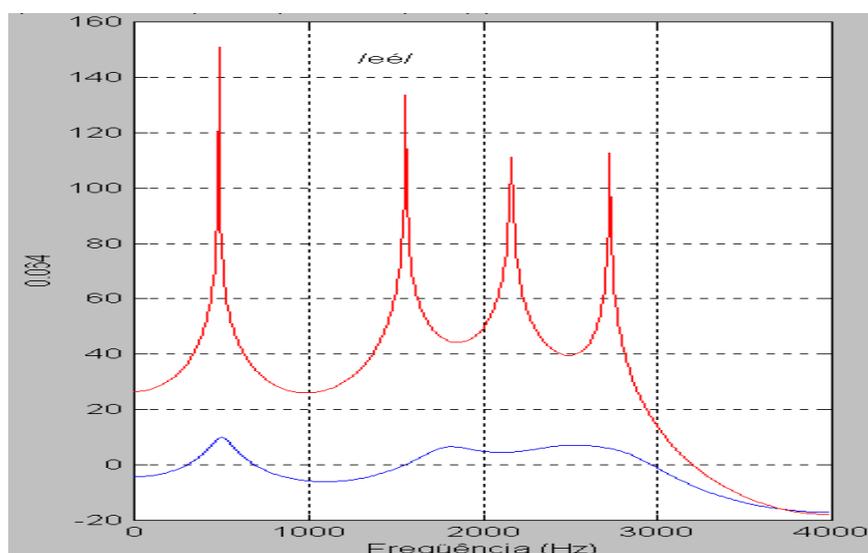


Figura 3-2: A modelagem AR (ou auto-regressiva, curva inferior) é uma versão suavizada da Decomposição Harmônica de Pisarenko (curva superior). A figura mostra um trabalho anterior do autor, onde se evidenciam em alta resolução as quatro frequências *formantes* para um sinal de voz correspondente à vogal sustentada /eé/. No gráfico, o eixo das ordenadas é logarítmico e tem relação com a potência do sinal para quadros de voz de 64 ms (extraído de Magalhães et al, 2000, [63]).

Propõe-se portanto neste trabalho o emprego de técnicas baseadas na análise dos autovalores e autovetores da matriz de autocorrelação, definida pela equação (A 3). Dentre estas técnicas, podemos citar o método de *Prony* (Seção A.3), que modela os dados amostrados como uma combinação linear de exponenciais. Embora não seja uma técnica de estimação do espectro de potência e sim de um “*pseudo espectro*”, o método está estreitamente relacionado com os algoritmos de predição linear por mínimos quadrados utilizados para a estimação de parâmetros dos modelos *AR* (*auto-regressivo*) e *ARMA* (*auto-regressivo com média móvel* – veja no Apêndice A). O método de *Prony* busca encontrar um modelo exponencial

determinístico que se encaixe aos dados, ao passo que os métodos *AR* e *ARMA* buscam um modelo aleatório a partir da estatística de segunda ordem dos dados.

O método da *Decomposição Harmônica de Pisarenko (PHD – “Pisarenko Harmonic Decomposition”* – Seção A.6.1) por sua vez, assume que um dado processo consiste de M senóides complexas em ruído branco complexo aditivo e deriva as frequências senoidais, potências senoidais, e a variância do ruído branco a partir da seqüência de autocorrelação “conhecida”. Demonstra-se na Seção A.6.3 que o estimador *AR* é uma forma suavizada do estimador *PHD*. Como buscamos um estimador apenas da frequência do sinal e que tenha alta resolução, descartamos a técnica *AR* (suavizada) e adotamos a técnica *PHD*. A evolução ao longo do tempo dos autovalores e autovetores determinados pela técnica *PHD* a partir de pequenas *seqüências de dados* (ou *quadros*) traz em alta resolução uma descrição do perfil magnético. Esta informação pode ser traduzida sob diversas formas, como diagrama de pólos e zeros, onde os pólos são as raízes do polinômio cujos coeficientes são os elementos do autovetor correspondente ao menor autovalor – equação (A 19), ou o seu conteúdo em frequência instantânea *quadro a quadro*, sob a forma de pseudo-espectros.

As técnicas *MUSIC – “Multiple Signal Classification”* e *EV – “EigenValue”* (Seção A.6.2) por sua vez, se necessário podem ser usadas para plotar os pseudo-espectros, mostrando picos acentuados nas frequências de localização das senóides, pois são estimadores frequenciais baseadas no subespaço de ruído. A técnica *MUSIC*, mostrada na equação (A 44), é um estimador frequencial que tenta modelar *aproximadamente* os dados por senóides *não amortecidas*, podendo ser visto como uma modificação do método moderno de *Prony*, que tenta a modelagem *exata* por senóides *amortecidas*. No caso da técnica *MUSIC*, não estaremos buscando fatores de amortecimento nem a amplitude ou fase inicial das senóides, mas apenas as suas frequências. O método *EV* na equação (A 45) é uma versão do método *MUSIC* onde a influência de cada autovetor no pseudo-espectro é ponderada pelo inverso do autovalor correspondente.

3.4 Geometria do Laço Indutivo

Uma das grandes vantagens do uso de laços indutivos é a variedade de geometrias aceitáveis. O tamanho e o número de espiras de um laço ou de uma combinação de laços, em conjunto com o comprimento do cabo alimentador, devem produzir um valor de indutância dentro de

uma faixa compatível com o projeto do detector e com os objetivos do projetista²¹. Para diferentes geometrias do laço, a assinatura ou “*perfil magnético*” para um mesmo veículo varia, sendo sua definição de fundamental importância quando o objetivo é a classificação.

Estudo realizado por Gajda et al. em 2001 ([33]) mostra que os laços indutivos mais longos (no sentido longitudinal, i.e. na direção do fluxo de veículos) têm a propriedade de tirar uma média do sinal, resultante da integração no espaço. Neste caso, os momentos de entrada e de saída do veículo no laço são bem claros, como podemos ver na curva 1 da Figura 3-3A, o que é mais adequado quando o objetivo é apenas a detecção. Já os laços mais curtos (curva 2 na Figura 3-3A) permitem uma maior acuidade na captação do perfil do chassi do veículo, que é particular de cada classe de veículo.

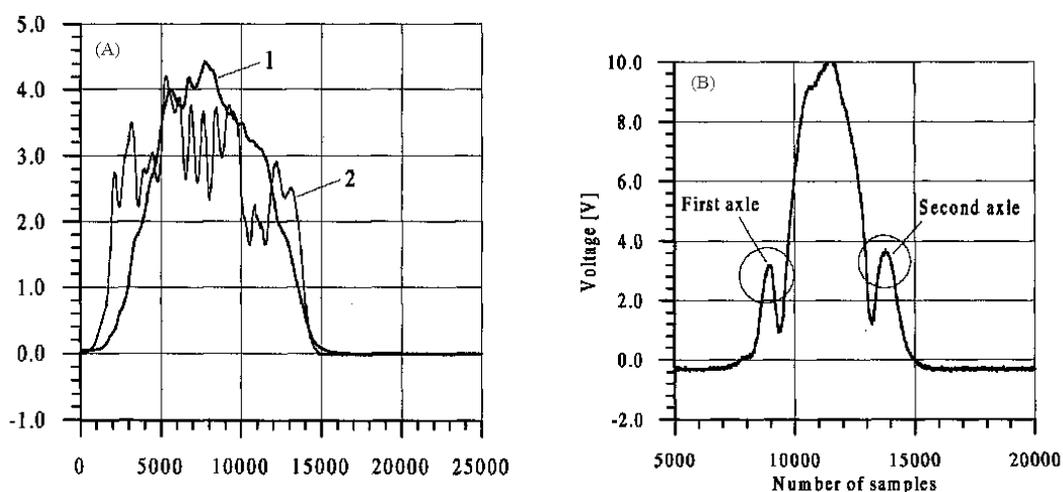


Figura 3-3: Perfis magnéticos para um mesmo veículo (um ônibus), utilizando laços indutivos com comprimentos longitudinais diferentes. (A) Em (1): laço de 4m; em (2): laço de 50cm; (B) Laço de 10cm (extraído de Gajda et al., 2001, [33]).

O trabalho desenvolvido por Gajda et al. apresenta também uma discussão da influência do comprimento do laço no sentido longitudinal da via sobre os diferentes parâmetros e características que descrevem o perfil magnético de veículos pertencentes a diversas classes. O estudo é apresentado para dimensões longitudinais variando de 0,25 metros a 4 metros.

²¹ A norma NEMA (2001, [71]) para equipamentos de trânsito nos Estados Unidos especifica indutâncias para os laços indutivos na faixa de 50 μ H a 700 μ H. Uma operação estável do detector é normalmente observada para indutâncias acima de 100 μ H. Os detectores costumam funcionar para indutâncias acima de 700 μ H, mas ao limitar neste valor, a norma pretende incentivar práticas conservativas de forma a manter baixas as capacitâncias parasitas.

Estas alterações de geometria exercem grande influência na eficiência dos algoritmos de classificação de veículos. Neste mesmo trabalho sugere-se, a partir dos resultados, que laços indutivos de comprimento longitudinal inferior a 10 cm podem ser usados para registrar o número de eixos do veículo, bem como para medir a distância entre eles (veja a Figura 3-3B). Isto significa que laços indutivos com tal geometria poderiam substituir os caros cabos piezo-elétricos, além de possibilitar uma classificação mais detalhada do veículo nas classes definidas pela União Européia, onde normalmente se adota um laço de comprimento longitudinal igual a um metro para coleta de formas de onda para estudo.

Nos Estados Unidos, a dimensão mais comum para os laços é aquela definida pela Caltrans – California Department of Transportation - com 6×6 pés ($1,82\text{m} \times 1,82\text{m}$), onde se observam bordas mais distintas de entrada e saída do laço (Sun et al., 1999, [99]). No Brasil não há um padrão definido. Cada fabricante adota um projeto diferente. Somente para citar dois exemplos, em uma instalação recente (março de 2008) para demonstração e testes de equipamentos pela BHTRANS – órgão legal de trânsito da cidade de Belo Horizonte, MG – a fabricante Perkons usou laços de 2×1 a $2,5 \times 1$ metros em seus *medidores fixos* e $0,8 \times 0,8$ metros em suas *barreiras* (medidores fixos com mostrador luminoso). Já a fabricante Brascontrol utilizou em seus *medidores fixos* laços em forma de um “oito” (quadrados adjacentes) com $1,30 \times 1,35$ metros longitudinal \times transversal, respectivamente, embora tenha usado por um longo período o mesmo padrão da Caltrans em suas instalações. Fotos destes laços podem ser vistas na Figura 2-1-B na página 9.

Como vimos na introdução, em 2004 Oh et al. [73] apresentaram também uma nova tecnologia de *Lâmina Sensora*, cuja geometria está descrita na Seção 2.4 e ilustrada na Figura 2-8 (página 22), sendo o experimento com laços indutivos de geometria com dimensão longitudinal mais curta encontrado na literatura até o momento (0,5 cm para instalações permanentes).

Outra característica relevante é que enquanto a coleta de perfis magnéticos convencionais ocorre a uma taxa de amostragem que varia entre 60 Hz e 300Hz – dependendo do detector, da sensibilidade ajustada e da aplicação ou estudo realizado, os detectores ligados à *lâmina*

sensora trabalham com uma taxa de amostragem do sinal de até 1200 Hz. O fabricante²² relata ainda que estes detectores também são capazes de alocar automaticamente as frequências centrais de operação do circuito, analisando previamente o espectro de sinais presentes no ambiente de instalação e contornando também automaticamente o problema do “*crossover*” entre laços indutivos adjacentes, o que é feito manualmente nos detectores convencionais.

3.5 Extração de Características do Perfil Magnético

A seguir é apresentado um maior detalhamento da extração de características dos perfis magnéticos obtidos utilizando a tecnologia convencional atualmente disponível, com taxas de amostragem em torno de 10 ms, bem como a possibilidade de agrupamento por partes do veículo, possibilitado pelos laços tipo lâmina sensora.

Oh et al. (2002, [75], 2003, [76]) relacionam uma série de características usualmente extraídas dos perfis magnéticos obtidos de tecnologias sensoras convencionais pelos diversos pesquisadores da área. Estas características são resumidas na Figura 3-4 e Tabela 3-1. Algumas delas são extraídas da assinatura bruta (Figura 3-4-A e D), como a ocupação “*O*” em *segundos* (tempo em que o veículo permanece sobre o laço) e a variação máxima de magnitude M , que pode ser dada em contagem de ciclos, frequência em kHz, indutância em nano-Henries (ΔL) ou “*por unidade*” ($\Delta L/L$), ou ainda como S_L definido na equação (3-1) – distúrbio percentual em relação à indutância de repouso. Outras grandezas são extraídas da assinatura normalizada em ambos os eixos de amplitude e tempo (Figura 3-4-B e E), dividindo-se os valores correspondentes ao eixo das ordenadas y por M e multiplicando-se os valores correspondentes ao eixo de tempo x pela velocidade v (resultando em uma medida de distância em metros), respectivamente.

²² A empresa Inductive Signature Technologies, Inc. relata contar com opção de uma saída “Premium” com amostragem a 40 kHz para seu detector modelo IST-222, mas sem relatos disponíveis na literatura a respeito da qualidade e regularidade do sinal ofertado. Em um estudo científico realizado em conjunto por vários institutos da University of Southern California – USC – visando classificação de veículos, Park et. al. [81] relatam uma série de limitações envolvendo tal sensor para sua saída amostrada em 1200 Hz, optando na ocasião por trabalhar com a taxa de amostragem em 300 Hz.

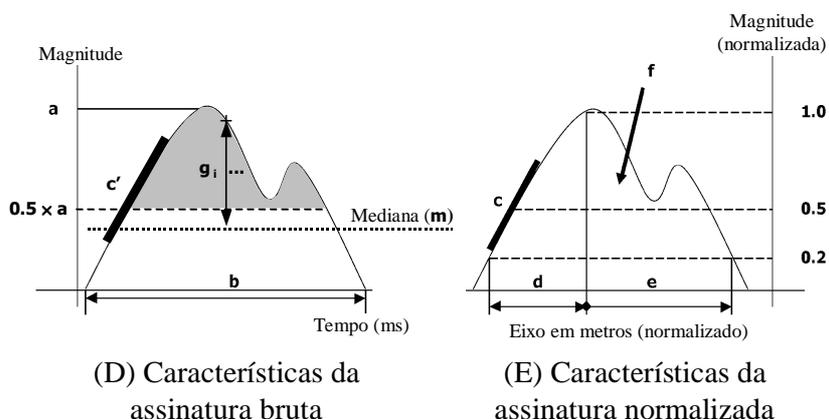
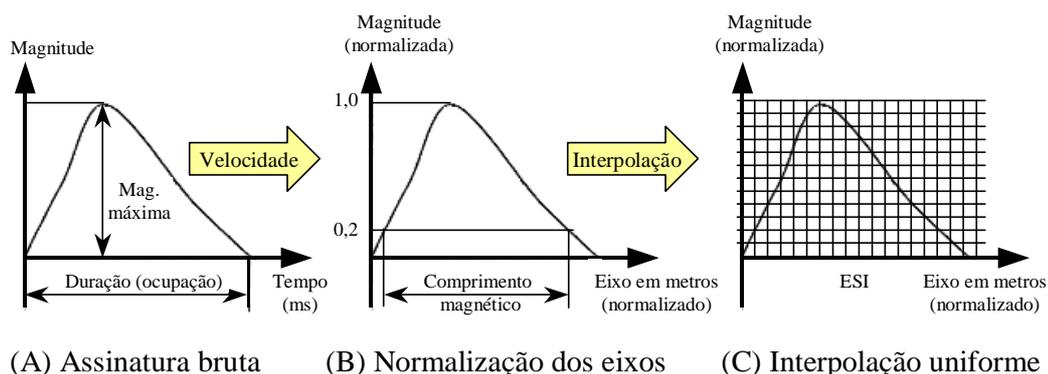


Figura 3-4: Extração de características do perfil magnético do laço indutivo convencional: (A) Assinatura bruta convencional; (B) Normalização dos eixos; (C) Interpolação para taxa de amostragem constante (ESI – “Equally Spaced Interpolation”); (D) Características extraídas da assinatura bruta; (E) Características extraídas da assinatura normalizada (adaptado de Oh et al., 2002, [75], [76] e Ritchie et al., 2005, [86]).

Características extraídas do perfil magnético da Lâmina Sensora

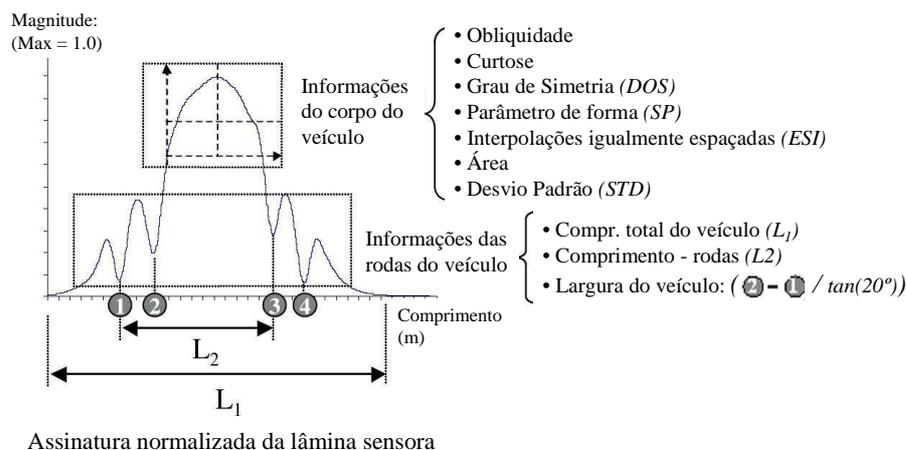


Figura 3-5: Extração de características do perfil magnético da lâmina sensora: é possível o agrupamento de características por partes do veículo (Oh et al., 2004, [73], [74]).

Tabela 3-1: Características extraídas de perfis magnéticos convencionais ([75], [76], [86])

Notação	Característica	Descrição	Cálculo (Figura 3-4)
<i>Grupo I: Características específicas de tráfego</i> ²³			
<i>O</i>	Ocupação (ou duração)	Tempo total em que o veículo permanece sobre o laço indutivo (segundos)	<i>b</i>
<i>SR</i>	Taxa de subida (“ <i>Slew Rate</i> ”)	Inclinação do perfil no ponto de ordenada <i>y</i> igual a 0,5 antes da normalização da abscissa {[($\Delta L/L$)/segundo] = 1/segundo}	<i>c'</i>
<i>v</i>	Velocidade	Velocidade instantânea do veículo: <i>v_{il2}</i> : cálculo convencional <i>v_{r12}</i> : cálculo pela correlação cruzada	<i>v_{il2}</i> : equação (3-2) <i>v_{r12}</i> : equação (3-4)
<i>Grupo II: Características específicas do veículo</i>			
<i>M</i>	Magnitude máxima	Valor máximo absoluto da magnitude ($\Delta L/L$ – adimensional ou $\Delta L - nH$)	<i>a</i>
<i>SP</i>	Parâmetro de Forma (“ <i>Shape Parameter</i> ”)	Grandeza relacionada ao grau de simetria e obliquidade do perfil (adimensional)	<i>d/(d+e)</i>
<i>L</i>	Comprimento magnético (ou eletrônico) do veículo	Comprimento a partir da ocupação do laço (metros)	<i>d+e</i>
<i>A</i>	Área sob a curva do perfil	Área sob a curva após normalização (metros)	<i>f</i>
<i>DOS</i>	Grau de simetria (“ <i>Degree Of Symmetry</i> ”)	Seja m a mediana ²⁴ do perfil. <i>DOS</i> é a soma das distâncias (em <i>y</i>) até m de cada ponto acima da ordenada $y = 0,5 \times a$ ($\Delta L/L$, por exemplo, adimensional)	$\Sigma < g_i, \mathbf{m} >$
<i>NHM</i>	Número de amostras de alta magnitude (“ <i>Number of High Magnitude</i> ”)	Número de amostras acima da ordenada <i>y</i> de valor 0,5 após normalização nos eixos <i>x</i> e <i>y</i> (adimensional)	<i>NHM</i>
<i>SR_N</i>	Taxa de subida normalizada (“ <i>Slew Rate</i> ”)	Inclinação do perfil no ponto de ordenada <i>y</i> igual a 0,5 após normalização {[($\Delta L/L$)/ <i>m</i>] = m^{-1} }	<i>c</i>

²³ Outras características usuais de tráfego não listadas na tabela são instante de detecção e faixa de rolamento.

²⁴ A *mediana* (ou percentil 50) é definida como o valor que divide os dados ordenados ao meio, i.e. metade dos dados têm valores maiores do que a mediana, a outra metade tem valores menores do que a mediana.

As características mostradas na Tabela 3-1 referem-se às assinaturas magnéticas de laços ditos *convencionais*. Elas estão separadas em dois grupos, o primeiro deles com as grandezas referentes a informações de tráfego. O segundo grupo traz as características do veículo em si. Na Seção 2.4, descrevemos a nova tecnologia de laço indutivo denominada *lâmina sensora* (Figura 2-8, página 22). Esta tecnologia possibilita, por evidenciar o momento de passagem das rodas sobre o sensor, que as características possam ser agrupadas também como referentes ao *corpo* do veículo ou às suas *rodas* e/ou *eixos*. É possível, por exemplo, obter-se o número de eixos do veículo, bem como o desmembramento da grandeza comprimento total do veículo L (listada na Tabela 3-1) em comprimento total L_T e comprimento $L_{Ep,Eq}$ entre eixos “ p ” e “ q ”. A identificação clara da região referente ao *corpo* do veículo também traz para as características tradicionais listadas na Tabela 3-1 um novo significado.

Para tornar possível a comparação em amplitude do vetor de amostras dos perfis magnéticos a intervalos regulares no eixo x normalizado, executa-se uma interpolação normalmente usando *splines* (Sun et al., 1999, [99], Abdulhai et al., 2003, [1]). Esta interpolação é usualmente referida na literatura como “*ESI – Equally Spaced Interpolation*” e está ilustrada na Figura 3-4-C.

Assim como a *lâmina sensora* pode fornecer a informação de quantidade e disposição dos eixos de um veículo, veremos que também a tecnologia em alta resolução desenvolvida neste trabalho permite tal medida, pois possibilita a adoção de laços indutivos de pequenas dimensões e com alta sensibilidade. Este é realmente um ganho significativo para auxiliar na classificação de veículos. Lembre-se, por exemplo, do estudo realizado por Sroka et al. (2004, [92]), descrito na Seção 2.6 – Fusão de Dados de Sensores. Nele, a informação de número de eixos obtida usando cabos piezo-elétricos em esquema de fusão com a informação provida por um laço indutivo convencional fez o índice de acerto na classificação de veículos pular da faixa de 60% a 70% para a faixa de 92% a 95%. Adquirimos então o potencial de alcançar e até mesmo ultrapassar esta faixa de índices de acerto sem a necessidade de utilização dos caros cabos piezo-elétricos.

Calixto, por exemplo, em 2006 ([12]), realizou um trabalho de classificação de veículos sobre uma base de dados coletada por aparelhos da marca Perkons na cidade de Curitiba, PR, onde relatou a distribuição estatística da grandeza L – *comprimento magnético* – listada na Tabela 3-1, que equivale ao comprimento aproximado em metros do veículo. Veja o resultado desta distribuição na Figura 3-7: ela mostra a distribuição por comprimento de quatro categorias de

veículos nacionais: moto, carro, ônibus e caminhão. A taxa de acerto média alcançada na classificação foi de 98,7%, como mostra a Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Resultado percentual da classificação de veículos efetuada por Calixto em 2006 para as quatro categorias de veículos mostradas na Figura 3-6 ([12]):

	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão	Total
Taxa de Acerto	99,463%	99,565%	96,714%	95,953%	98,713%
Taxa de Alarme Falso	0,493%	0,021%	0,225%	0,397%	1,147%
Taxa de Não Detecção	0,537%	0,435%	3,286%	4,047%	1,287%

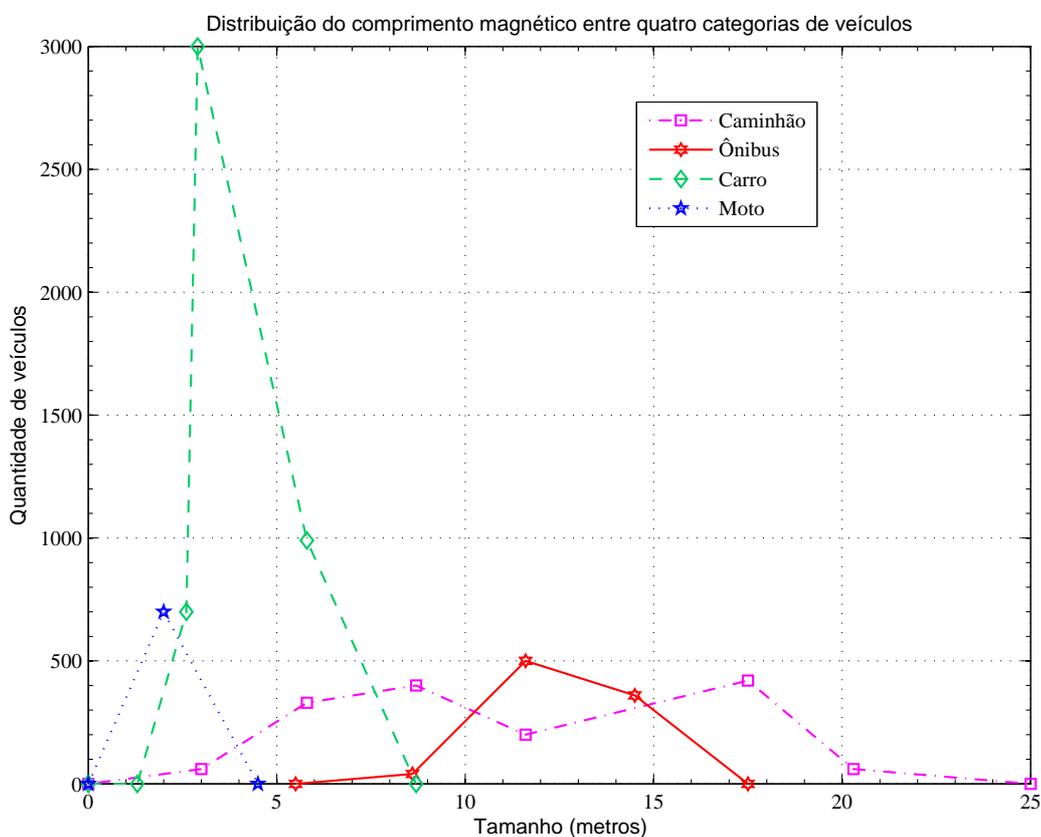


Figura 3-6: Estatística da distribuição do comprimento magnético para quatro categorias de veículos, realizada sobre banco de dados de veículos coletado na cidade de Curitiba, PR, (Calixto, 2006, [12]).

3.6 Medição de Velocidade

Na seção 2.2, vimos que é possível se estimar a *velocidade média* da via de tráfego a partir de um único laço indutivo. No entanto, para uma medida de velocidade com precisão,

normalmente utilizam-se dois laços em configuração *armadilha de velocidade*. As soluções comumente encontradas no mercado para medição acurada de velocidade, na sua grande maioria, utilizam um contador binário simples para medir o tempo entre a detecção no primeiro laço t_1 e a detecção no segundo laço t_2 , que posicionados a uma distância conhecida D um do outro possibilitam o cálculo da velocidade v_{t12} :

$$v_{t12} = \frac{D}{t_2 - t_1} \quad (3-2)$$

Este enfoque simples de medição de velocidade tem a desvantagem de ser extremamente dependente do limiar de detecção em magnitude ajustado para o detector. Se o ajuste é estabelecido para uma baixa sensibilidade, o detector passa a perder eventos de detecção de pequenos veículos como motocicletas, por exemplo. Se o detector é ajustado para alta sensibilidade, veículos de maior porte como ônibus e caminhões, ao aproximarem-se do conjunto de laços, sensibilizam a ambos de forma exagerada, forçando-os a ultrapassar o limiar de detecção quase simultaneamente, resultando em medidas de velocidade extremamente altas e fora da realidade.

Com a possibilidade relativamente recente de coleta dos perfis magnéticos dos veículos, um novo enfoque de medição de velocidade tornou-se possível: o de trabalhar com a onda completa de assinatura do veículo. O método de medição de velocidade aqui proposto baseia-se na determinação da velocidade pelo cálculo da correlação cruzada dos perfis magnéticos dos dois sensores laço indutivo, definida estatisticamente para sinais reais como:

$$R_{S_{L1}S_{L2}}(\tau) = E[S_{L1}(\tau) \cdot S_{L2}(t - \tau)] \quad (3-3)$$

onde τ é o atraso (“lag”) de tempo avaliado entre assinaturas, $E[\cdot]$ é o operador *valor esperado* e S_{Lx} é a magnitude do perfil magnético para o laço “x” como definido na equação (3-1).

A equação (3-4) a seguir apresenta um estimador para a correlação cruzada assumindo que temos, do par de perfis magnéticos $S_{L1}[n]$ e $S_{L2}[n]$ (sinais reais), N amostras discretas de cada um igualmente espaçadas no tempo, variando de $n=0$ até $n=N-1$, onde representamos o atraso “ τ ” discretizado como “ m ” ([66]):

$$R_{S_{L1}S_{L2}}[m] = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} S_{L1}[n+m]S_{L2}[n] & \text{para } 0 \leq m \leq N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-|m|-1} S_{L1}[n]S_{L2}[n+|m|] & \text{para } -(N-1) \leq m < 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

$$v_{r12} = \frac{D}{m_{Rmax}} \quad (3-5)$$

Na equação (3-5), v_{r12} é a velocidade obtida a partir do método de correlação cruzada e m_{Rmax} é o atraso de tempo correspondente ao valor máximo da correlação, que por sua vez pode ser obtida na prática para sinais amostrados uniformemente usando, por exemplo, o estimador na equação (3-4). Para sinais amostrados de forma não uniforme, como é o caso do experimento realizado neste trabalho, desenvolvemos um estimador específico, apresentado posteriormente (Seção 6.2), que utiliza apenas as amostras disponíveis e quantifica os níveis de confiança de cada estimativa possível de ser calculada.

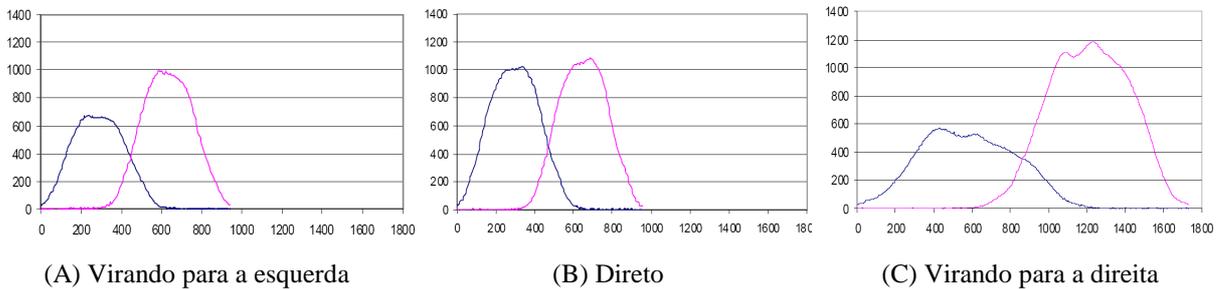


Figura 3-7: Similaridade dos perfis magnéticos para um mesmo veículo passando em diferentes orientações sobre o par de laços indutivos em configuração “armadilha de velocidade” (extraído de Oh et al., 2002, [77]).

Como pressupõe-se que as assinaturas pertencem a um mesmo veículo, elas apresentam similaridade na forma de onda, mesmo quando há movimento oblíquo do veículo em relação aos laços, como ilustra a Figura 3-7. A correlação cruzada terá então seu pico máximo quando o atraso τ for igual ao tempo de percurso $\tau_v = t_2 - t_1$ de um laço ao outro. Isto resulta em uma medida mais acurada, baseada na equação (3-5), não dependendo apenas da amplitude do perfil magnético (mais independente, portanto, do ajuste de sensibilidade), mas principalmente da observação de sua forma de onda ao longo de toda a janela temporal avaliada. Apenas recomenda-se uma boa relação sinal ruído (SNR), uma faixa dinâmica de medição que comporte toda a faixa de variação em amplitude esperada para o sinal de entrada

e taxas de amostragem suficientes. Vale ressaltar que não é mandatório obedecer ao teorema de Nyquist nesse caso, como ficará evidenciado na discussão dos resultados alcançados.

SÍNTESE

Neste capítulo abordamos de forma mais aprofundada aspectos relacionados especificamente com as tecnologias adotadas para classificação: o laço indutivo e as câmeras de vídeo. Abordamos alguns aspectos físicos que influenciam na medição usando laços indutivos, vimos como é normalmente feita a caracterização dos perfis magnéticos por extração de características e introduzimos a idéia do cálculo de velocidade por correlação cruzada dos sinais de dois laços consecutivos. A seguir é descrito o protótipo de equipamento construído para coleta de dados em campo de veículos reais em seu aspecto de hardware e software, capítulos 4 e 5, respectivamente. O Capítulo 6 traz os resultados experimentais alcançados.

4 Construção do Protótipo

Visando a coleta de perfis magnéticos e as imagens dos veículos correspondentes, iniciou-se em 2003 o projeto e a construção de um protótipo, denominado *MVFV – Medidor de Velocidade e Fluxo Veicular* – a ser instalado em via de tráfego de forma a obter uma base de dados de veículos reais. Seu diagrama de blocos está ilustrado na Figura 4-1 e algumas de suas partes podem ser fisicamente identificadas na Figura 4-2, que mostra um esquema em perfil da instalação. Nela podemos identificar o *processador*, os *iluminadores e registradores* e os *laços indutivos*. A Figura 4-3 traz uma identificação dos componentes individuais dentro da caixa do *processador*. Esta figura traz ainda um exemplo de instalação típica em campo, dentre as várias possíveis. O processo de desenvolvimento, que envolveu tanto a parte eletrônica (hardware e software) quanto mecânica (caixas e poste), é ilustrado na Figura 4-4, onde vemos como exemplo um esquema original da mini-estrutura de sustentação (para uso em laboratório) e a estrutura após montagem, bem como detalhes da caixa principal da CPU no projeto (vista em 3D) e na execução. Fotos que dão uma visão geral do protótipo montado em mini-estrutura no laboratório estão mostradas na Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8 a seguir.

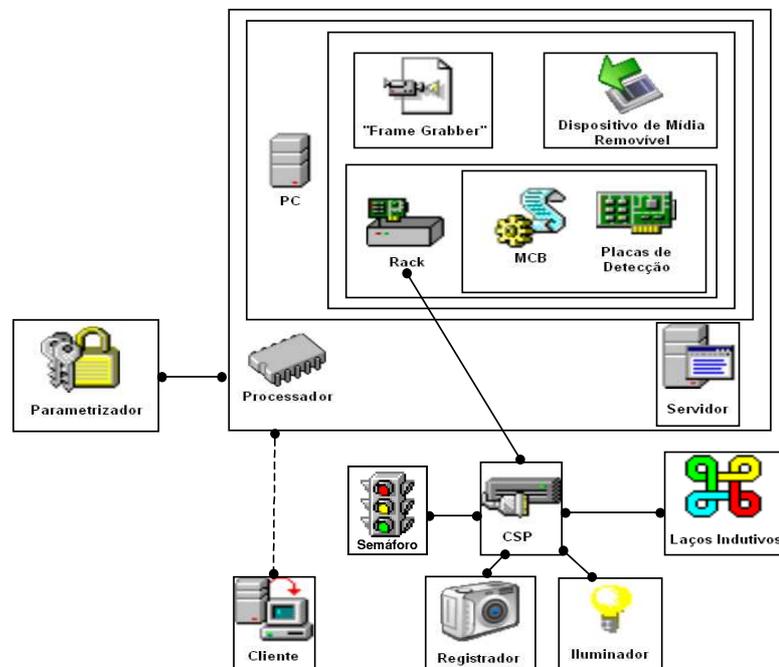


Figura 4-1: Diagrama de blocos do equipamento registrador de veículos para coleta de perfis magnéticos e imagens.

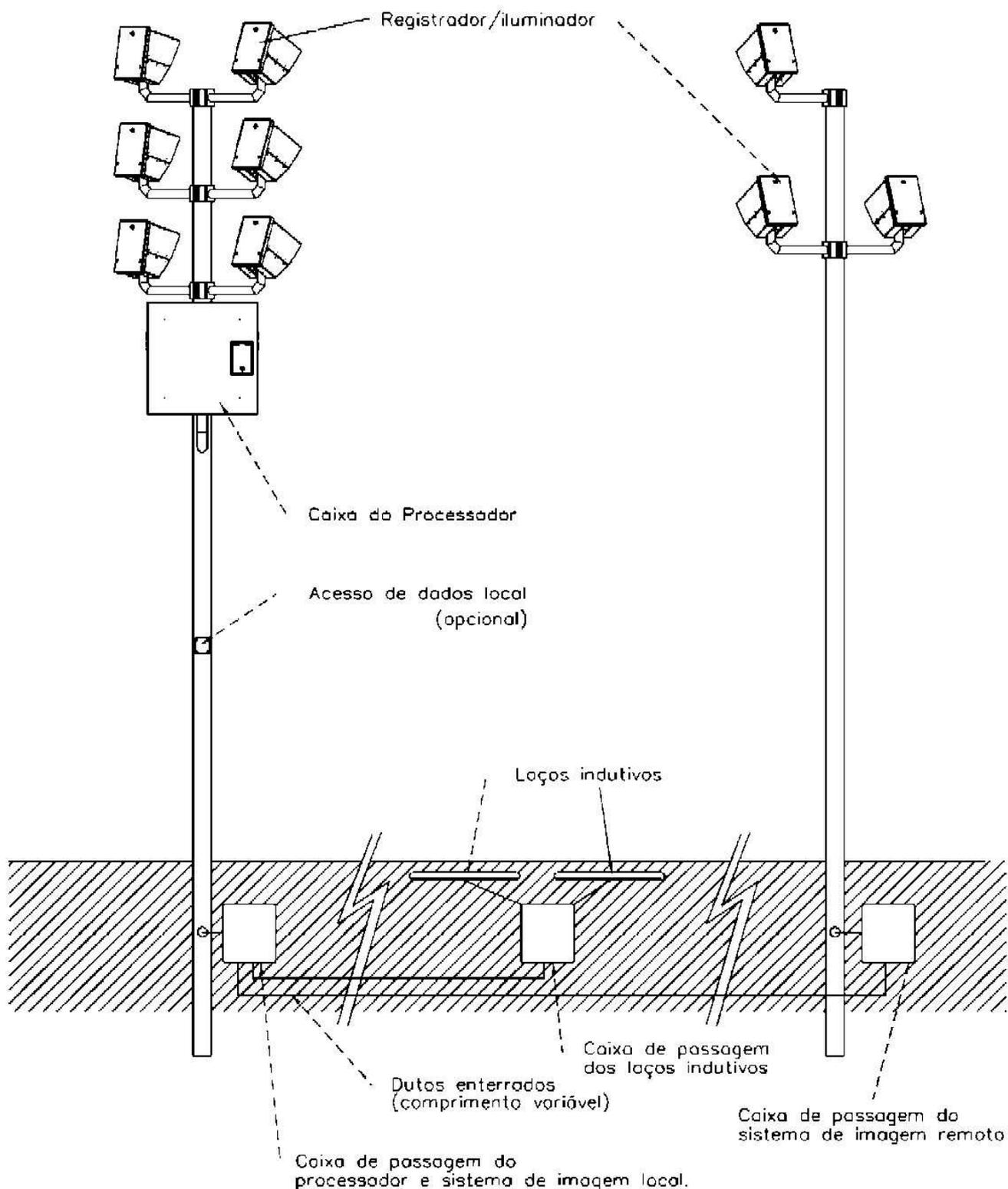
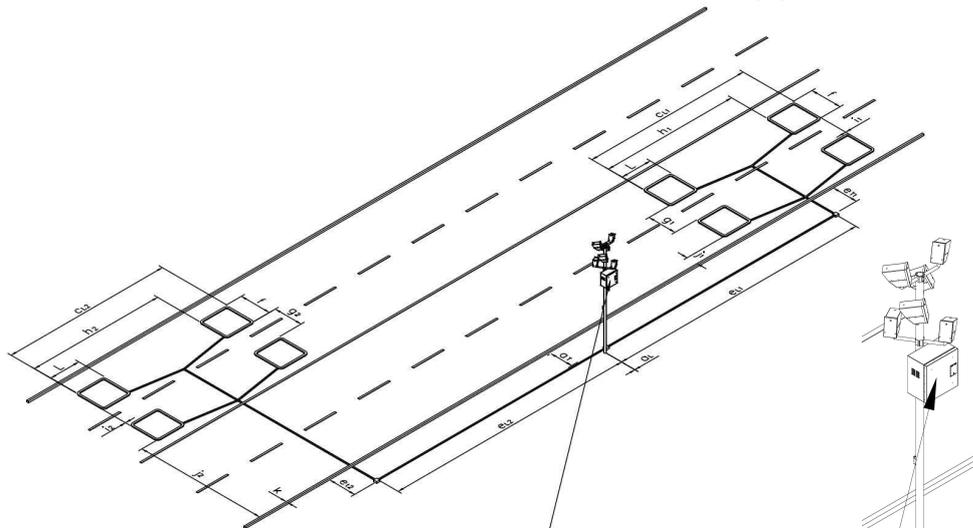
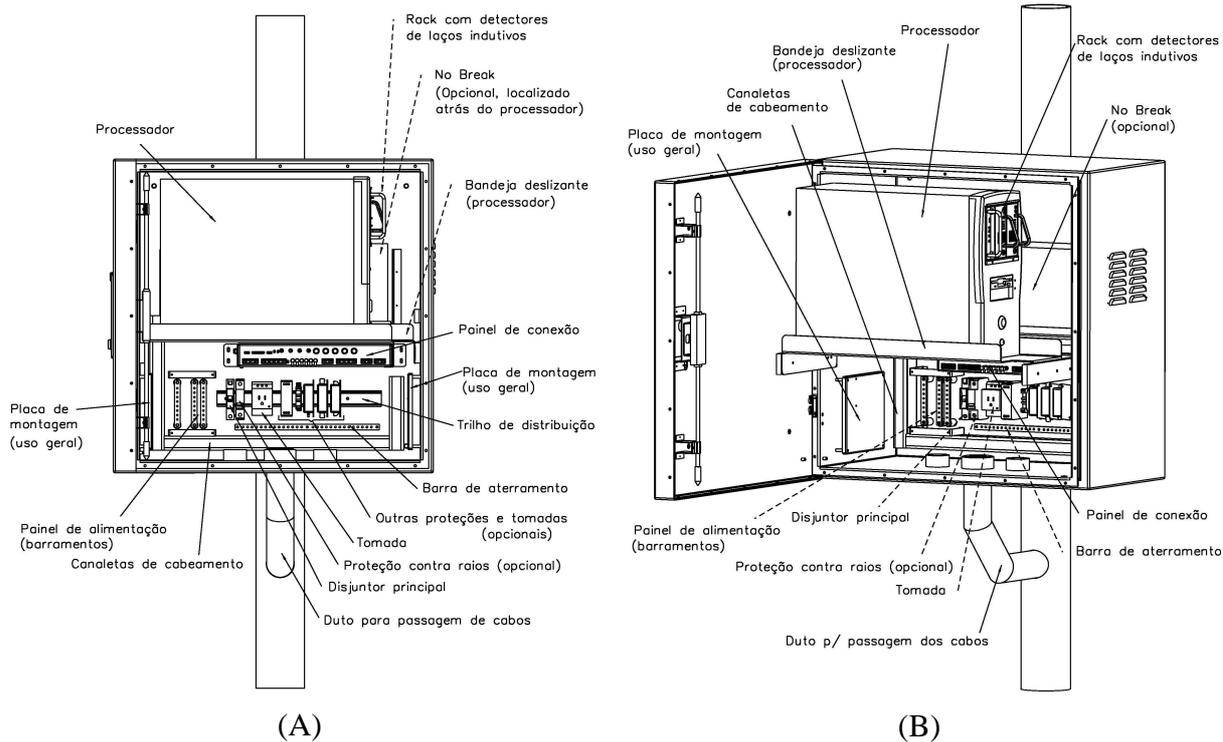


Figura 4-2: Visualização esquemática da instalação civil/mecânica dos componentes principais do MVFV. A caixa do processador pode ter poste exclusivo ou fazer uso mútuo com os registradores / iluminadores.



Poste do processador com registro e iluminação

Equipamentos	Cota
Processador e registradores / iluminadores locais	a _L
	a _T
Registros / iluminação remotos	b _L
	b _T
Laços indutivos – caixa de distribuição	e ₁₁ /e ₁₂
	e ₂₁ /e ₂₂
Exclusão de meio fio	k

L = Longitudinal T = Transversal

Laços indutivos		Cota
Região dos laços indutivos	Comprimento Longitudinal	c ₁₁ /c ₁₂
	Deslocamento lateral na via (*)	j ₁ /j ₂
Laço indutivo	Comprimento	L
	Largura	f
Distância entre laços	Lateral (*)	g ₁ /g ₂
	Medida de velocidade	h ₁ /h ₂
	Deslocamento relativo (*)	i ₁ /i ₂

(*) – Valores dependentes da largura de faixa

(C)

Figura 4-3: (A) Vista frontal da caixa do processador, (B) Vista em perspectiva da caixa do processador. (C) Ilustração de instalação em campo, mostrando neste caso particular a possibilidade de intercalação dos laços indutivos para cobertura fechada de uma região da via de tráfego em configuração “armadilha de velocidade”.

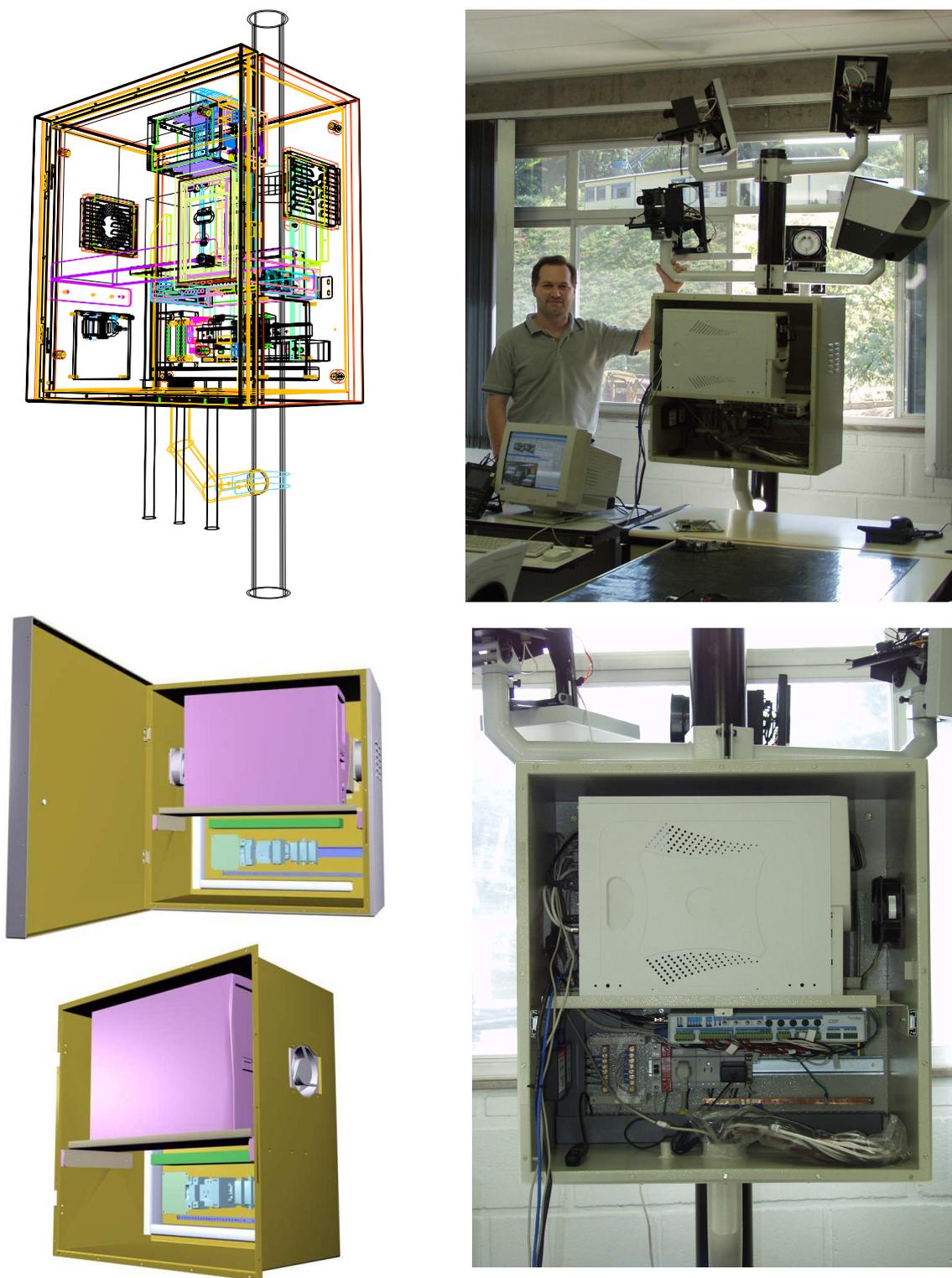


Figura 4-4: Caixa da CPU e mini-estrutura de sustentação: o equipamento teve sua estrutura mecânica (caixa, postes, etc.) totalmente projetada neste trabalho, inclusive a mini-estrutura para testes de desenvolvimento em laboratório. Nesta figura estão mostrados: detalhe de projeto como as simulações 3D da caixa da CPU com parede dupla e as fotos correspondentes após montagem.

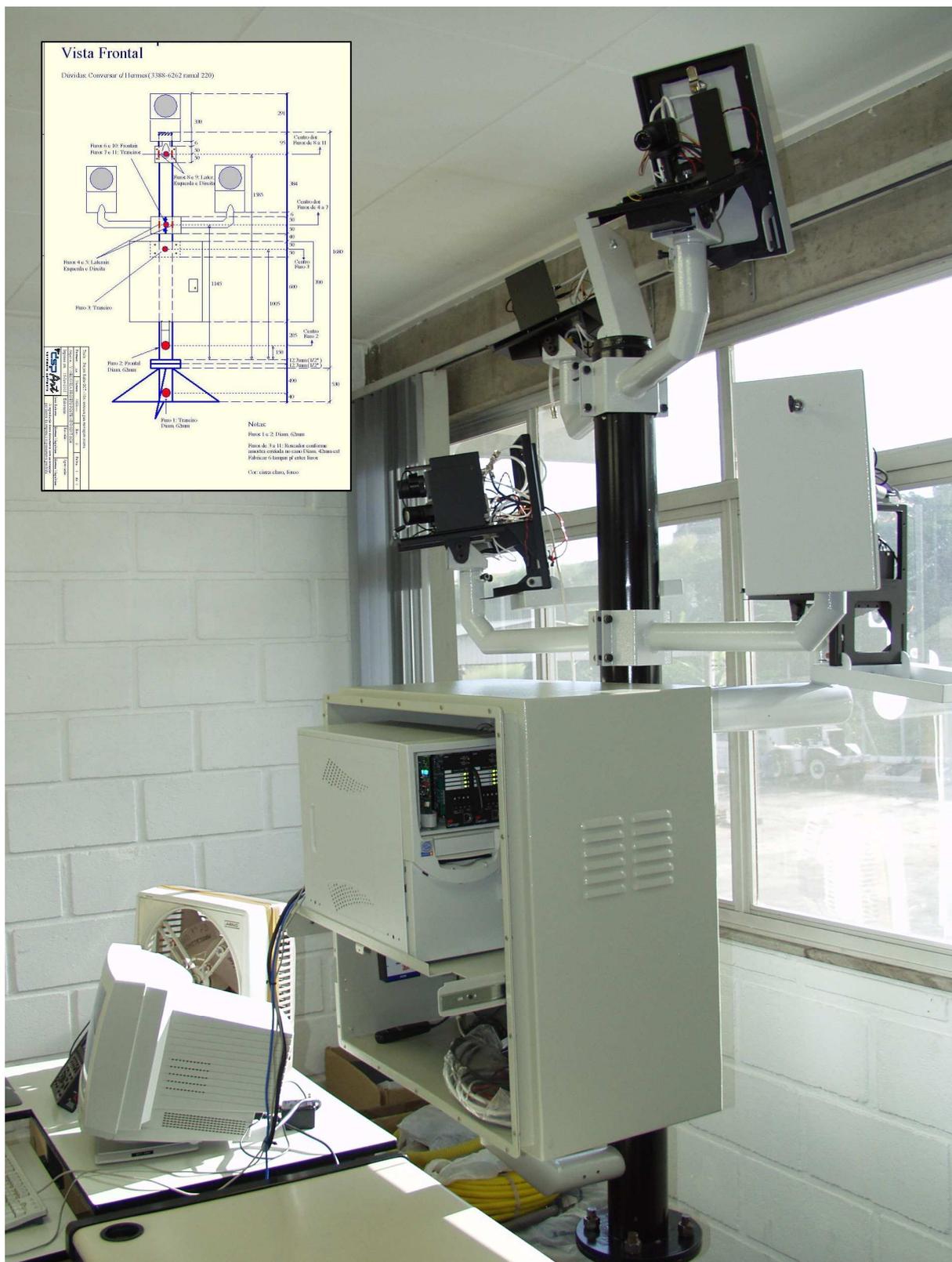


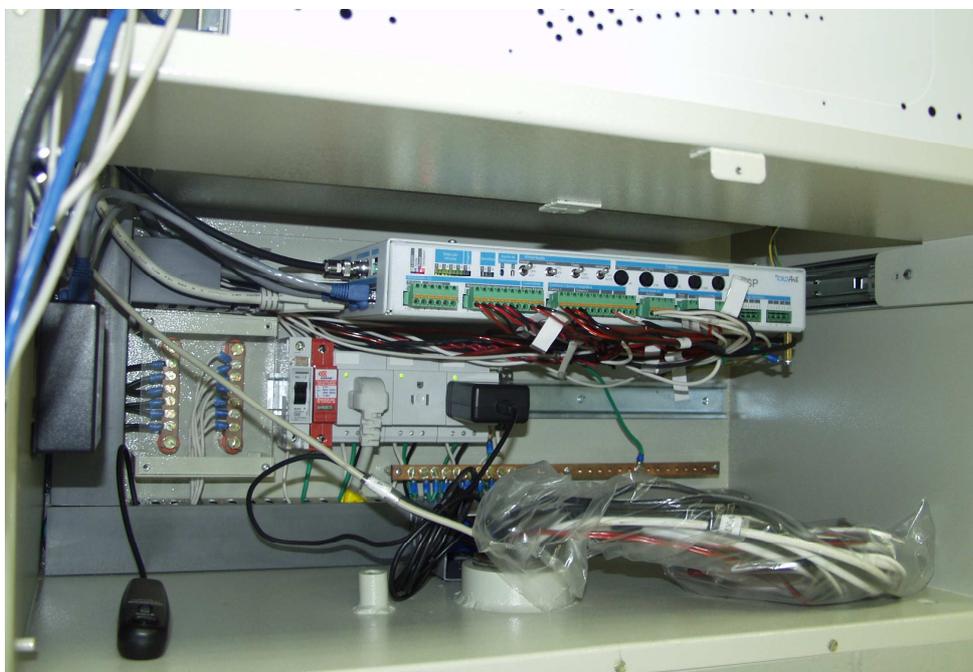
Figura 4-5: Vista geral do protótipo do equipamento detector e registrador de veículos montado em mini-estrutura para desenvolvimento. Pode-se ver a CPU dentro de sua caixa, colocada sobre trilho deslizante. Pode-se ver também o rack de detectores ocupando o local das baias frontais do gabinete do PC. As caixas de câmeras e flash estão logo acima da caixa da CPU, onde se vêem os braços de sustentação por onde caminha o cabeamento. No detalhe, o projeto da mini-estrutura.



Figura 4-6: Visão geral do protótipo de registro de veículos mostrando a mini-estrutura de desenvolvimento, caixa da CPU e das câmeras/flash (com uma das caixas de câmera fechada) e interface homem-máquina (software) para ajuste de câmeras no monitor.



(A)



(B)

Figura 4-7: Detalhes da montagem do protótipo registrador de veículos. (A) CPU, rack com detectores e placa de monitoração e controle (MCB); (B) Detalhes de montagem abaixo da bandeja da CPU: à direita embaixo: barramento de terra e trilho DIN com disjuntor, proteções, tomadas e filtros; à esquerda, barramentos de distribuição AC protegidos por tampa acrílica; acima o painel de conexões e sinalização (CSP).



Figura 4-8: Detalhe da parte superior da mini-estrutura mostrando braços de sustentação e caixas de câmera aberta e fechada.

4.1 Caixa Principal

Acompanhe as descrições que se seguem consultando, sempre que julgar necessário, o diagrama de blocos da Figura 4-1, as ilustrações na Figura 4-2 e na Figura 4-3 e as fotos anteriores, para manter-se situado na arquitetura do sistema. Na foto da Figura 4-5 vemos um mini-poste construído para operação em laboratório, no qual foram fixadas uma caixa principal (caixa da CPU) e acima dela as caixas de câmeras e flash. A caixa principal é aquela que comporta a CPU e painel de conexões e sinalização. Todas estas caixas e a mini-estrutura foram inteiramente desenvolvidas para este protótipo. A caixa principal tem ventilação e parede dupla, externa de alumínio e interna de aço, para resistir às intempéries e permitir isolamento térmica entre elas (Figura 4-4). As caixas de câmeras são detalhadas na Seção 4.2.

4.1.1 CPU

Note que o protótipo usa um PC²⁵, onde as baias de CD foram usadas como compartimento para um *rack de detectores* onde são instaladas as placas detectoras de veículo (*slots* à direita no *rack*) e a Placa de Monitoração e Controle ou MCB (placa posicionada no *slot* mais à esquerda no *rack*). Este *rack* possui um painel traseiro por onde se realizam as conexões elétricas de comunicação, controle, sinalização e alimentação dos dispositivos periféricos, via painel de conexões e sinalização²⁶. O painel CSP fica localizado abaixo da bandeja deslizante que sustenta o PC, conforme mostra a Figura 4-7B, foto inferior). Os dispositivos periféricos são os registradores (câmeras de vídeo e/ou fotográficas digitais), iluminadores (flashes) e sensores a laço indutivo. Suas portas USB podem ser usadas para conectar até duas câmeras fotográficas digitais ou um “*pen-drive*” para coleta de registros em campo, ou ainda para comunicação com alguns modelos de detectores veiculares. O PC contém ainda uma placa de captura de vídeo (ou “*frame grabber*”), que além de possuir quatro canais para aquisição e digitalização das imagens, possui 13 portas digitais de I/O programáveis.

²⁵ No caso o PC utilizado é configurado com uma CPU Pentium IV de 1,8GHz, 512MB de RAM e HD de 100GB, mostrado com mais detalhe na Figura 4-7A.

²⁶ O *rack* de detectores é mostrado separadamente mais adiante na Figura 4-11D, página 74. Da mesma forma, a *Placa de Monitoração e Controle – MCB* – é mostrada na Figura 4-10, página 73. O *Painel Traseiro – DRP* – é mostrado na Figura 4-11B,C na página 74). O *Painel de Conexões e Sinalização – CSP* – pode ser visto na Figura 4-12, página 76).

A caixa da CPU contém abaixo do painel CSP um trilho DIN com disjuntor, proteções, tomadas e filtros (Figura 4-7B). Abaixo deste trilho vemos o barramento de terra para equalização de potencial. Embaixo e do lado esquerdo estão os barramentos de distribuição de fase e neutro, protegidos por placa de acrílico transparente. Atrás do PC existe ainda uma bandeja fixa para instalação de “No-break”.

A CPU executa o software “*Servidor*”, que é responsável pela operação autônoma do equipamento, bem como de ações motivadas por solicitações do “*Cliente*”, que implementa a interface homem-máquina. O software cliente pode ser operado local ou remotamente, via IP. Ambos estão sendo desenvolvidos em linguagem orientada a objetos, C++ em ambiente Windows XP utilizando compilador Borland C++ Builder 6.0. Os softwares servidor e cliente são descritos de forma sucinta no Capítulo 5.

4.1.2 Parametrizador

A porta paralela do PC é utilizada para conexão do “*parametrizador*”, assim denominado por guardar, em memória não volátil, os parâmetros de aferição do equipamento após instalação em campo. O parametrizador é mostrado na Figura 4-9. Uma vez aferido o equipamento, este dispositivo é protegido contra escrita e selado. Os parâmetros nele guardados são referidos no software como *parâmetros protegidos*.



Figura 4-9: Parametrizador. (A) Placa em estágio inicial de desenvolvimento e placa final montada. (B) Caixa fechada.

4.1.3 Placa de Monitoração e Controle (MCB)

A placa de monitoração e controle (MCB), mostrada na Figura 4-10, é responsável por concentrar as informações de detecção de veículos geradas pelos detectores de laço indutivo e encaminhá-las para a CPU, via interface de I/O auxiliar existente na placa de captura de vídeo. A MCB também transforma os sinais digitais de comando de disparo de câmeras fotográficas e flashes em sinais opticamente isolados, encaminhando-os para os periféricos citados via painel de conexões e sinalização (painel CSP). Ela também incorpora circuito sensor de temperatura para comando de acionamento automático dos ventiladores da caixa principal em caso de necessidade, gerando também neste caso comandos isolados opticamente para o painel de conexões. A placa MCB inclui ainda circuito de Watch-dog para reset de todos os componentes do equipamento em caso de travamento do mesmo, bem como duas entradas digitais para sensoriamento de semáforos vermelhos.

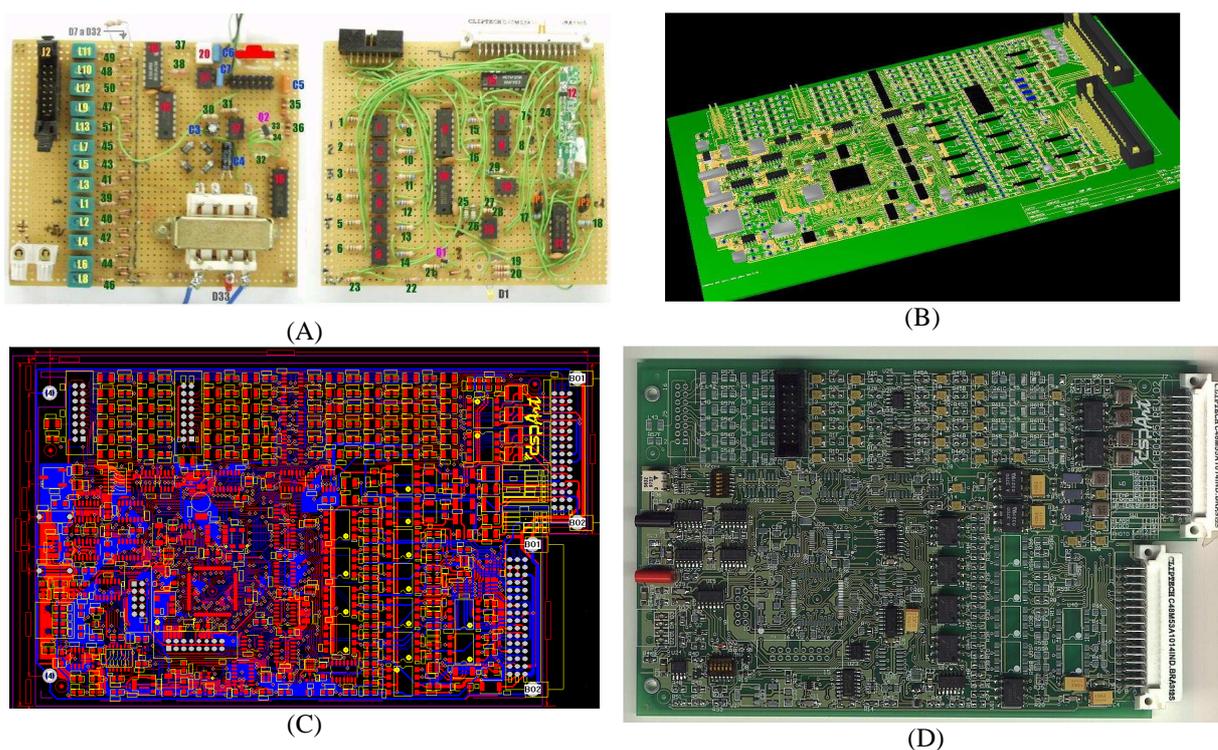


Figura 4-10: Placa de Monitoração e Controle (MCB). (A) Estágio inicial de desenvolvimento da placa MCB em placa de prototipagem. (B) Visão 3D da placa durante o projeto da versão final. (C) Circuito impresso da placa MCB. (D) Placa MCB montada.

Embora não tenha sido montado e testado, existe também no projeto da placa um circuito utilizando EPLD, relógio de tempo real com super-capacitor para retenção de informação e memória flash para armazenamento de informações localmente. Esta parte do circuito

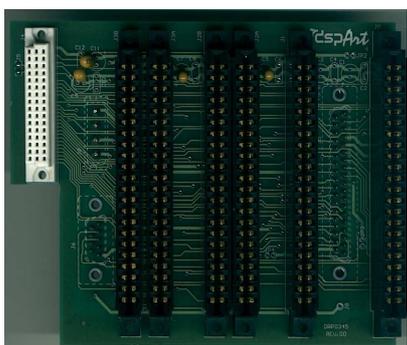
(componentes não montados na placa mostrada na Figura 4-10D) permitirá a expansão futura do equipamento para monitoração de até 16 laços indutivos, bem como contagem de tempo entre detecções para medição de velocidade usando detectores que não têm comunicação serial disponível e adição de mais duas entradas digitais para sensores de semáforo vermelho, além das duas já existentes.

4.1.4 Rack de Detectores (DRP)

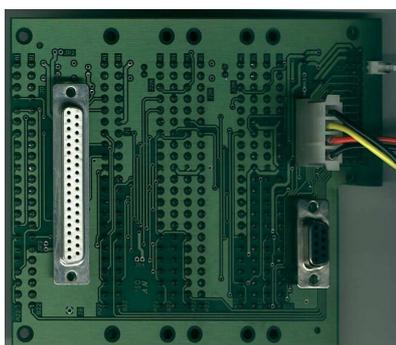


(A)

Figura 4-11: Rack de detectores de veículos. (A) Primeiro rack montado usando esquadrias de alumínio e blocos de engate rápido. (B) e (C) placa traseira do rack (placa DRP), lado de componentes e solda, respectivamente. (D) Rack atual mostrando detectores de veículos à direita e placa MCB à esquerda.



(B)



(C)



(D)

O painel traseiro do *rack* de detectores (DRP) foi originalmente concebido para respeitar o padrão de detectores de veículos descrito na norma NEMA TS-2/1998 [71]. Desta forma, tanto podemos utilizar detectores de veículos comercialmente disponíveis, como podemos projetar nosso próprio detector compatível com tal padrão (em um segundo momento). Os primeiros testes foram realizados em um *rack* artesanal, construído com esquadrias de alumínio e conexões elétricas realizadas por blocos de engate rápido tipo Krone (Figura 4-11A). Após testes preliminares utilizando as placas de monitoração e controle também em estágio artesanal (Figura 4-10A), foi projetado e montado o painel traseiro em sua versão final (Figura 4-11B e C), bem como a estrutura mecânica do *rack*, de forma a caber dentro da região de baias de CD do gabinete do PC (Figura 4-11D).

Na sua parte traseira, o *rack* tem um conector DB37 para conexão dos laços indutivos, com capacidade atual de até 8 laços, com possibilidade de ligação de até 16 laços caso seja implementada a região de expansão prevista na placa MCB. Ele conta ainda com um conector de alimentação para ser ligado à fonte do PC e um conector DB9 usado para comunicação serial com os detectores de veículos, que pode ser padrão RS-232 ou RS-485.

4.1.5 Painel de Conexões e Sinalização (CSP)

O Painel de Conexões e Sinalização (CSP – Figura 4-12) é composto por duas placas, uma superior – CSPU e uma inferior – CSPD, cujos circuitos impressos podem ser vistos na Figura 4-12 F e G respectivamente. A placa CSPU contém na parte frontal os fusíveis, chaves e LEDs indicadores de “*passagem de veículo*”, “*registro de imagem*”, “*temperatura alta*”, “*reset*” e “*ligado*”; na parte lateral contém conexões de sincronismo entre câmera de vídeo e flash (conectores BNC), conector para sensor externo de temperatura (conector Phoenix de duas posições) e conector mini-euro com os sinais do cabo de controle, que se liga diretamente à placa MCB no *rack* de detectores. A placa CSPD contém em sua lateral esquerda um grupo de quatro conectores RJ45 (um para cada slot de detectores no *rack*) que recebem os cabos alimentadores ligados aos sensores laços indutivos instalados na via de tráfego. Na mesma lateral esquerda, um conector DB37 faz a ponte destes sinais para o PC, encaminhando-os ao *rack* de detectores. Na parte frontal, a placa CSPD contém conectores para distribuição de alimentação DC para até quatro câmeras de vídeo e alimentação AC para dois ventiladores, dois flashes e duas máquinas fotográficas digitais. Constam também do painel frontal os conectores de comando e confirmação de disparo das câmeras fotográficas digitais e flashes. Algumas funções dos circuitos do painel CSP incluem condicionamento do sensor de luminosidade ambiente (instalado na caixa de câmera) com comando de interrupção da alimentação dos flashes durante período de disponibilidade de iluminação natural, assim como do circuito de alimentação dos ventiladores a partir de comando de superaquecimento vindo da placa MCB.

Os circuitos de comutação AC foram implementados usando opto-triacs com detecção de cruzamento pelo zero para diminuir a emissão de contaminação eletromagnética dos circuitos digitais e de sincronismo de vídeo. Um detalhe da região do circuito de sincronismo de vídeo é mostrado na Figura 4-12-E em vista 3D.

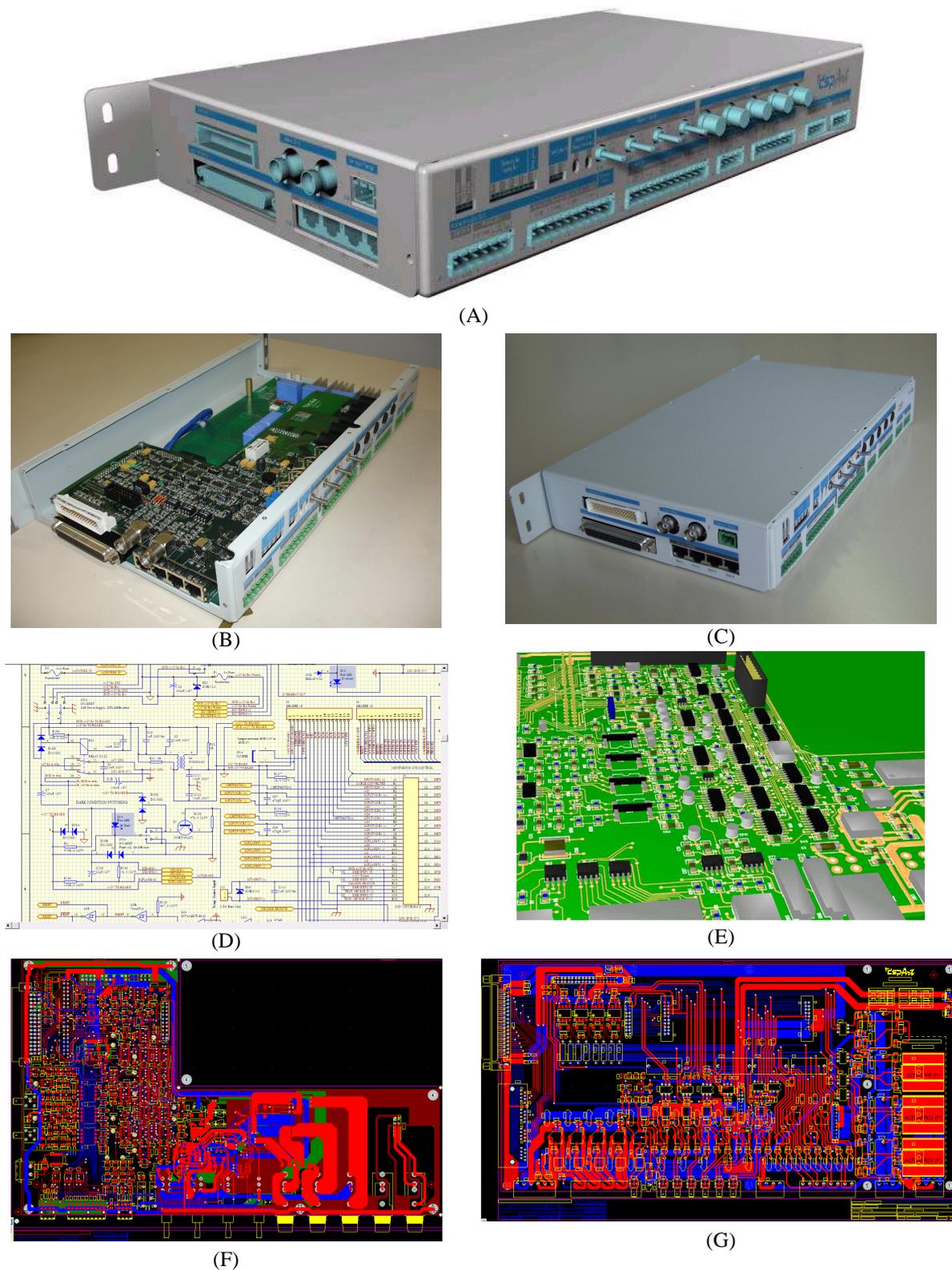


Figura 4-12: Painel de Conexões e Sinalização (CSP): (A) visão 3D obtida durante o projeto mecânico; (B) painel aberto; (C) painel fechado; (D) Detalhe esquemático da placa superior; (E) Detalhe em 3D mostrando o circuito de sincronismo de vídeo; (F) PCB da placa superior (CSPU): fusíveis, chaves e LEDs, conexões de sincronismo de vídeo, sensor externo de temperatura e conector de sinais de controle de/para a CPU; (G) Placa inferior (CSPD): distribuição de energia AC/DC e conexões de comando provenientes dos equipamentos remotos e laços indutivos

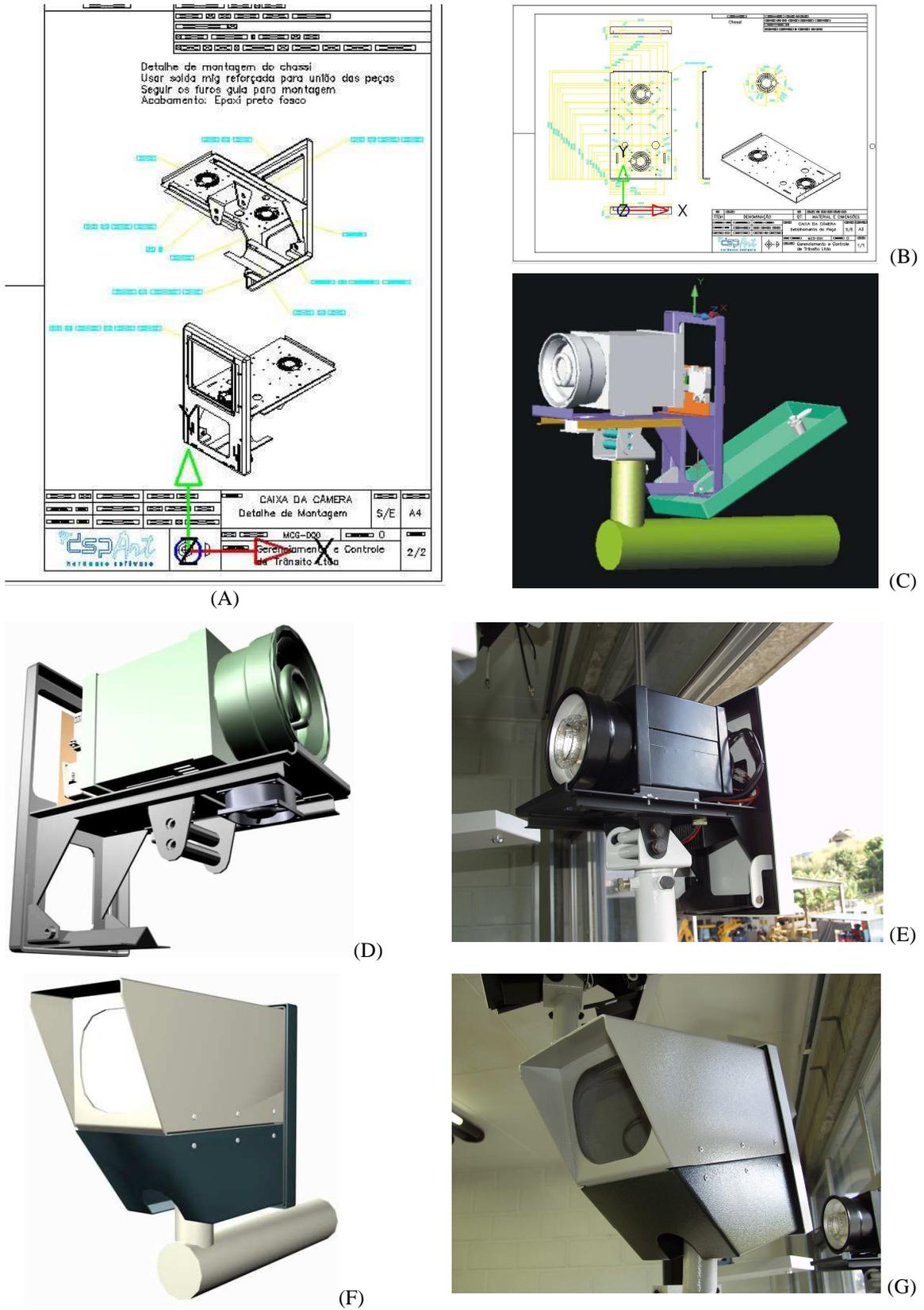


Figura 4-13: Caixa de câmeras de vídeo/fotográfica/flash mostrando montagem do flash. (A) e (B) Detalhes de desenhos de projeto para fabricação; (C) e (D) simulação 3D durante o projeto com a caixa aberta; (E) realização do projeto mostrando flash montado; (F) simulação 3D com a caixa fechada; (G) foto da caixa fechada.

4.2 Caixa de Câmeras e Flash

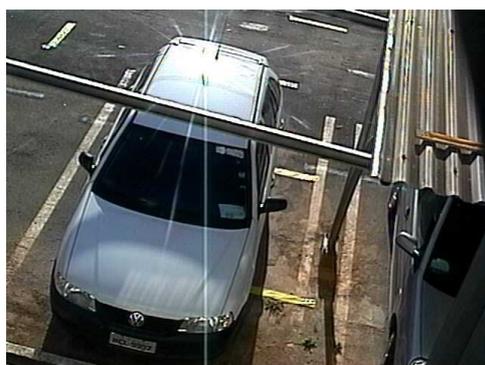
A Figura 4-8 na página 70 trouxe foto com detalhe da parte superior da mini-estrutura, onde estão instaladas cinco caixas de câmeras e flash. O projeto da caixa foi concebido para comportar em seu interior o flash ou até duas câmeras de vídeo ou uma câmera fotográfica digital profissional. A caixa tem articulação em *azimute* e *tilt*, com fixação posterior ao posicionamento desejado, tampas superior (com visor transparente), inferior (cinza escuro) e traseira com fechadura, montadas nesta ordem. Após montagem, as fixações das articulações ficam inacessíveis, impedindo a mudança de orientação das caixas por pessoas não autorizadas. A Figura 4-13 ilustra o processo de desenvolvimento da caixa com exemplos de desenhos de fabricação (A-B-C) e mostra como exemplo o flash montado (D-E) e a caixa fechada (F-G). A caixa conta também com dois ventiladores para evitar aquecimento dos equipamentos acima de sua temperatura de trabalho e suporte para sensor de luminosidade próximo ao visor (previsto apenas para as caixas com câmeras). Este sensor é responsável por comandar o desligamento da iluminação artificial quando há iluminação natural disponível.

4.3 Câmeras e Dispositivos Iluminadores

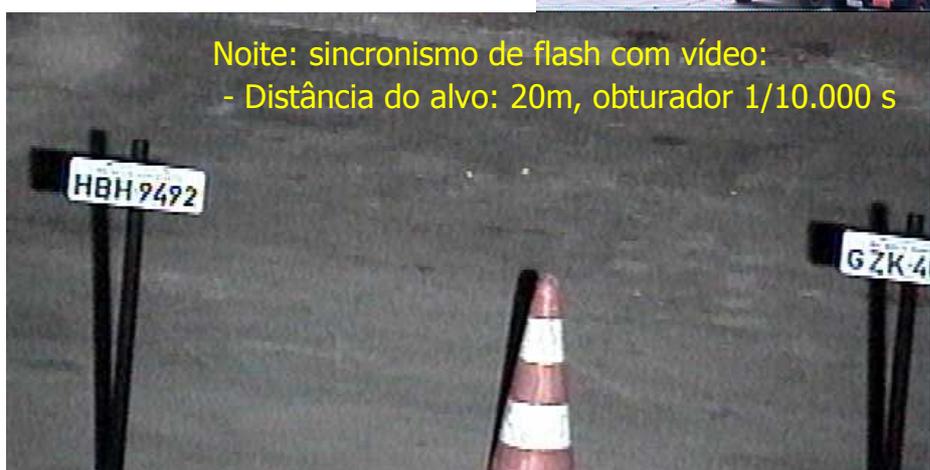
No painel de conexões descrito na Seção 4.1.5, como foi visto, dois circuitos de extração de sincronismo de vídeo foram incluídos (um para cada sentido da via de tráfego) para tornar possível a sincronização entre a abertura do obturador das câmeras de vídeo e o disparo do dispositivo iluminador ou flash. Adicionalmente, foram levadas em conta as considerações descritas na Seção 2.5.1 para se obter uma boa imagem dos veículos em movimento nas condições de iluminação agressivas encontradas em ambientes externos e vias de tráfego²⁷. A Figura 4-14 exemplifica o acerto na especificação e projeto do sistema de captura de vídeo, pois mostra resultados satisfatórios obtidos em condições extremas. Note como o ofuscamento pelo sol durante o dia não impede a visualização do restante da imagem. Note também como o registro da imagem durante a noite a uma grande distância – 20 metros – é feito com qualidade, graças à sincronização entre vídeo e flash, mesmo com uma velocidade

²⁷ Uma descrição mais detalhada das características das câmeras usadas, bem como dos iluminadores e circuito de sincronismo, foram propositalmente omitida aqui, por fugirem ao escopo deste trabalho e para preservar o sigilo industrial envolvido.

do obturador extremamente alta, a 1/10.000 segundos. Temos assim uma folga no sistema que pode ser usada, por exemplo, para aumentar a distância até o alvo, uma vez que para se fotografar veículos em movimento, pratica-se usualmente uma velocidade de obturador de 1/500 segundos.



Dia: ofuscamento (alta faixa dinâmica)



Data: 14/06/2005 Hora: 20:03:38 Velocidade: 0.00 km/h
Local: GCT // Surface: 75d40002 Diff: 0044 Flag: 0x000a2

Figura 4-14: Resultados alcançados pelo sistema de captura de imagem: a alta faixa dinâmica da câmera lida bem com situações de ofuscamento (note como é possível ver a cor do céu e algumas nuvens). O sincronismo entre o flash e o obturador da câmera de vídeo permite uma boa imagem, mesmo a 20 m e com obturador a 1/10.000 s. Há, portanto, folga para capturar objetos em movimento a distâncias maiores, bastando para isso aumentar o tempo de exposição.

SÍNTESE

Uma vez apresentado aqui o hardware do equipamento construído para coleta de dados reais em campo, a seguir no Capítulo 5 descrevemos seu software, incluindo os *frameworks* genéricos – construídos para possibilitar delegação de tarefas e operação distribuída – assim como o software de coleta de dados via conversão A/D a altas taxas de amostragem.

5 Descrição do Software

O diagrama de blocos visto anteriormente na Figura 4-1 mostra que o “Processador” (ou CPU) do equipamento MVFV – Medidor de Velocidade e Fluxo Veicular – roda o software “*Servidor*”, descrito a seguir na Seção 5.1. Este software é o responsável pela operação autônoma do MVFV, executando em tempo real as ações de registro de perfis magnéticos, medição de velocidade e captura de imagem estática ou de vídeo do veículo correspondente, quando da sua passagem pelos laços indutivos.

O “*Servidor*” do MVFV foi construído dentro da filosofia de “*Desenvolvimento por Modelos*” (MDD – “*Model-Driven Development*” [27]), usando orientação a objetos e notação UML 2.0 utilizando a ferramenta “Enterprise Architect” da Sparx Systems. Alguns aspectos inovadores de sua arquitetura interna são descritos na Seção 5.1. O compilador utilizado foi o Borland C++ Builder 6.0 rodando sobre sistema operacional Windows XP. Foram extensivamente utilizadas técnicas de programação “*multithreading*”²⁸, funções de “*callback*” e “*delegates*”, este último item implementado via “*templates*” para tornar a infraestrutura do software (ou “*framework*”) genérica, ágil, segura, com ações rastreáveis em tempo real. O resultado é um menor tempo de desenvolvimento, um maior desacoplamento entre suas partes componentes e uma maior eficiência computacional. Preservamos assim potência computacional para futuras implementações mais pesadas, que venham a incluir processamento de vídeo, por exemplo.

O “*Servidor*” conta com uma interface de uso local simplificada, e também responde às requisições remotas de unidades rodando o software “*Cliente*”, que conta com uma interface homem-máquina mais elaborada²⁹. Ambas as interfaces encontram-se descritas de forma sucinta no Apêndice B. A Seção 5.2 traz a descrição do software desenvolvido para captação pela placa A/D dos perfis magnéticos em altas taxas de amostragem utilizando DMA – *Direct Memory Access*, feita concomitante com a captação convencional realizada pelo Servidor do

²⁸ *Multithread*: característica de arquitetura de um processo onde existem vários fluxos internos de processamento simultâneos, em esquema de tempo compartilhado e ou em ambiente multiprocessado.

²⁹ O software e sua documentação foram desenvolvidos em língua inglesa (com exceção das interfaces homem-máquina), para promover a universalização de sua compreensão e uso.

MVFV via comunicação serial com o detector de veículos comercial. O algoritmo de análise espectral dos perfis magnéticos usando a técnica de alta resolução MUSIC/EV é apresentado em notação matemática formal no Apêndice A, tendo sido implementado em linguagem de programação do pacote matemático MATLAB.

5.1 Arquitetura

O estado da arte no processo de desenvolvimento de software para sistemas de tempo real reside em um pequeno número de princípios listados na Tabela 5-1 a seguir [27]:

Tabela 5-1: Princípios de Qualidade para Processos de Desenvolvimento de Software para Sistemas de Tempo Real [27]

1. *Desenvolvimento iterativo* – baseia-se no conceito de construção incremental, i.e., a construção de um sistema complexo é feita a partir de uma série de sistemas menores, mais fáceis de construir e testar, com a vantagem de alcançarem a fase de testes muito mais cedo no processo de desenvolvimento do que o sistema completo.
2. *Uso de Modelos* – sistemas complexos e de grande porte não podem ser construídos de forma efetiva e com qualidade contando-se apenas com construções de software ao nível dado pelas linguagens de programação. Modelos abstratos permitem-nos pensar e conceber o sistema no nível de sua aplicação, ao invés de fazê-lo no nível de sua implementação.
3. *Associação Biunívoca entre Modelo e Código* – é crucial que o código e os diagramas UML sejam diferentes visualizações de um mesmo modelo, preservando a sincronia entre documentação e código.
4. *Modelos Executáveis* – somente podemos testar sistemas que executam – portanto, modelam-se prioritariamente partes executáveis, sempre o mais cedo possível e o mais frequentemente possível.
5. *Depurar e Testar no Nível de Abstração do Modelo* – em sistemas altamente complexos, buscam-se formas de oferecer testes de depuração no nível da concepção do modelo. Por exemplo, para o ser humano é muito mais amigável e natural simular uma máquina de estado transitando entre seus estados lógicos do que executar cada linha de código passo a passo no código fonte correspondente.
6. *Teste o que você gerou e gere o que você testou* – o propósito de construir e testar modelos executáveis é desenvolver de forma rápida aplicações livres de defeitos e obedecendo a todos os requisitos funcionais e de desempenho. Ao buscar a tecnologia apropriada que lhe permita alcançar este objetivo com confiança, explore suas possibilidades e limitações, de forma que *o teste formal precise ser feito apenas uma vez*.

Um *modelo* é um conjunto integrado de abstrações e suas relações internas. Eles são constituídos de duas partes principais: um conjunto de elementos abstratos (as *metaclasses*, i.e., uma sintaxe para representar e visualizar estes elementos e suas inter-relações) e um “*framework*” semântico que especifica o significado preciso destes elementos.

A arquitetura de classes do software servidor foi elaborada desde o início usando notação UML – *Unified Modeling Language* – um conjunto padronizado de diagramas com notação

formalmente definida, adotado na área de engenharia de software em um esforço para facilitar a concepção de sistemas orientados a objetos. Sua adoção reforça a prática de desenvolvimento na qual os modelos abstratos se concretizam ainda no nível da aplicação ou da tarefa (em contraposição à construção de sistemas no nível de programação). Esta abordagem incentiva ainda a documentação do sistema durante a sua construção, facilitando também a manutenção da sincronia do modelo abstrato com o respectivo código fonte quando das modificações e atualizações posteriores, desde que adotadas ferramentas com a tecnologia apropriada. As especificações UML podem ser consultadas em [78] e [79]. Recomenda-se ler [82] para uma visão geral mais didática da UML, ou [27] se o foco for implementação em tempo real.

Um modelo pode ser composto de várias formas de *visualização*. Um diagrama de classes UML pode mostrar certo número (subconjunto) de classes e a inter-relações entre elas para realizar um caso de uso específico do software, por exemplo. Outro diagrama de classes pode ser usado para mostrar as mesmas classes em uma taxonomia de generalização. Outro diagrama pode mostrar as mesmas classes no domínio da aplicação, ou seja, como os objetos de interesse interagem em um cenário específico em tempo de execução. As restrições de comportamento de uma classe podem ser mostradas em um diagrama de estados ou em um diagrama de temporização, por exemplo.

A adoção dos princípios de qualidade citados, aliada ao desenvolvimento por modelos, resulta em arquiteturas que privilegiam a modularização, o reaproveitamento de código, a facilidade de migração para outras plataformas, linguagens e sistemas operacionais, a flexibilidade para inclusão de outros tipos de sensores de veículos, o agrupamento de protocolos de comunicação em classes específicas e o uso de interfaces (classes abstratas) entre blocos com funções de controle e blocos de comunicação e gerência.

O enfoque apresentado a seguir não tem a pretensão de descrever em detalhes a arquitetura do software, mas apenas focar em alguns aspectos pontuais considerados de maior relevância para destacar as contribuições deste trabalho ao público acadêmico.

5.1.1 Modelo Preliminar para Testes

Na primeira etapa da construção do software, seguindo-se o princípio do desenvolvimento incremental (princípio 1 na Tabela 5-1 acima), foram concebidos e implementados módulos

individuais para executar tarefas específicas como captura de imagem de vídeo, detecção de veículos, comunicação via porta serial, leitura e escrita SPI via porta paralela o parametrizador, etc. Cada um destes módulos foi disposto em uma hierarquia de classes e suas funcionalidades e interdependências foram estabelecidas, como mostra a Figura 5-2 (para este diagrama, foi usada excepcionalmente a ferramenta UML denominada *Togheter* da Borland).

As classes *EuresysPicoPro2*, *PicoPro2Imaging* e *PicoPro2Channel* à direita no diagrama, por exemplo, compõem o conjunto de classes responsável pela captura de imagens de vídeo em seus diversos aspectos de abstração. Ou seja, as classes citadas abstraem, respectivamente, a placa de captura de vídeo como um todo – que também inclui outras funcionalidades como entradas e saídas digitais de uso geral, por exemplo – a parte da placa dedicada à captura de imagens, e finalmente os canais de vídeo (até quatro por placa). Uma estrutura similar é formada pelas classes *CanogaC800* e *CanogaC800Channel* (à esquerda no diagrama), onde a primeira abstrai a placa detectora de veículos e a segunda abstrai até quatro canais de detecção por placa (correspondentes aos laços indutivos). Estes módulos são executados em diferentes fluxos simultâneos de processamento (ou *threads*) que se relacionam em um mesmo ambiente de aplicação sob a coordenação da classe *DeviceManager*³⁰. A comunicação entre módulos algumas vezes utiliza chamadas síncronas (chamadas diretas das funções ou métodos) ou assíncronas (usando filas), ou ainda usando portas e protocolos de comunicação, como ocorre na comunicação com os detectores de veículos nas classes *CanogaMasterPort* e *CanogaTaskManagerThread*. Outras vezes utilizam funções de *callback*, como na classe *HardwiredComPort* que concentra as chamadas de retorno de eventos gerados automaticamente pela placa de captura de vídeo, etc. Os objetos ativos (*threads*) são indicados na Figura 5-2 como herança da classe *TThread* (indicada no alto à direita da caixa de classes).

Para desenvolver separadamente e testar estes módulos ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento, foram definidas classes abstratas de *interface* entre eles. Como exemplo podemos citar as classes *ImagingDeviceInterface* e *LaneDetectorInterface*. As classes tipo *interface* permitem declarar a assinatura dos métodos a serem implementados nos estágios iniciais do desenvolvimento (antes dos métodos serem realmente implementados), permitindo

³⁰ A classe *DeviceManager* é mais tarde substituída pelo mecanismo de delegação descrito na Seção 5.1.2.

a separação de equipes de desenvolvimento em diferentes grupos, como os que vão implementar os serviços, os que vão testá-los e os que vão desenvolver módulos que irão usá-los, por exemplo. Para facilitar o teste dos módulos, individualmente e em funcionamento conjunto, foi construída a interface homem-máquina mostrada na Figura 5-1.

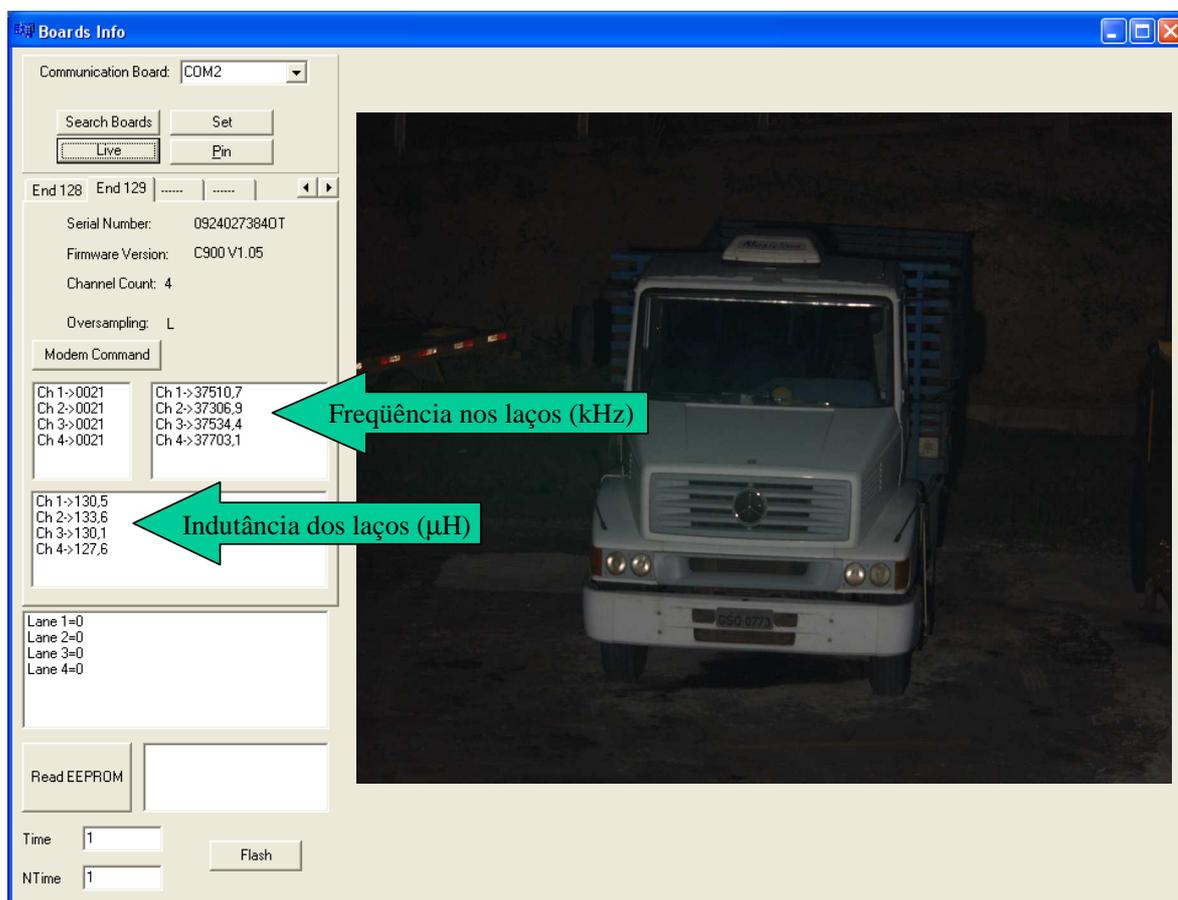


Figura 5-1: Interface de teste dos módulos de software do MVFV. Com ela é possível monitorar a frequência e indutância dos laços indutivos, a imagem das câmeras de vídeo, testar o iluminador (flash), ler o conteúdo do parametrizador (EEPROM), bem como ligar e desligar pinos digitais de E/S existentes na placa de captura de vídeo.

Nesta fase do desenvolvimento, todas as etapas desde a detecção veicular até a medição de velocidade e captura de imagem (com sincronismo entre abertura do CCD da câmera de vídeo e o iluminador ou *flash*) foram testadas com sucesso e integradas.

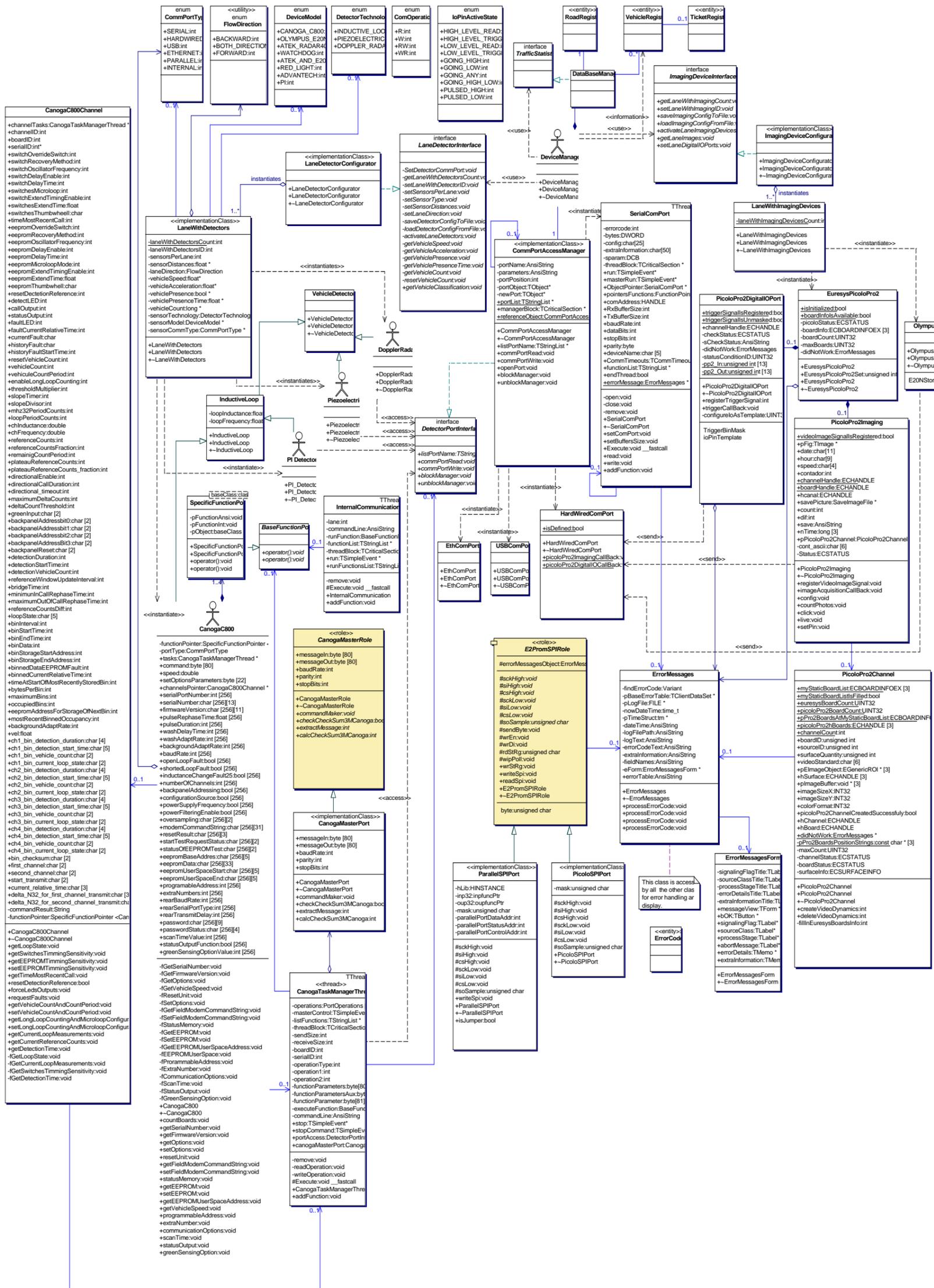


Figura 5-2: Diagrama de classes ³¹ do software de teste do equipamento em notação UML – *Unified Modeling Language* ³²; padrão que define regras e notações para concepção, especificação e realização de software.

³¹ Em notação UML, uma classe em um diagrama de classes é representada por um bloco (ou caixa) de três compartimentos que contêm o nome da classe, seus atributos (variáveis) e seus métodos (procedimentos).

³² Para especificações da UML, consulte [78] e [79]. Para se ter uma visão didática sobre UML, recomenda-se a leitura de [27] e [82].

5.1.2 Mecanismo de Delegação de Serviços

Na descrição do programa de teste na seção anterior, citamos a classe “*DeviceManager*” como aquela responsável pela coordenação das operações simultâneas realizadas nos diversos fluxos de processamento (ou *threads*) existentes na aplicação em execução. Esta arquitetura onde a coordenação dos *threads* está concentrada em uma única classe é uma simplificação, adequada apenas à concepção inicial de um software preliminar de teste. A arquitetura de gerenciamento de execução dos serviços foi revista, de forma a incorporar os requisitos elencados a seguir, considerados pelo autor como essenciais a um sistema de tempo real moderno:

Tabela 5-2: Requisitos da Estrutura do Software de Gerenciamento de Serviços

1. Prover rastreabilidade dos serviços executados, de forma a instrumentalizar o desenvolvedor com meios mais adequados de depuração de sistemas de tempo real em ambientes distribuídos e em ambientes multithread.
2. Estimular o desacoplamento entre as partes componentes do software, fomentando no programador do software a cultura de adoção de interfaces e arquitetura orientada a serviços, de forma a minimizar a interdependência entre módulos, tornando fácil sua substituição ou atualização.
3. Permitir ajustar o compromisso eficiência versus rastreabilidade dos serviços executados, pela escolha do nível de profundidade da publicação e da chamada de serviços, de forma a não comprometer a capacidade de realização de tarefas críticas em tempo real pelo excesso de “overhead” devido ao mecanismo de rastreamento.
4. Priorizar sempre a verificação dos tipos de dados trocados em tempo de compilação, evitando que esta verificação se dê em tempo de execução, o que viria a diminuir a eficiência do software.

De forma a atender as especificações acima, o autor construiu uma infra-estrutura – ou *framework* – de software usando *templates* em C++, que incorpora um mecanismo de despacho de tarefas em ambiente *multithread* conhecido como *Mecanismo de Delegação* ou “*Delegate*”. Este *framework*, em conjunto com o *Proxy* descrito na Seção 5.1.3, possibilitam o desenvolvimento disciplinado de software orientado a serviços em ambientes tanto *multithread* quanto distribuídos. Ele possibilita a inclusão e exclusão dinâmica de tarefas, além de prover meio de rastreá-las em tempo de execução. Ao optar pela adoção destas ferramentas no desenvolvimento de um software, o desenvolvedor fica instrumentalizado para depuração rápida de defeitos e passa a contar com uma arquitetura flexível, orientada a serviços, como fica claro na descrição que se segue.

O mecanismo *Delegate* foi construído obedecendo aos requisitos relacionados e instanciado pela primeira vez na implementação do software do protótipo MVFV. Ele apresenta inúmeras vantagens, listadas na Tabela 5-3, para o desenvolvimento de sistemas de alta complexidade:

Tabela 5-3: Vantagens do Mecanismo de Delegação de Serviços

<ol style="list-style-type: none"> 1. <u>Disciplina a publicação de serviços de forma padronizada</u> e com formatos de parâmetros de troca de dados previamente definidos de forma segura, evitando a prática comum entre os programadores em C++ de se adotar ponteiros <i>void</i> para implementação de passagem de parâmetros de forma genérica por <i>callbacks</i>. <u>Os tipos de dados trocados são verificados ainda em tempo de compilação.</u> 2. <u>Permite a construção de sistemas “Hot-plug-and-play”.</u> À medida que novos serviços tornam-se disponíveis, são publicados e podem ser detectados por objetos – usuários em potencial de tais serviços – que já estejam instanciados na aplicação, ou mesmo disparar a instância de tais objetos. 3. <u>Permite o rastreamento de execução de todos os serviços ofertados em aplicações <i>multithreading</i>,</u> possibilitando a geração seletiva de <i>logs</i> de depuração em ambientes com inúmeros blocos de software construídos por diferentes times de desenvolvedores. O compromisso eficiência <i>versus</i> rastreabilidade é ajustável, para não comprometer aplicações de missão crítica e de tempo real. 4. <u>Potencializa situações de <i>benchmarking</i> e flexibiliza o desenvolvimento:</u> programadores podem construir ou aprimorar diferentes métodos para tratar os mesmos tipos de dados. A denominação das classes onde os métodos são implementados não importa, mas apenas o nome do serviço publicado e seus parâmetros de entrada e saída. Se estes métodos preservarem suas assinaturas, podem ser usados comparativamente de forma transparente através do mecanismo de delegação. 5. <u>O mecanismo de despacho de serviços é data-cêntrico³³:</u> para cada tipo de dado a ser trocado, existe uma classe <i>template</i> parametrizada por esse tipo, que é responsável pelo despacho correspondente. <u>Caso haja necessidade de tratamento especial no despacho de um tipo de dado (por exemplo, vídeos comprimidos, dados criptografados, etc.) a classe <i>template</i> responsável pode ser especializada de forma natural <i>a posteriori</i>,</u> aumentando gradativamente a eficiência e a segurança do sistema como um todo e diminuindo o tempo de lançamento da aplicação no mercado. 6. <u>Facilita o desenvolvimento incremental de sistemas de alta complexidade,</u> pois é compatível com o paradigma <i>Publish-Subscribe</i>³⁴, que é reconhecidamente uma tendência em um mundo cada vez mais data-cêntrico. O resultado são sistemas mais robustos e tolerantes a falhas. 7. Prepara o software para integrar-se prontamente a <u><i>Arquiteturas Orientadas a Serviços</i> ou <i>SOA</i> – <i>Service Oriented Architecture</i></u> – de forma direta e transparente, utilizando-se o mecanismo <i>Proxy</i>.

³³ O enfoque data-cêntrico – em contraposição aos enfoques *net-centric* e *procedural-centric* – foca o desenvolvimento da arquitetura do software nos dados que se movem e se transformam em um ambiente computacional distribuído e heterogêneo, ao invés de focar nos recursos de rede ou nos processos que realizam tais ações.

³⁴ *Publish/subscribe* é um paradigma de transferência assíncrona de mensagens onde os *emissores* ou *publishers* de mensagens, ao invés de serem programados para enviá-las a *receptores* ou *subscribers* específicos, promovem a publicação das mensagens caracterizadas em classes, sem o conhecimento de qualquer receptor que possa existir. Os receptores, por sua vez, expressam o interesse em uma ou mais classes, e somente recebem mensagens que são de seu interesse, sem o conhecimento de quais emissores existam. O desacoplamento entre *emissores* e *receptores* permite uma grande escalabilidade e uma topologia de rede mais dinâmica [104].

Antes de prosseguirmos com a descrição do *framework* desenvolvido, vamos descrever o que vem a ser o conceito de *Arquitetura Orientada a Serviços* que acabamos de citar. Em [103] encontramos a seguinte definição:

“SOA – *Service Oriented Architecture* – é um estilo de arquitetura de software cujo princípio fundamental preconiza que as funcionalidades implementadas pelas aplicações devem ser disponibilizadas na forma de serviços. Frequentemente estes serviços são organizados através de um “barramento de serviços” (ESB – *Enterprise Service Bus*) que disponibiliza interfaces, ou contratos, acessíveis através de *web services* ou outra forma de comunicação entre aplicações. (...) Além da perspectiva estritamente técnica, a arquitetura orientada a serviços também se relaciona com determinadas políticas e conjuntos de “boas práticas” que pretendem criar um processo para facilitar a tarefa de encontrar, definir e gerenciar os serviços disponibilizados”.

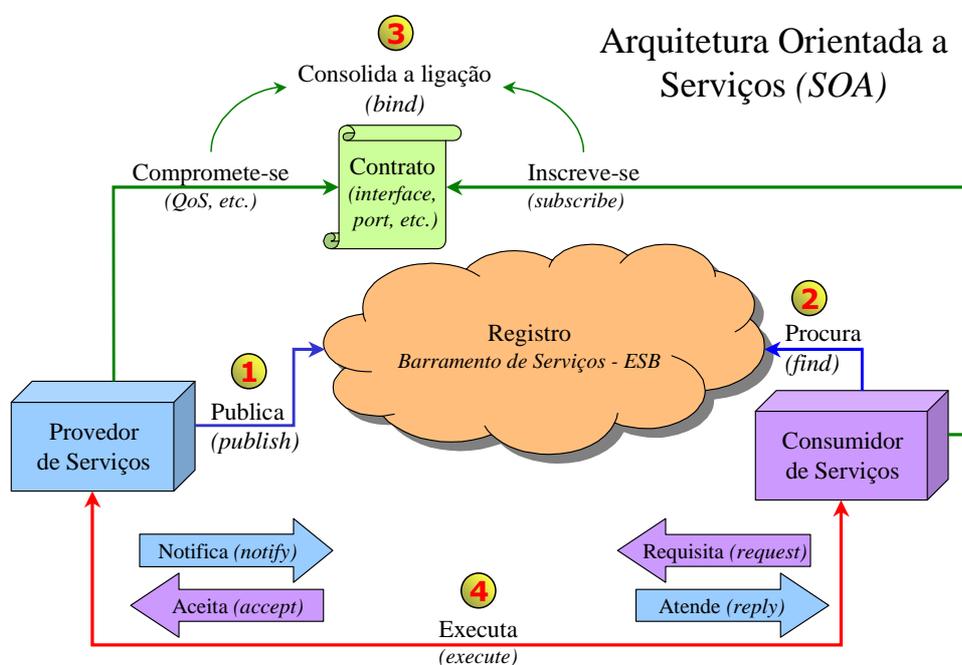


Figura 5-3: Arquitetura Orientada a Serviços ou SOA – *Service Oriented Architecture*, vista como uma combinação dos paradigmas de projeto *publish-subscribe* e *find-bind-execute*: em um primeiro momento (1), o provedor publica seus serviços em um registro acessível aos potenciais consumidores de serviços. Um consumidor, ao necessitar de um serviço, procura-o (2) no “barramento” de serviços (ESB – *Enterprise Service Bus*) e ao achá-lo, estabelece um contrato com o provedor (3), consolidando assim a ligação entre ambos. Daí por diante, o consumidor passa a usufruir o serviço ofertado pelo provedor (4).

Tecnicamente, a Arquitetura Orientada a Serviços pode ser bem representada a partir do paradigma *find-bind-execute* o que poderia ser traduzido como *procura-consolida-executa*, combinado com o paradigma *publish-subscribe* ou *publica-inscreve*, como ilustra a Figura 5-3. Nesta arquitetura, os provedores de serviços publicam suas informações – características,

indicadores e aspectos relevantes à tomada de decisão – em um *registro* acessível aos consumidores em potencial dos serviços ofertados. O *registro* é utilizado pelos potenciais consumidores de serviços para determinar se as características necessárias são obedecidas. Se houver disponibilidade do serviço de acordo com a demanda do consumidor, a inscrição para seu uso é oficializada através de um *contrato*, que nada mais é do que um conjunto de regras que disciplinam esta interação recém iniciada entre provedor e consumidor.

A idéia por trás do conceito SOA não é nova. Contudo, devido à disponibilização apenas recentemente de ferramentas de *middleware* adequadas à sua adoção no ambiente corporativo, a aplicação do conceito *SOA* pela comunidade de *TI – Tecnologia da Informação* – tem se revelado uma tendência consistente. Afinal, a filosofia *SOA* instrumentaliza os profissionais de *TI* com mecanismos de alinhamento com o negócio das empresas, ao privilegiar o desenvolvimento incremental e propiciar a medição – o mais cedo possível – do impacto das soluções nos *processos de negócio*, e não simplesmente contra o planejamento e gerência de projetos. Por outro lado, já faz um bom tempo que o conceito de oferta disciplinada de serviços é familiar aos que se dedicam, por exemplo, ao desenvolvimento de sistemas operacionais, equipamentos e software de rede, sistemas embarcados de tempo real, etc.

A Figura 5-4 traz um diagrama ilustrativo de exemplo do funcionamento do mecanismo de delegação de serviços implementado neste trabalho. A notação mostrada obedece ao padrão UML 2.0 para diagramas compostos (classes e objetos). Os blocos mostrados simbolizam instâncias de uma classe (ou objetos) desempenhando dois papéis específicos em tempo de execução: no bloco à esquerda o objeto é usuário ou “cliente” de serviços de outro objeto mostrado à direita como provedor ou “servidor”, podendo ser esta relação “cliente-servidor” apenas momentânea, extinguindo-se após o término da conexão de ocorrência mostrada como *dispatch*. Ambos os objetos são declarados como sendo de uma mesma classe de denominação simbólica *DelegateServiceProvider*³⁵ para reforçar que ambos contam com o mecanismo de delegação. A forma de chamada de serviços é disciplinada pelo uso da classe *DelegateInterface* que traz a assinatura dos métodos, e pelas classes *ClientPort* e *ServerBoundaryPort*, que trazem as restrições de comportamento dos protocolos de comunicação entre ambos. O provedor de serviços, por sua vez, possui recursos internos

³⁵ No diagrama mostrado mais adiante na Figura 5-6 a classe *DelegateServiceProvider* é usada para exemplificar a adoção do mecanismo de delegação por parte de uma classe qualquer.

acessíveis de forma compartilhada (*serverSharedResources*) ou alocadas sob demanda do usuário (*serverOnDemandResources*). Para se obter acesso síncrono (i.e. chamada direta do método sem uso de filas, por exemplo) aos recursos compartilhados em um ambiente *multithread*, trava-se previamente o semáforo (*mutex* na Figura 5-4), o que chamamos de transações do tipo *chamada protegida* ou *guarded call*. Já para acessar os recursos alocados sob demanda ou *on-demand* (alocações na *pilha* ou no *heap*, por exemplo), não há necessidade de travar o semáforo e o acesso é feito diretamente, pois a cada vez que o serviço é chamado, uma nova área de recursos é alocada para ele.

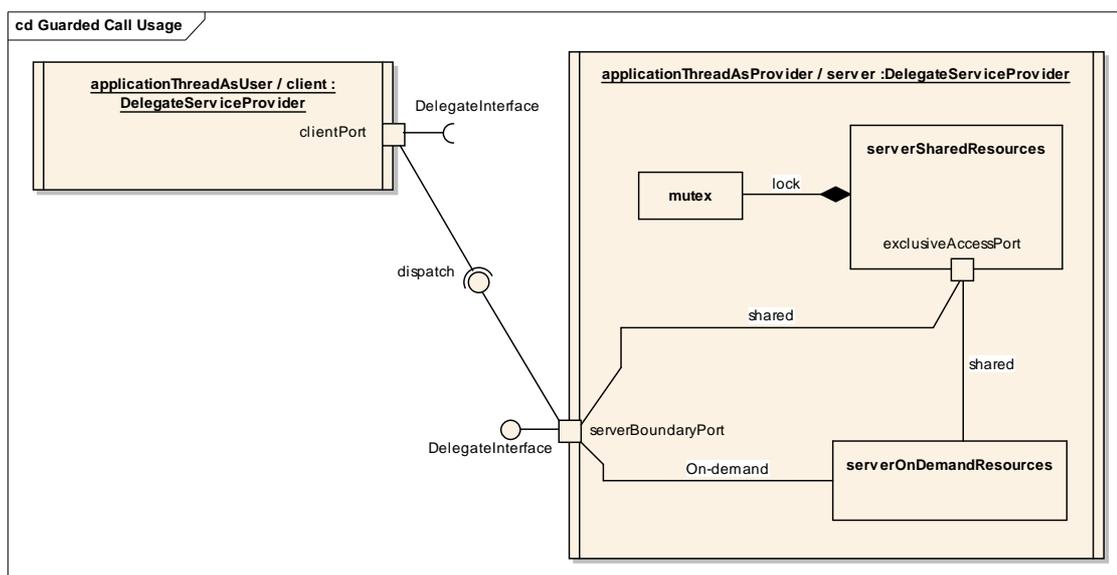


Figura 5-4: Exemplo em tempo de execução de uma chamada de serviço usando o mecanismo de delegação mostrado na Figura 5-6. Os *ports* – simbolizados como pequenos quadrados na fronteira das classes – são conceitualmente comportamentais. Ligados a eles podemos ter *interfaces*, puramente estruturais. As *interfaces* são simbolizadas como um círculo quando ofertadas ou uma semicircunferência quando necessárias a uma classe. Uma conexão de ocorrência – o despacho de um serviço em tempo real, por exemplo – é simbolizada por um encaixe destes símbolos, como mostrado.

As classes *interface* trazem apenas descrições estruturais, como definição de nomes e tipos, assinaturas de métodos com seus nomes e parâmetros de entrada e saída, etc. As classes tipo *port*, por sua vez, são conceitualmente comportamentais, ou seja, carregam código para de fato implementar tarefas e protocolos de comunicação, ou simplesmente despachar pedidos de execução de serviços para as outras classes e subclasses a elas ligadas. O uso combinado de *interfaces* e *ports* constitui assim uma realização prática do *contrato* entre as partes, visto anteriormente como passo “3” na Figura 5-3.

O diagrama de pacotes “*Delegate*”, que constitui o *framework* completo desenvolvido neste trabalho para implementação do mecanismo de delegação de serviços, é mostrado na Figura 5-5. Um diagrama de classes é mostrado na Figura 5-6, ilustrando a estrutura do mecanismo e sua forma de adoção por uma classe qualquer. Da forma como ele foi concebido, torna-se possível transformar qualquer objeto das classes existentes em uma aplicação em um provedor de serviços ou em um usuário de serviços dos outros objetos, ou ainda – o que é mais comum – em ambos. Basta que cada objeto *publique* aqueles serviços a serem ofertados (os métodos da classe, i.e. seus procedimentos e funções) através de nomes individuais usando o mecanismo de delegação.

Com o uso isolado³⁶ do *framework* “*Delegate*”, os objetos ativos³⁷ e passivos podem já publicar seus serviços (métodos, i.e. procedimentos e funções, etc.) para uso por objetos de qualquer classe, desde que estejam em um mesmo espaço de endereçamento. Os serviços publicados tornam-se disponíveis através de um mecanismo de *callback*, onde o usuário de um serviço precisa saber apenas o nome dado ao serviço e os tipos de parâmetros passado/retornado na chamada do serviço. Não há necessidade de a instância usuária saber qual objeto em particular está implementando o serviço de que necessita, ou mesmo qual é o tipo do objeto onde o método está implementado. A ligação (i.e. *binding*) entre o nome do serviço e o objeto que realmente o está ofertando ocorre em tempo de execução (i.e. *late binding*) e de forma automática.

Na Figura 5-5, as classes foram agrupadas em pacotes da seguinte forma: o pacote *Customizable* é composto de classes exemplo, que ilustram a forma como as classes do aplicativo que irá usar o mecanismo devem ser construídas. Os pacotes *RDelegate* e *SDelegate* constituem-se nos mecanismos de delegação propriamente ditos, nas modalidades bidirecional (i.e. chamadas com parâmetros de “*retorno*”) e unidirecional, respectivamente. O pacote *Common* reúne as classes de uso comum a ambas as modalidades de delegação.

³⁶ Por “uso isolado” entenda-se: sem integrá-lo com o *Proxy* descrito mais adiante neste capítulo, que estende o mecanismo de delegação para além da fronteira de endereçamento de uma mesma máquina.

³⁷ Objetos ativos: *threads* – normalmente simbolizados nos diagramas de classe da UML 2.0 como bordas laterais duplas nas caixas que as representam. Por exemplo a classe *DelegateServiceProvider* na Figura 5-6 e as classes *ClientSideProxy* e *ServerSideProxy* na Figura 5-7.

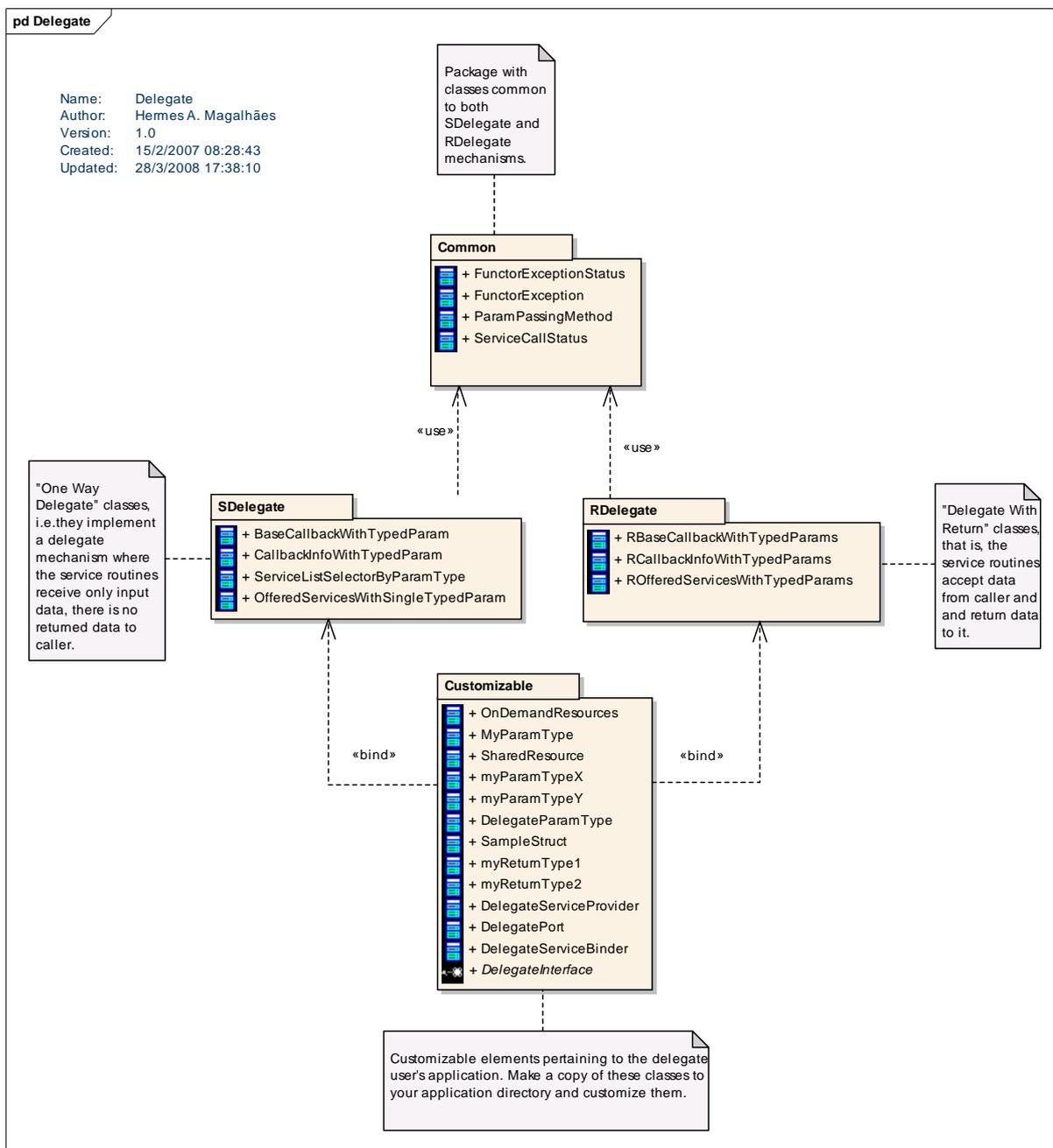


Figura 5-5: Visualização do Diagrama de Pacotes³⁸ constituintes do Mecanismo de Delegação. Neste diagrama, o pacote Customizable é composto de classes exemplo que ilustram a forma como as classes do aplicativo que irá usar o mecanismo devem ser construídas. Os pacotes RDelegate e SDelegate constituem-se nos mecanismos de delegação propriamente ditos, nas modalidades bidirecional (i.e. chamadas com parâmetros de “retorno”, daí a letra R) e unidirecional, respectivamente (a letra S vem de “simples”). O pacote Common reúne as classes de uso comum a ambas as modalidades de delegação.

³⁸ UML: Pacotes são namespaces para seus membros. Na prática funcionam como uma forma de organização em “pastas”.

O diagrama de classes na Figura 5-6 mostra, por exemplo, como foi concebida a estrutura para implementação do despacho bidirecional de serviços (opção pelo pacote *RDelegate* na Figura 5-5), além de ilustrar a forma como o mecanismo é incorporado nas classes da aplicação final para torná-las provedoras e ou usuárias de serviços. O diagrama traz alguns exemplos de tipos de parâmetros criados pelo usuário como *myParamTypeX*, *myParamTypeY*, *myReturnType1*, *myReturnType2*, além de mostrar também uma sugestão de arquitetura de classes para uso do mecanismo pelo programador, se ele optar por aderir às boas práticas de projeto usando *contratos* entre as partes pela construção de *interfaces* e *ports*. A metade de cima no diagrama mostrado constitui o mecanismo de delegação de serviços, e a metade de baixo completa este mecanismo com classes que exemplificam seu uso no contexto da aplicação final. O Apêndice C detalha, através de exemplos, o uso do mecanismo de delegação em uma aplicação alvo.

Sugere-se na Figura 5-6 que aquelas classes da aplicação final destinadas a serem provedoras de serviço sejam construídas adotando-se a estrutura mostrada no bloco circulado em linhas tracejadas embaixo e à esquerda, onde se lê o comentário “*A delegate service provider should look like this block*”. Os nomes das classes são alusivos às suas funções na estrutura: *DelegateServiceProvider*, *DelegateInterface* e *DelegatePort*.

Na prática, o que classes já implementadas precisam para que se tornem *Provedoras de Serviços* via *mecanismo de delegação* é simplesmente:

1. Incluir em sua definição o arquivo *header RCallbackInfoWithTypedParams.h*³⁹ – onde consta a definição da classe *template* de mesmo nome, responsável pela implementação dos *functors*⁴⁰ necessários;

³⁹ A classe *RCallbackInfoWithTypedParams* faz parte do pacote *RDelegate* mostrado na Figura 5-5, sendo usada quando se faz necessário despacho bidirecional do serviço, i.e., chamadas com parâmetros de retorno – para despacho unidirecional usa-se *CallbackInfoWithTypedParams*, constante do pacote *SDelegate*.

⁴⁰ *Functors* são classes que encapsulam ponteiros para métodos (funções, procedimentos) de instâncias de uma classe (ou objetos). Neste trabalho usamos *functors* para acessar, através de uma classe base, métodos de objetos via mecanismo de *callback*, sem que a aplicação tenha necessidade de conhecer o tipo de objeto particular sobre o qual o método está sendo chamado. Tal conceito é também conhecido como *closure*. Na Figura 5-6, a classe *functor* é a classe *RCallbackInfoWithTypedParams*, e sua classe base é *RBaseCallbackWithTypedParams*.

2. A seguir, instanciar um *functor* – um objeto da classe *CallbackInfoWithTypedParams* – para cada um de seus métodos que se deseja transformar em um serviço ofertado. Estes *functors* serão tipificados pelos tipos de dados a serem trocados utilizando o referido método: *MyParamType* (dado enviado) e *MyReturnType* (dado retornado).

Ao instanciar os *functors*, eles são abstraídos em termos de uma classe base *RBaseCallbackWithTypedParams* e armazenados em uma lista de serviços disponíveis. No caso da Figura 5-6 esta lista está contida na classe *ROfferedServicesWithTypedParams*. Um único objeto desta classe lista, tipificado pelos mesmos tipos de dados do *functor* – será instanciado automaticamente a cada instanciação do primeiro *functor* correspondente a um conjunto particular de pares *MyParamType* e *MyReturnType* de tipos de dados de troca. *Functors* instanciados posteriormente, mas que se referem a métodos com os mesmos pares de tipos de dados de troca, terão seus serviços correspondentes registrados na mesma lista *ROfferedServicesWithTypedParams* pré-existente. Este objeto será então o único responsável no sistema pela guarda do registro e pelo despacho de serviços que envolvam um par particular de tipos de dados de troca.

Toda a estrutura de listas de serviços necessária é então montada progressivamente de forma transparente e automática sem a necessidade de intervenção do usuário do *framework*. À medida que a aplicação vai instanciando *functors*, serviços vão sendo colocados em listas e publicados. Os objetos que mantêm estas listas nascem especializados nos tipos de dados requeridos na transação. Eles também já contam com capacidade básica de despacho do serviço – por valor e por referência – através do método *callbackDispatch()* de *ROfferedServicesWithTypedParams* (não mostrado ⁴²). Este método de despacho do serviço pode, em um segundo momento do ciclo de desenvolvimento, ser facilmente especializado para incorporar características que venham a tornar o despacho do serviço mais eficiente e seguro – como a implementação de novos algoritmos de compressão ou criptografia, por exemplo – ou ainda para atender outros requisitos de qualidade, temporização, etc.

Por outro lado, para que uma classe seja “*Consumidora de Serviços*”, inclui-se apenas o arquivo *DelegateServiceBinder.h*, que contém a definição da classe de mesmo nome. Uma vez publicados os serviços, a classe consumidora pode chamá-los sem que haja necessidade de se conhecer o tipo de objeto que oferta o serviço, mas apenas o nome do serviço, os tipos dos parâmetros de entrada e saída e as formas de passagem, i.e., por valor ou por referência.

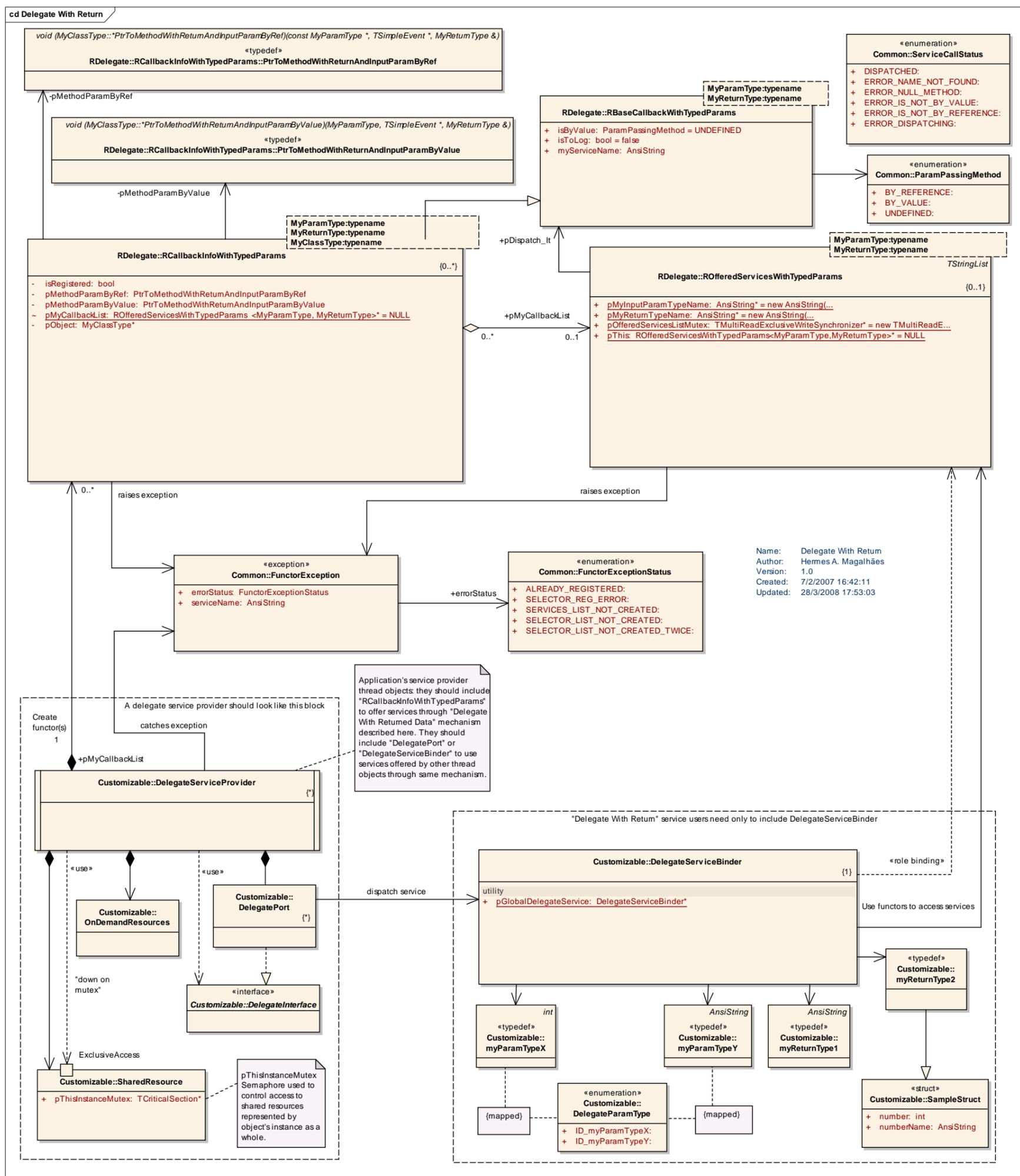


Figura 5-6: Diagrama de classes do pacote *RDelegate* (mecanismo de delegação na modalidade com parâmetro de retorno), evidenciando a estrutura de programação em *templates*⁴¹ do mecanismo de delegação. O bloco embaixo à esquerda, envolto por linhas tracejadas, mostra a estrutura sugerida para uma classe customizável de nome simbólico “*DelegateServiceProvider*” que deseja oferecer serviços. A diagramação mostrada neste bloco sugere uma arquitetura que prioriza o uso de interfaces e portas para disponibilizar os serviços de forma ordenada e seletiva. O bloco entre linhas tracejadas embaixo e à direita mostra a estrutura que se deve incluir (através da diretiva `#include “DelegateServiceBinder.h”` no caso do C++) para que os objetos de uma classe passem a ser usuáries dos serviços ofertados pelos outros objetos desta e de outras classes usando o mesmo mecanismo de delegação⁴².

⁴¹ Segundo a notação UML, os *typename*s generalizáveis dos *templates* são representados dentro de pequenas caixas superpostas no alto e à direita dos blocos das classes *template* correspondentes, que no caso deste pacote estão concentradas na metade superior do diagrama.

⁴² No diagrama de classes mostrado na Figura 5-6, apenas os atributos são mostrados. Os métodos das classes estão ocultos.

A declaração da classe *DelegateServiceBinder* requer a definição prévia da funcionalidade do pacote de delegação desejado, *SDelegate* e ou *RDelegate*, bastando incluir nela os arquivos *OfferedServicesWithSingleTypedParam.h* e ou *ROfferedServicesWithTypedParams.h*, respectivamente.

Como a classe *DelegateServiceBinder* é a responsável pelo *late-binding*, ela fica visível às classes usuárias de serviços. Ela deve ser então customizada para conter as declarações dos protótipos dos métodos que irão ligar as chamadas de serviço com as respectivas listas de serviço. A novidade aqui é que a chave de seleção da lista de serviços correta são os próprios tipos de parâmetros usados nas trocas de dados, como fica claro no exemplo mostrado no Apêndice C. Assim, quando ocorre o despacho de um serviço, por estarmos usando templates, a verificação dos tipos de parâmetros é feita em tempo de compilação, antecipando erros e provendo maior confiabilidade ao processo de desenvolvimento de software. Estabelecida esta ligação estrutural em tempo de compilação, a correta passagem de parâmetros está garantida. Resta então a ligação funcional em tempo de execução ou *late binding*, que é feita pelo nome do serviço desejado e pelos valores assumidos pelos parâmetros de troca de dados.

Se desejarmos opcionalmente celebrar contratos formais entre as partes, incluímos os *ports* e *interfaces* necessários na arquitetura, ou seja, incluímos classes que denominamos simbolicamente *DelegatePort* e *DelegateInterface* no diagrama mostrado. Uma vez que, na forma como a estrutura de *includes* foi construída, a inclusão de *DelegatePort* já inclui a classe *DelegateServiceBinder*⁴³, ao utilizarmos *ports* nas classes provedoras de serviços, também elas ganham credenciais para se tornarem usuárias de serviços ofertados por outras classes provedoras, através do mesmo mecanismo.

Note que não há necessidade de explicitar os tipos nativos da linguagem usada, no caso o C++ para ganhar a funcionalidade de “*Provedor de Serviços*” ilustrado na Figura 5-3 usando o mecanismo de *callback*. O Apêndice C traz dois exemplos de uso do mecanismo de delegação que detalham o papel a ser desempenhado pelas classes customizáveis no uso do mecanismo *SDelegate* e *RDelegate*, nas Seções C.1 e C.2, respectivamente.

⁴³ Para maiores detalhes, consulte o Apêndice C.

Quando utilizamos o mecanismo de delegação isoladamente, ou seja, sem usar o mecanismo *Proxy* descrito mais adiante, estamos dentro de uma mesma aplicação e em um mesmo espaço de endereçamento. Temos à nossa disposição três formas de chamar um mesmo “serviço”:

1. Chamada direta: a partir do acesso ao objeto e ao nome do método correspondente ao serviço, efetua-se uma chamada convencional.
2. Chamada indireta: através do acesso aos *functors*, que guardam ponteiros para métodos dentro de objetos específicos. Os *functors*, por sua vez, têm implementado um esquema de sobrecarga do operador () para chamar o método registrado, associado ao objeto específico para o qual aponta. O *functor* permite, desta forma, armazenar em listas os ponteiros para métodos de objetos específicos.
3. Chamada centralizada: através do ponteiro *pGlobalDelegateService* para um objeto centralizador (objeto da classe *DelegateServiceBinder*), utiliza-se o nome de batismo do serviço (dado a ele quando da instanciação do *functor*), para despachá-lo através do mecanismo de delegação descrito. Ocorre uma consulta à lista de nomes de serviços registrados (classe *ROfferedServicesWithTypedParams*, Figura 5-6), obtém-se o *functor* correspondente previamente armazenado, que é então utilizado para efetuar uma chamada indireta.

Em primeiro lugar, temos a liberdade de escolher quais métodos se tornarão serviços. Temos também a liberdade de escolher a forma como iremos chamá-los. A chamada centralizada abre mão da eficiência, existente na chamada direta, em troca da flexibilidade proporcionada pelo esquema de publicação e pela capacidade de rastreamento e registro, em *log* centralizado, do seqüencial de serviços realizados, o que é especialmente útil ao desenvolvimento de sistemas de tempo real em ambientes *multithread*. Esta arquitetura possibilita, por exemplo, que métodos internos a uma aplicação, uma vez suspeitos de estarem causando falhas, possam tornar-se serviços publicados apenas para facilitar sua depuração, voltando ao esquema de chamada direta depois de depurados.

5.1.3 Mecanismo Proxy para Operação Distribuída

Como vimos da descrição anterior, a arquitetura adotada permite que qualquer componente do software passe a ser visto como um *provedor e ou consumidor de serviços*. A incorporação isolada do mecanismo de delegação por *callback* descrito na Seção 5.1.2 é capaz de

possibilitar uma forma prática de arquitetura orientada a serviços, desde que estabelecida no nível do equipamento, isto é, restrita a um mesmo espaço de endereçamento. Nesta Seção, descrevemos de forma breve o mecanismo *Proxy* construído para estender, através de transferência de pacotes em uma rede endereçada por IP, a realização do conceito de orientação por serviços para operação em sistemas distribuídos. Para uma descrição mais detalhada, faz-se necessária a consulta à documentação de desenvolvimento do software.

O diagrama de classes do *Proxy* está mostrado na Figura 5-7. Ele é uma combinação adaptada de três *padrões de projeto* ⁴⁴ bem conhecidos dos profissionais de engenharia de software [27]: *Observador*, *Proxy* e *Transação Confiável*.

- *Observador (observer pattern)*: é usado quando há potencialmente vários clientes de um serviço interessados em um fluxo de informação de um único servidor. O padrão provê uma forma simples de ligar dinamicamente os clientes com o servidor, de forma tal que os clientes recebam atualizações periódicas. Também pode ser entendido como uma forma de realização do paradigma *publica-inscreve*, que lida com o problema de como *notificar* um conjunto de clientes em tempo, de que um valor que lhes é importante sofreu modificação no servidor. Estabelece-se então um esquema *Notifica-Aceita (notify-accept)*, iniciado pelo lado servidor, como ilustra a Figura 5-3.
- *Proxy*: padrão que desacopla o servidor real e o cliente, através da interposição entre ambos de uma a classe “representante” do servidor, dentre outros motivos, para esconder do cliente o fato de o servidor estar em outro espaço de endereçamento. Isso permite que o servidor esteja localizado em qualquer local acessível. Os clientes não precisam se preocupar em achar meios de contactar o servidor real para *requisitar* informações e serviços de que necessitem.
- *Transação confiável (reliable transaction pattern)*: padrão usado quando se exigem graus de confiabilidade variados na transferência de mensagens sob canais não confiáveis de comunicação. Dentro de um mesmo sistema, mensagens diferentes

⁴⁴ *Padrões de Projeto* ou *Design Patterns* descrevem soluções genéricas reutilizáveis para problemas recorrentes no desenvolvimento de sistemas de software orientados a objetos. Um padrão de projeto estabelece um nome e define o problema, descreve a solução, quando aplicar esta solução e suas conseqüências. Funciona como uma biblioteca de conhecimento para uso em engenharia de software.

podem ter diferentes níveis de importância e, portanto, diferentes requisitos quanto à confiabilidade de sua transmissão à outra parte. No diagrama de classes da Figura 5-7, a classe *TransactionType* traz a definição de três níveis de confiabilidade para a transferência de mensagens:

- *No máximo uma vez (AMO – At Most Once)*: uma mensagem é transmitida apenas uma vez. Se a mensagem é perdida ou corrompida, perdeu-se a mensagem. Esta forma é usada quando se necessita uma forma “leve” de transmissão e o canal de transmissão tem alta confiabilidade se comparado com a probabilidade de perda de mensagens.
- *Pelo menos uma vez (ALO – At Least Once)*: a mensagem é transmitida repetidamente até quem a enviou obter uma confirmação do receptor, ou até se exceder uma contagem pré-estabelecida. Usado quando o canal de transmissão tem baixa confiabilidade, mas tolera-se a recepção de mensagens repetidas.
- *Exatamente uma vez (EO – Exactly Once)*: é uma mensagem tratada como *ALO*, exceto que se for recebida mais de uma vez, apenas a primeira vez é considerada. Forma usada quando a recepção de múltiplas mensagens é proibida.

A aplicação cliente no mundo real é simbolizada com o nome *ConcreteClient* Figura 5-7. Ela é implementada pela herança da classe *AbstractClient*. De forma similar, a aplicação servidora ou provedora de serviços é simbolizada como a classe *ConcreteServer*, que é implementada pela herança da classe *AbstractServer*. A Figura 5-7 traz em sua legenda uma descrição sucinta do funcionamento do mecanismo *Proxy* integrado ao mecanismo *Delegate*.

Vimos até aqui inúmeras vantagens da adoção dos mecanismos *Proxy* e *Delegate* no desenvolvimento de sistemas distribuídos e *multithread*, especialmente como auxílio ao desenvolvimento e ferramenta de flexibilização de inclusão/exclusão dinâmica de serviços. Ao encararmos o equipamento MVFV como um servidor, o *Proxy* entra instrumentalizando a classe *DeviceManager*, que é vista como um ator (simbolizado como um “boneco”) no diagrama UML do software de teste do MVFV Figura 5-2.

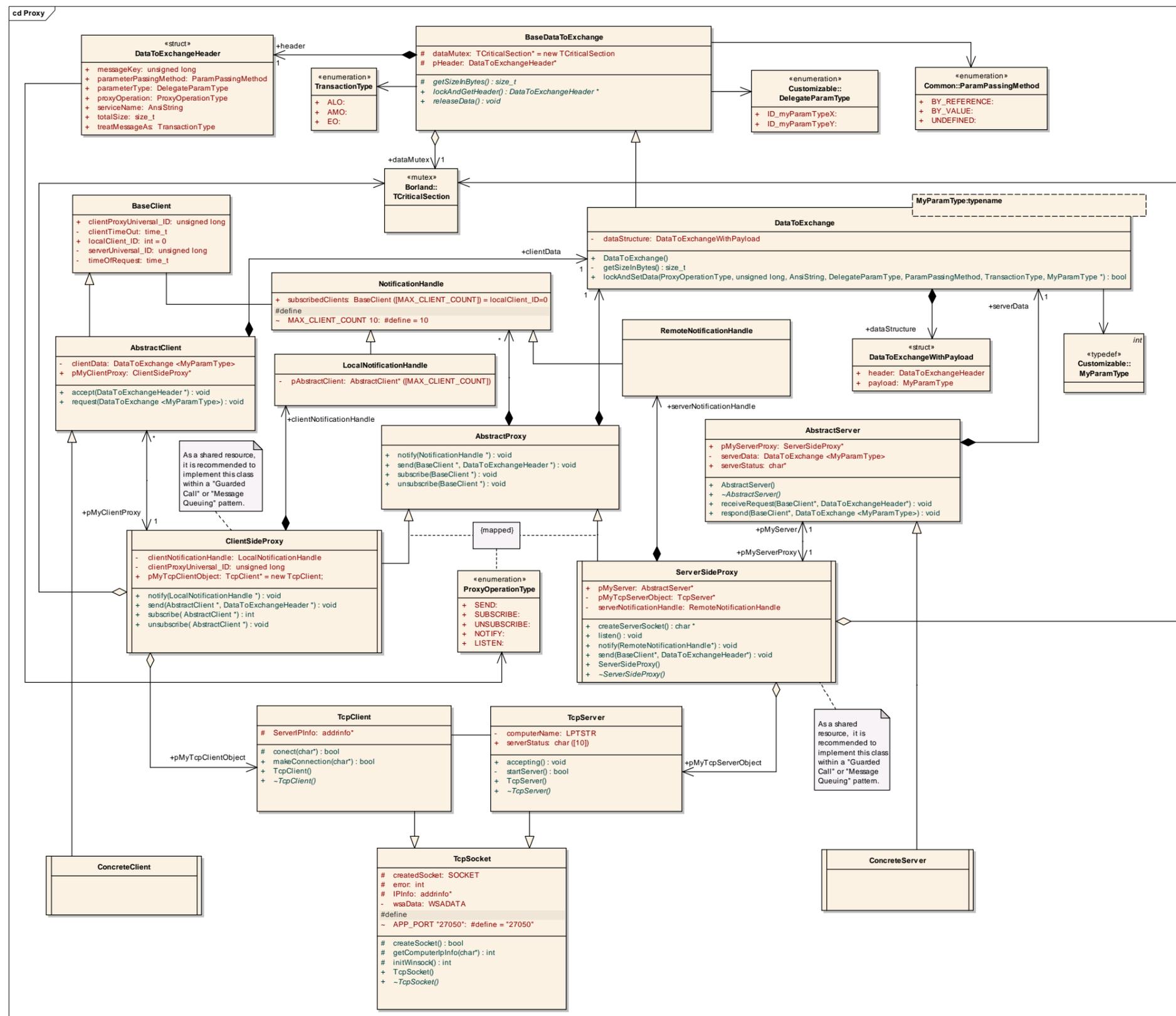


Figura 5-7: Diagrama de classes do pacote *Proxy* para extensão do mecanismo de delegação de serviços para sistemas distribuídos:

- O pacote de dados a ser trocado, ou "mensagem", é representado pela classe template *DataToExchange*, particularizada por *MyParamType*, que representa o tipo de parâmetro trocado usando o mecanismo *Delegate*. O cabeçalho estruturado *DataToExchangeHeader* da mensagem é herdado da classe base *BaseDataToExchange*, que não é uma classe template. Desta forma o mecanismo de despacho de mensagens consegue acessar de forma generalizável as informações acerca do conteúdo do pacote, i.e. sem conhecimento prévio do tipo de parâmetro nele contido. A particularização é feita no destino a partir do item *parameterType* contido no cabeçalho, cujos identificadores são definidos biunivocamente com os tipos reais do mecanismo *Delegate* na classe *DelegateParamType*.
- A classe *AbstractProxy* define métodos genéricos relacionados com a inscrição de clientes e entrega de mensagens. Ela se especializa nas classes *ClientSideProxy* e *ServerSideProxy*, locais ao(s) cliente(s) e ao servidor, respectivamente. Estas por sua vez se encarregam de providenciar a inscrição dos clientes junto ao servidor, a conexão entre as partes (usando as classes *TcpClient* e o *TcpServer* nesta implementação), serializar os dados e transmiti-los de parte a parte, funcionando como representantes locais da parte localizada remotamente.
- A classe *NotificationHandle* armazena informações de cada cliente, de forma que as classes derivadas da classe *AbstractProxy* possam notificar os clientes inscritos acerca do pacote de dados recém chegado. A especialização desta classe do lado do servidor é a classe *RemoteNotificationHandle*, responsável por contactar os clientes remotos. A especialização do lado do cliente, *LocalNotificationHandle*, trata de distribuir a mensagem para os clientes locais que se inscreveram para recebê-la.
- O *AbstractServer* é o servidor de informações desejadas pelos clientes. Ele recebe as requisições, empacota os dados e usa o *ServerSideProxy* para enviá-los. O *AbstractClient*, por sua vez, se encarrega de usar o *ClientSideProxy* para se inscrever no servidor e passa então a receber os dados que solicitou. Transmissões periódicas iniciam no servidor, que notifica os clientes registrados no esquema *notify-accept*. A requisição de dados avulsos é iniciada no cliente e atendida pelo servidor, usando o esquema *request-respond* (ou *request-reply*). Estes dois tipos de interação são ilustrados na Figura 5-3.
- Finalmente: cada aplicação cliente no mundo real *ConcreteClient* é implementada pela herança da classe *AbstractClient* e cada servidor do mundo real *ConcreteServer* é implementado pela herança da classe *AbstractServer*.

5.2 Captação dos Perfis Magnéticos

Mais adiante no Capítulo 6, Seção 6.1, são mostrados os perfis magnéticos coletados a partir do aparato de simulação de vias de tráfego construído para testar o equipamento e realizar avaliação prévia (em laboratório) da resposta magnética utilizando diferentes materiais com diferentes geometrias. A seguir são apresentados de forma sucinta os módulos de software usados na coleta de tais perfis tanto de forma convencional, quanto a altas taxas de amostragem para processamento em alta resolução.

5.2.1 Captação Convencional

O protocolo de comunicação serial com o detector de veículos comercial usado neste trabalho permite a extração das informações de perfis magnéticos convencionais⁴⁵ dos sensores a laço indutivo. Esta capacidade de coleta de perfis magnéticos em tempo real via porta serial foi incorporada ao Software Servidor descrito anteriormente na Seção 5.1.

5.2.2 Captação para Análise em Alta Resolução

Para coleta de dados e investigação das técnicas baseadas em autovalores e autovetores na extração da frequência do laço indutivo ao longo do tempo e em alta resolução, foi adquirida uma placa A/D de 1MS/s, 12 bits, 16 canais “*single-ended*” ou 8 canais diferenciais, modelo Advantech PCI-1712. Utilizando esta placa foi desenvolvido um programa específico para aquisição dos sinais desejados diretamente do laço indutivo, cuja interface é mostrada na Figura 5-8. O software de aquisição desenvolvido utiliza *DMA – Direct Memory Access* – para alcançar altas taxas de captura em tempo real, além de ser configurável em diversas de suas características, como taxa de amostragem, quantidade de amostras a coletar, pré e pós-trigger analógico e digital, topologia de aquisição (diferencial ou “*single-ended*”), faixa de tensão, rearme automático, etc. Ele também armazena um *log* das operações de aquisição realizadas e denomina de forma automática os arquivos salvos (*dataX.dat*), criando um

⁴⁵ Entenda-se por perfis magnéticos “*convencionais*” aqueles normalmente usados até o momento nos diversos trabalhos de pesquisa para classificação de veículos, com período de amostragem na faixa de 1 ms (quando ajustados em baixa sensibilidade) a 100 ms (alta sensibilidade).

cabeçalho em arquivo separado de mesmo nome (por exemplo *dataX.hdr*) para cada arquivo de dados criado, contendo todas as informações de configuração vigentes quando da captação dos sinais, bem como comentários inseridos pelo usuário no campo indicado.

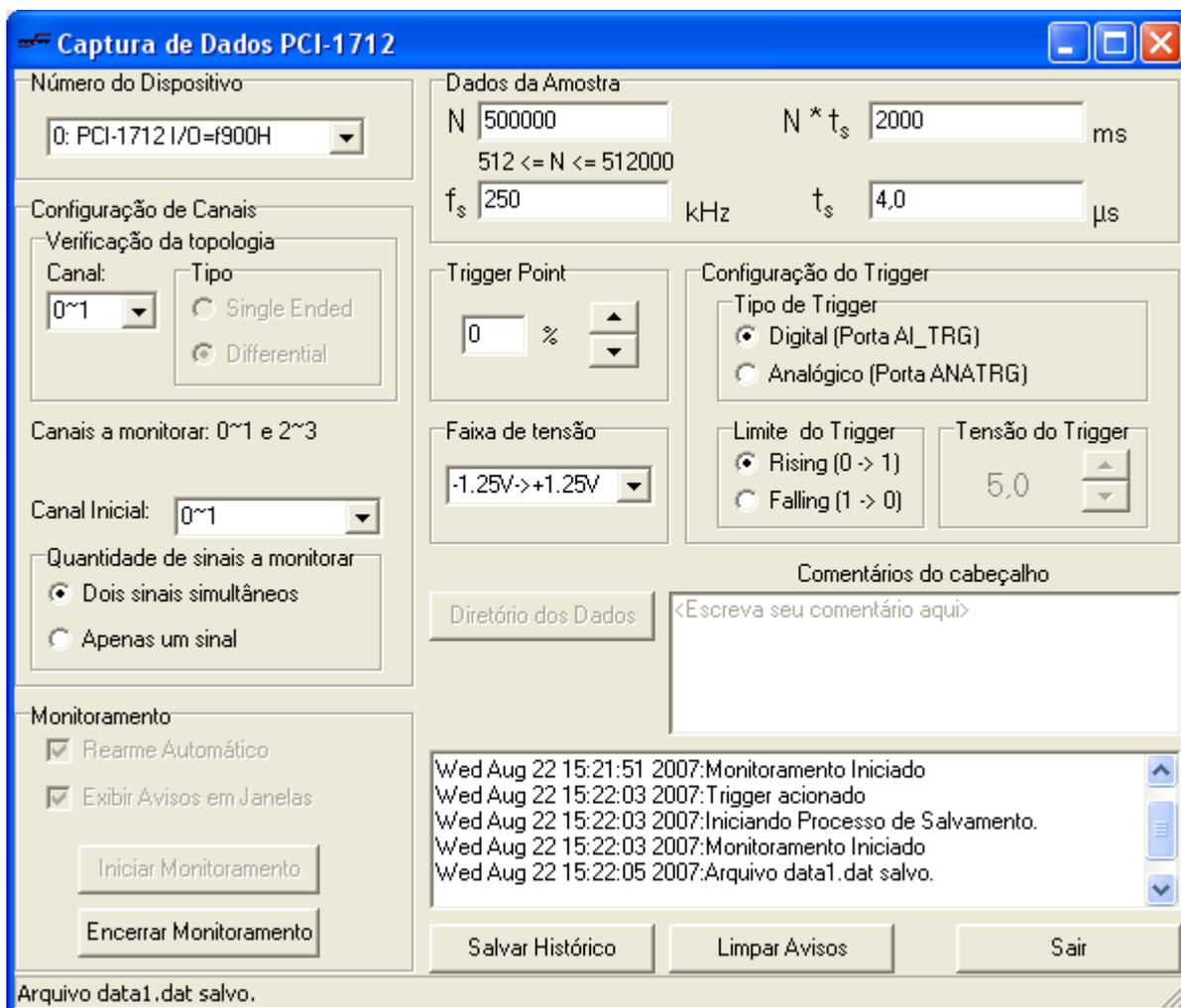
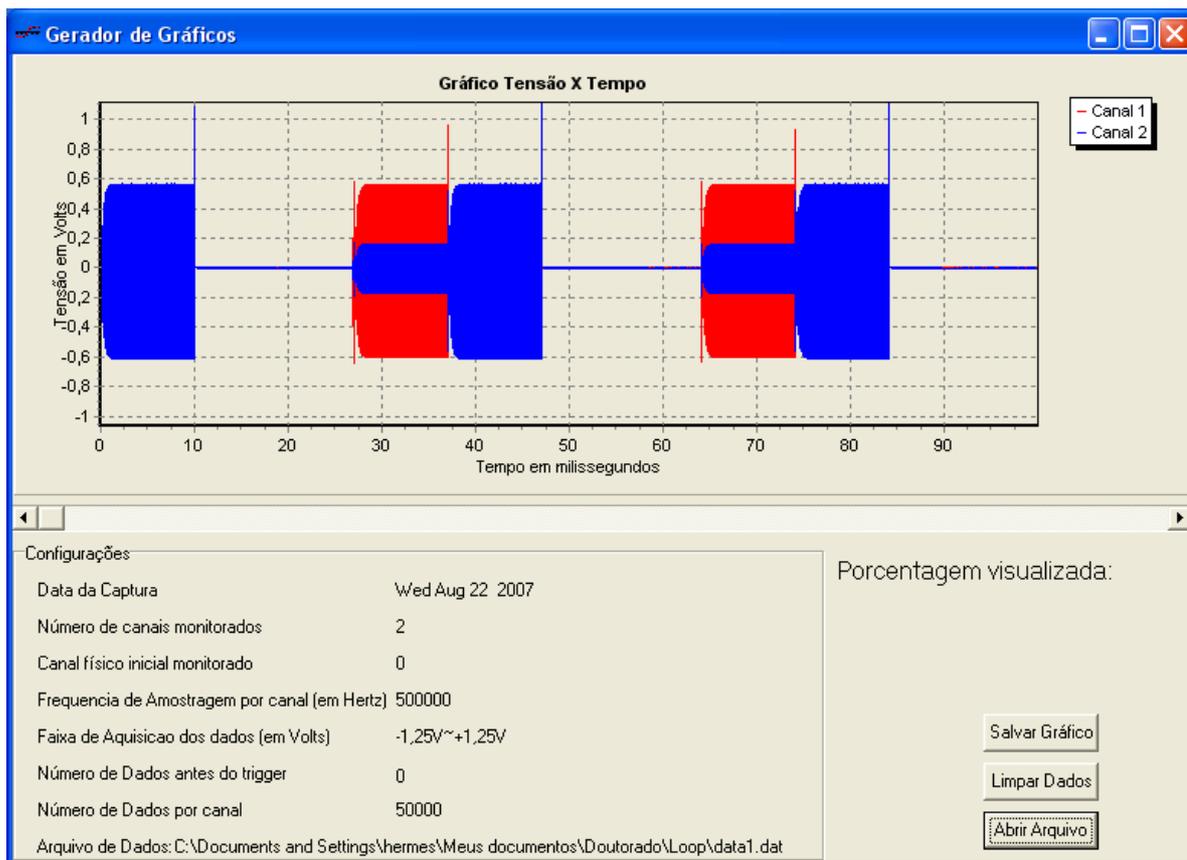


Figura 5-8: Interface do programa de aquisição de dados desenvolvido para capturar os sinais dos laços indutivos em taxas até 1MS/s usando o cartão A/D PCI1712 da Advantech.

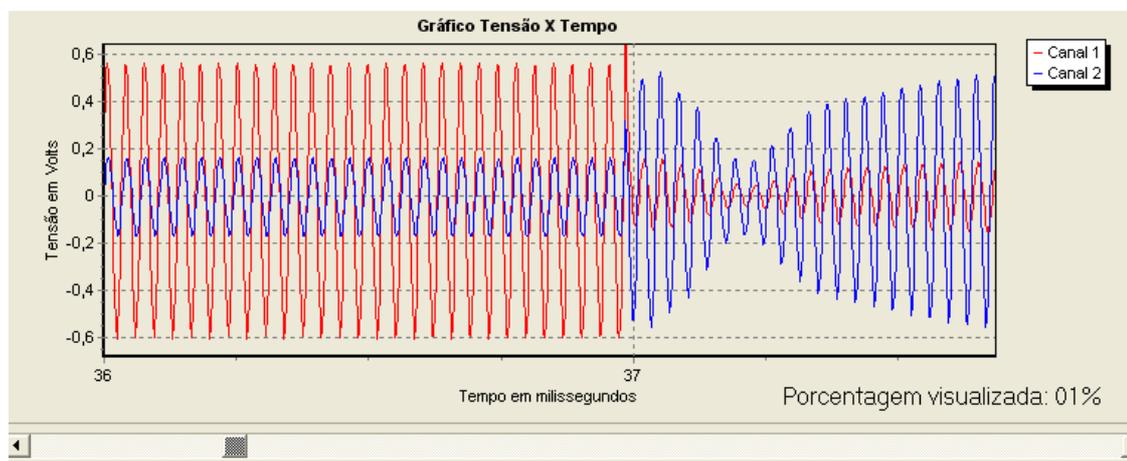
Foi desenvolvido também um programa para visualização rápida dos sinais no eixo do tempo, a partir da leitura dos arquivos “.hdr” e “.dat” citados acima. Uma tela ilustrativa é mostrada na Figura 5-9.

SÍNTESE

Neste capítulo descrevemos os softwares servidor e cliente do equipamento, os *frameworks* de delegação de serviços e o *proxy*, bem como o software de captação de perfis magnéticos em alta resolução. No próximo capítulo abordamos os resultados experimentais alcançados.



(a)



(b)

Figura 5-9: Interface do programa de visualização dos dados adquiridos via conversão A/D. São mostrados sinais capturados de dois laços indutivos pertencentes a um mesmo cartão detector de veículos de capacidade até quatro canais, no qual dois canais estão ativos (mostrados) e dois estão configurados como inativos (trechos de silêncio no sinal). Em (a) vemos a totalidade do sinal capturado. Em (b) é ilustrada a capacidade zoom sobre a imagem, evidenciando neste caso o instante de chaveamento entre os dois canais ativos e o efeito "cross-talk", onde os canais ativos contaminam-se por indução mutuamente: o canal "Ligado" (senóide de maior amplitude) induz sinal no canal "Desligado" (senóide de menor amplitude).

6 Resultados e Conclusões - Experimentos

A seguir mostramos os resultados obtidos a partir do processamento e análise de amostras reais de perfis magnéticos colhidas em laboratório, utilizando um aparato eletromecânico de emulação ou “giga de testes”, construída especificamente para coleta de perfis magnéticos variados, utilizando diferentes geometrias tridimensionais e diferentes materiais em movimento. Os sinais reais utilizados no processamento foram coletados em laboratório usando o equipamento e seu software já descritos nos capítulos 4 e 5, onde a coleta e armazenamento pelo cartão A/D PCI-1712 dos sinais oscilatórios nos laços indutivos em alta resolução é feita concomitantemente com a aquisição dos perfis magnéticos pelos detectores de veículos comerciais via porta serial.

O capítulo de resultados experimentais é organizado conforme se segue: o aparato construído para coleta em laboratório de perfis magnéticos de estruturas metálicas reais em movimento é descrito na Seção 6.1. Os resultados experimentais alcançados estão na Seção 6.2. A Seção 6.2.1 utiliza montagem de estruturas exemplo no aparato para mostrar a contribuição dos efeitos físicos ferromagnético e de correntes parasitas em ação na formação do perfil magnético. A seguir a Seção 6.2.2 traz os resultados alcançados para a medição de velocidade por correlação cruzada, adotando-se o algoritmo modificado de estimação de correlação cruzada. Este algoritmo, descrito na Seção 0, é capaz de lidar com sinais cuja amostragem é não-uniforme, no nosso caso sinais multiplexados. Na Seção 6.2.4, os conceitos adquiridos são exercitados pela análise da formação de um perfil magnético exemplo, cuja estrutura – formada pela composição de múltiplos materiais metálicos de diversas geometrias dispostos em configuração tridimensional – pode ser considerada como tendo uma alta complexidade. As conclusões dos experimentos com laços indutivos são apresentados na Seção 6.3.

6.1 Aparato para Coleta de Perfis Magnéticos

Uma placa foi montada artesanalmente com conectores para coletar internamente ao Painel de Conexões os sinais nos laços indutivos, funcionando desta forma em paralelo com os detectores de veículos comerciais. Esta montagem é mostrada na Figura 6-1. Os sinais digitais referentes aos eventos de detecção veicular e captura de imagem também foram conectados e

entregues às portas de I/O digitais existentes na placa A/D, para serem usados como condições de disparo (ou “*trigger*”) da aquisição.

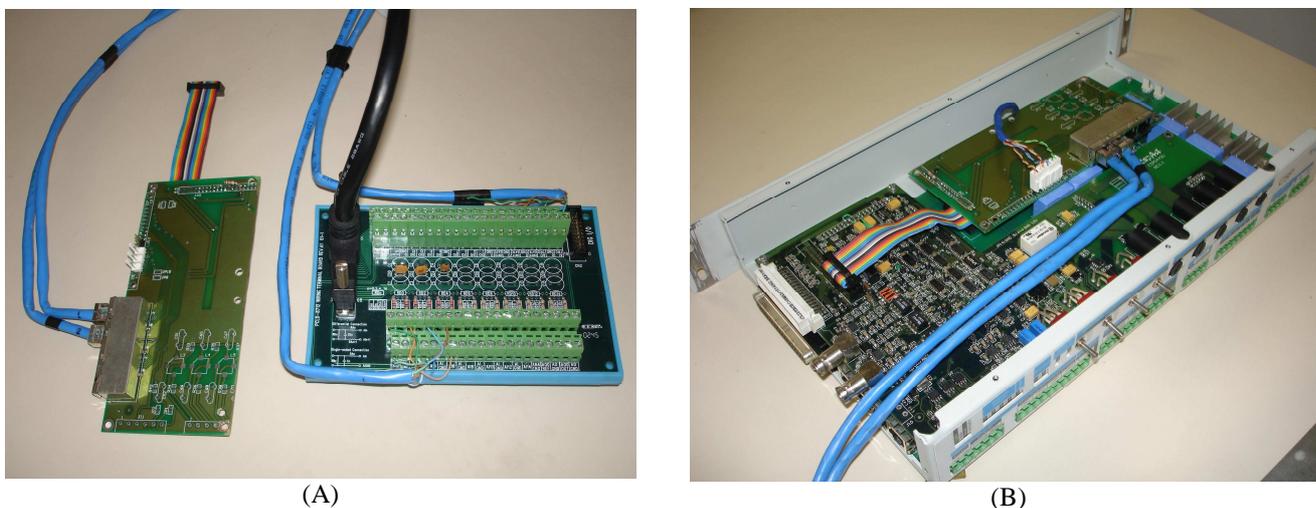


Figura 6-1: Adaptação para coleta dos sinais nos laços indutivos em paralelo com o detector comercial. (A) Placa adaptada (à esquerda) e placa de concentração dos sinais para entrega (via cabo SCSI) à placa A/D (à direita). (B) Painel de Conexões adaptado às placas mostradas, coletando os sinais nos laços (cabos par trançado de rede) e sinais de eventos digitais como detecção e captura de imagem (cabo flat).

No âmbito do laboratório, um ventilador foi adaptado para funcionar como aparato de emulação de uma via de tráfego de quatro pistas (Figura 6-2, A e B). Os laços indutivos são pequenas bobinas montadas artesanalmente em carretéis⁴⁶ e fixadas na estrutura do ventilador (veja item C na figura). Um “*dimmer*” foi adaptado para controlar a velocidade das palhetas. Três discos de acrílico de espessura 2 mm cada (foto D da Figura 6-2) são fixados às palhetas do ventilador e montados em camadas, prensando diferentes materiais metálicos (exemplo dos materiais na foto do item G) com variadas geometrias e texturas, obtendo desta forma perfis magnéticos diversos. Esta forma de montagem permitiu analisar, de forma reproduzível em laboratório, perfis metálicos em movimento longitudinal em relação ao laço indutivo, com velocidade angular de até 622 RPM. Há possibilidade ainda de variação da distância com relação ao laço indutivo, bastando para isso montar os materiais nas diferentes camadas dos discos de acrílico.

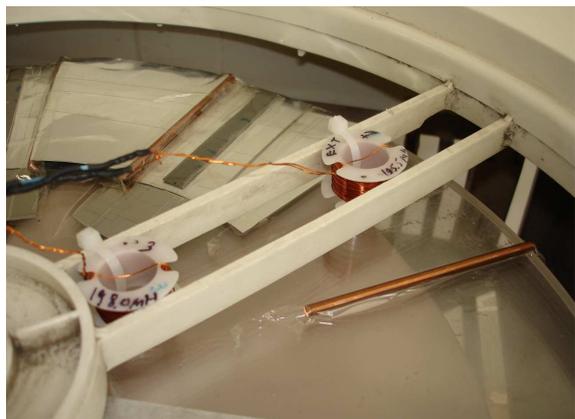
⁴⁶ Características aproximadas das bobinas: \varnothing Interno 14 mm, \varnothing Externo 18 mm (\therefore \varnothing Médio 16 mm), comprimento axial 12 mm, Indutância $200 \pm 5 \mu\text{H}$.



(A)



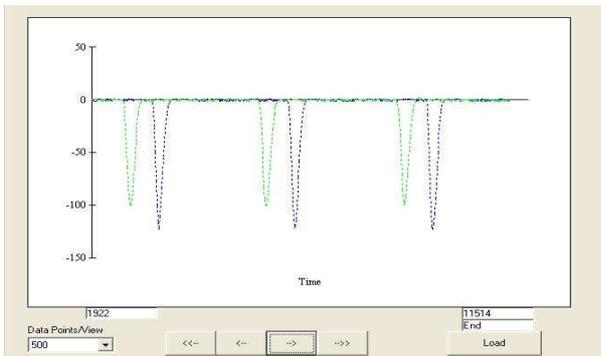
(B)



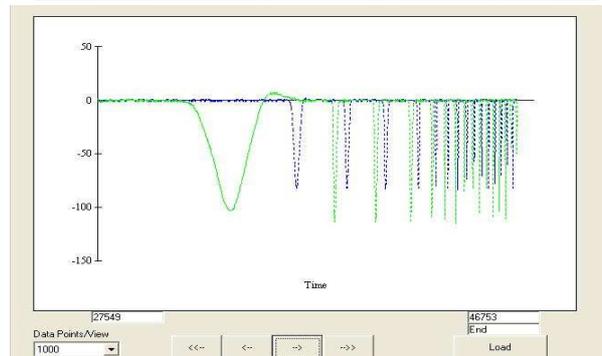
(C)



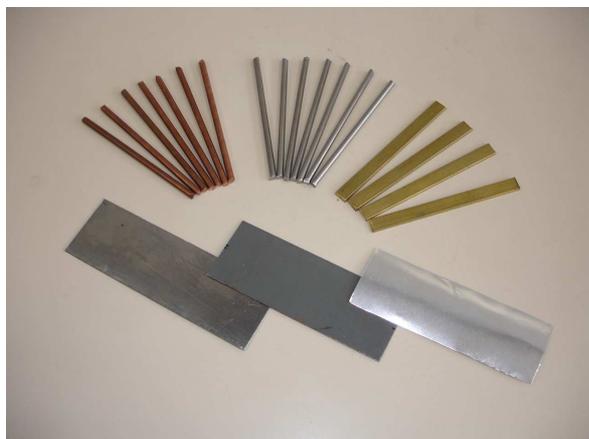
(D)



(E)



(F)



(G)

Figura 6-2: Aparato de simulação de via de tráfego com 4 faixas de rolamento (oito laços, figuras A e B), onde os laços são indutores (C) fixados na estrutura de um ventilador. Discos de acrílico (D), presos sobre as palhetas, permitem que perfis metálicos diversos, montados em camadas, sejam postos em movimento com velocidade até 622 RPM. Perfis magnéticos de folhas de alumínio em (E) e (F) ilustram o funcionamento do ventilador em velocidade constante e em aceleração, respectivamente; Em (G) são mostradas amostras de materiais usados para montar os perfis metálicos – da esquerda para a direita – Em cima: tubos de cobre, tubos de aço carbono e chapas de latão – Em baixo: amostras de chapas de aço inox, aço silício de grão orientado e folhas de alumínio.

A Figura 6-2-E ilustra os perfis magnéticos em dois laços consecutivos, obtidos de forma convencional ⁴⁷, correspondentes a uma pequena folha de alumínio fixada em uma das palhetas, com o ventilador ajustado em velocidade constante. A Figura 6-2-F mostra os perfis magnéticos para os mesmos canais de detecção com as palhetas do ventilador acelerando gradativamente. Note nesta figura o fenômeno de compressão da onda no tempo ou “*warping*”, similar ao mostrado na Figura 2-5 (página 19).

Os detectores comerciais utilizados realizam multiplexação no tempo na varredura dos diversos canais de uma mesma placa, anulando assim os efeitos indesejáveis de “*crosstalk*” entre os laços excitados por um mesmo cartão. Portanto a eletrônica não observa o laço continuamente, mas ao contrário, alimenta apenas um dos laços de cada vez, realizando uma varredura circular em todos eles. O tempo de excitação de cada laço e a duração total da varredura são função da sensibilidade escolhida e da quantidade de canais ativos. Isso traz algumas limitações indesejáveis à extração dos perfis magnéticos. Há por exemplo a necessidade de se esperar que o sinal estabilize no circuito após comutar a cada ciclo de excitação, aumentando o período de observação mínimo alcançável, o que limita por sua vez a precisão de medida de velocidade nos detectores (a taxa de atualização no tempo de cada amostra do perfil magnético fica mais lenta). Para ilustrar, a Figura 6-3-A mostra o estabelecimento do sinal oscilatório ⁴⁸ de duração aproximada de 1950 μs no indutor do aparato de simulação para a situação de repouso ⁴⁹. Devido às diferenças de capacitância e indutância dos dois circuitos, há um desequilíbrio momentâneo nos campos elétrico e magnético correspondentes. A partir da comutação de canal o sinal busca pela nova situação de regime: a Figura 6-3-B mostra o mesmo sinal com zoom de quatro vezes (50 $\mu\text{s}/\text{div}$), onde fica mais visível a parte transitória inicial, cuja duração é de aproximadamente 300 μs no caso mostrado. Ou seja, há neste exemplo uma espera indesejável de 15% do ciclo de observação de cada laço indutivo, o que se repete a cada ciclo completo de varredura dos canais ativos.

⁴⁷ Coleta via porta serial do detector comercial – uma amostra do perfil no tempo a cada 12 ms neste caso.

⁴⁸ Neste caso a frequência medida usando-se um osciloscópio a 200 $\mu\text{s}/\text{div}$ está em torno de 84 kHz.

⁴⁹ Situação em repouso quer dizer aqui que não há nenhum objeto metálico próximo ao sensor.

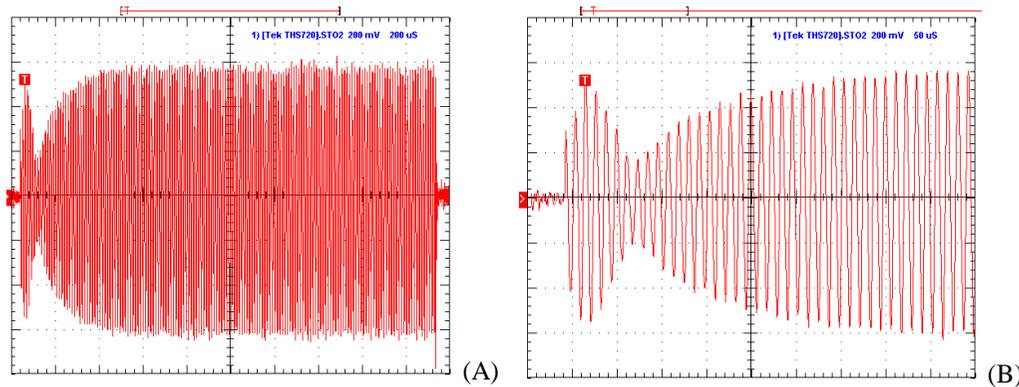
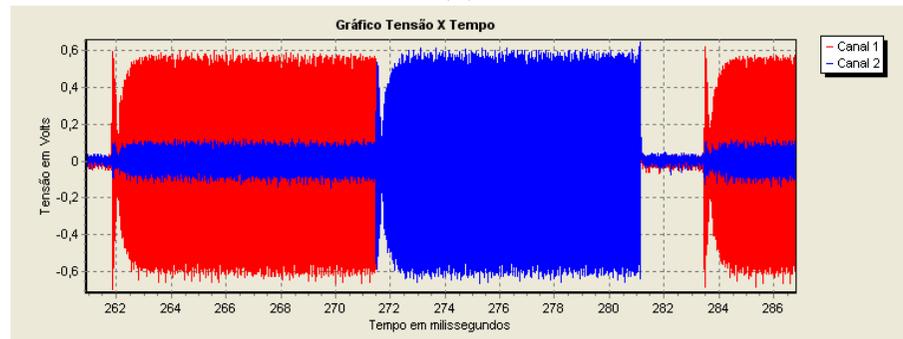
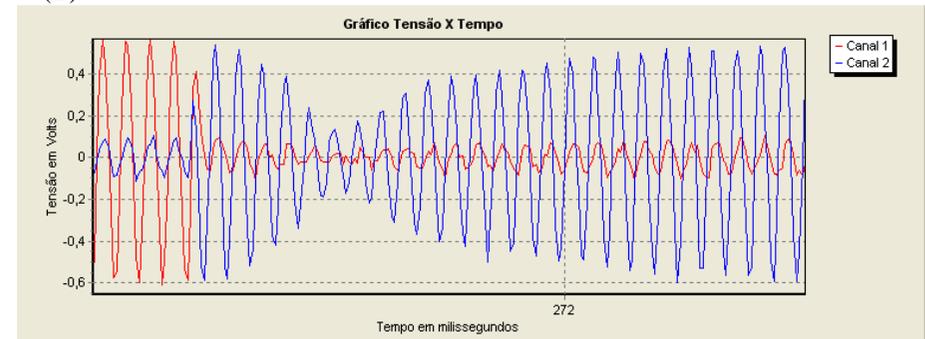


Figura 6-3: Sinal oscilatório no laço indutivo

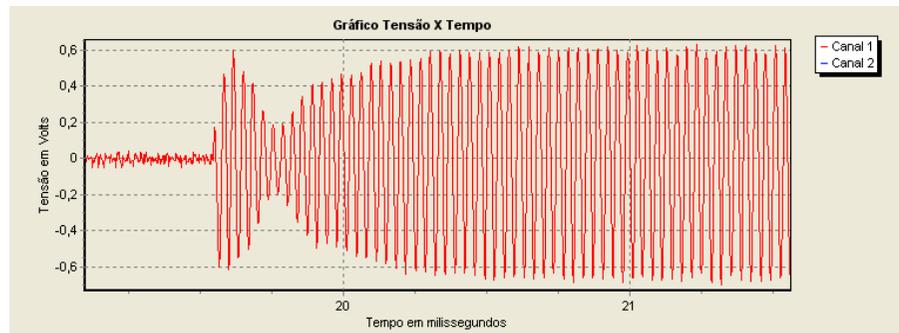
- (A) Onda conforme se vê no osciloscópio (200 mV/div, 200 μs/div);
- (B) Zoom – 50 μs/div – do mesmo sinal em (A).
- (C) Sinal captado em alta resolução (conversão A/D), dois canais mostrados.
- (D) Zoom do mesmo sinal em (C), mostrando transitório de chaveamento entre canais e "crosstalk" (ambos laços alimentados).
- (E) Transitório típico de chaveamento do circuito oscilador, de um laço indutivo previamente alimentado para o próximo laço (apenas um canal é mostrado).
- (F) Modificação no transitório em (E) quando o laço indutivo do canal imediatamente anterior (no tempo) está aberto (sem energia armazenada).



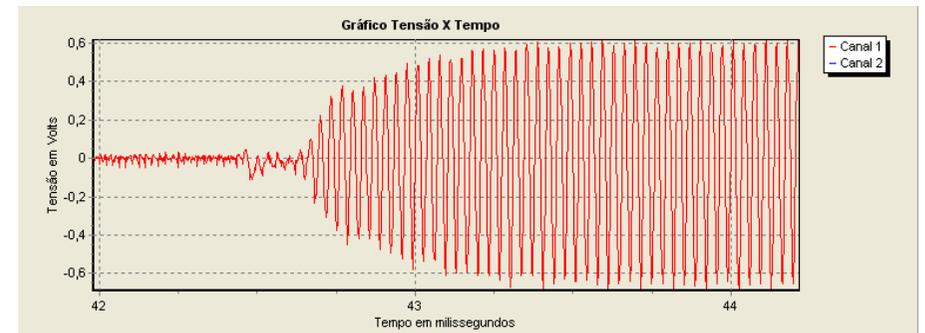
(C)



(D)



(E)



(F)

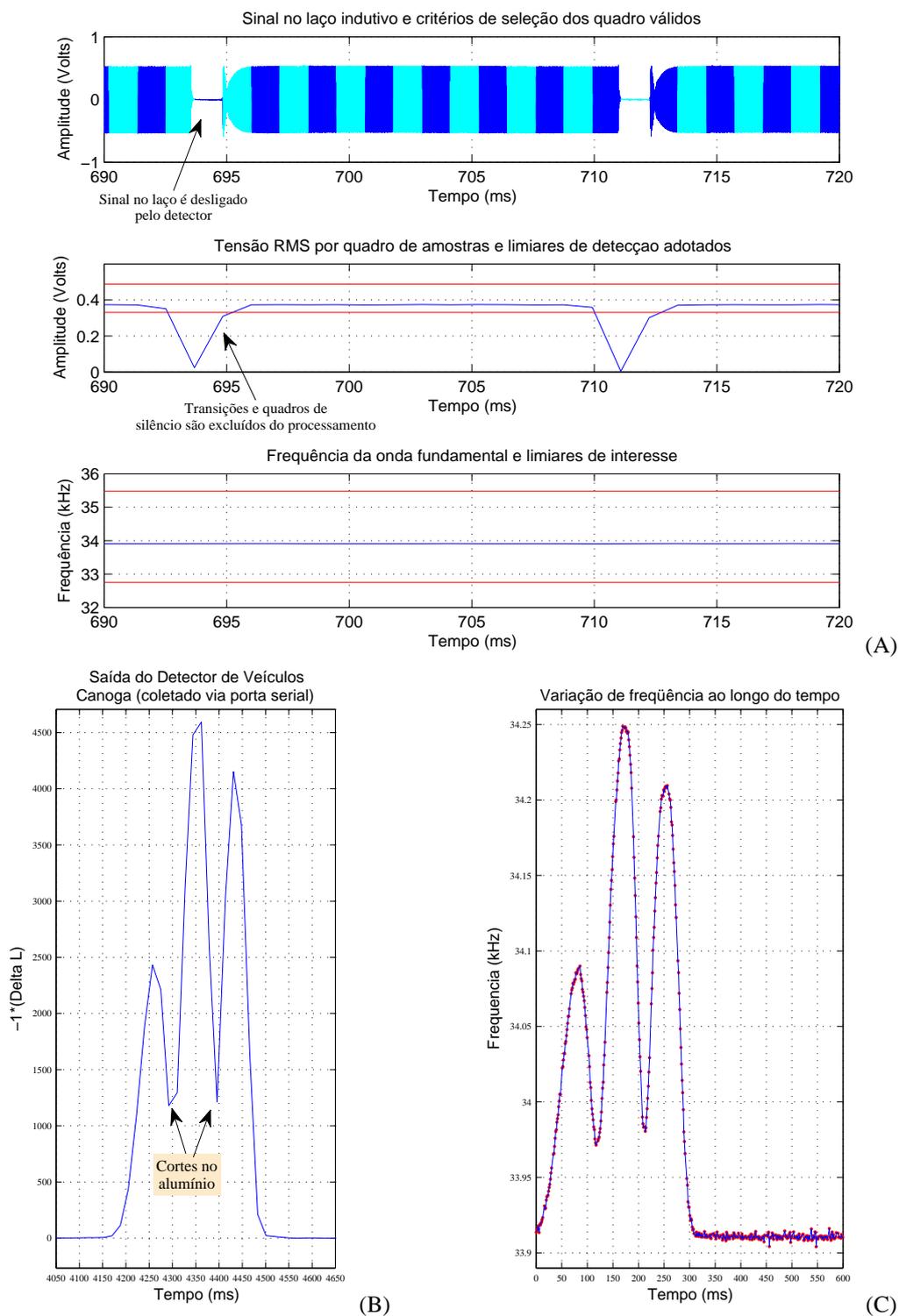


Figura 6-4: Obtenção de perfil magnético de uma folha de alumínio com dois cortes transversais, resultando em dois "vales" no perfil:

- (A) O sinal é captado em alta resolução e dividido em quadros (ou *frames*) para análise espectral. Os trechos transitórios e de silêncio são descartados (veja os limiares de tensão RMS e frequência).
- (B) Perfil obtido de forma convencional com um detector Canoga C822 de dois canais à taxa de aquisição de uma amostra do perfil a cada 16 ms (esse tempo é determinado ao se escolher a sensibilidade) captado via porta serial.
- (C) Mesma assinatura magnética obtida em alta resolução (taxa de 1,1 ms por amostra do perfil neste exemplo) utilizando o método proposto: cada ponto vermelhos em destaque corresponde a uma fatia do sinal mostrada em (A).

Ainda na Figura 6-3, em seus itens de “C” até “F”, visualizamos os sinais adquiridos pela placa A/D, obtidos a partir do software de captura descrito na Seção 5.2.2. A Figura 6-3-C mostra o sinal ativo em dois canais de um detector de quatro canais. O trecho de silêncio mostrado refere-se aos canais inativos. A Figura 6-3-D é um zoom da figura anterior, mostrando em detalhe o momento do chaveamento: a curva de tensão do canal que está sendo ligado assume sua busca pelo regime permanente de oscilação, enquanto a curva do canal que está sendo desligado busca a descarga, mas segue com uma oscilação remanescente devida ao “*crosstalk*” induzido pelo canal ligado, o que não acarreta problema algum, uma vez que tal canal não está sendo monitorado neste momento. A Figura 6-3-F mostra o sinal em apenas um canal, mas desta vez para o caso em que o circuito do laço indutivo imediatamente anterior na cadência de varredura está aberto. Note como o sinal se estabiliza muito mais rápido neste caso, se comparado com a curva da esquerda (Figura 6-3-E), correspondente ao chaveamento equivalente com ambos os laços alimentados.

A Figura 6-4-A ilustra a forma como o sinal é adquirido e processado em alta resolução: ele é amostrado e dividido em quadros (ou “*frames*”: sucessões de “claro” e “escuro”) para análise espectral. O tamanho do quadro, a sobreposição entre quadros e o passo de um quadro para o próximo são ajustáveis. Por estarmos captando sinais multiplexados, o algoritmo é capaz de rejeitar automaticamente quadros com silêncio e com transitórios. Para tanto ele verifica se o sinal encontra-se dentro de limites previamente estabelecidos de tensão RMS e de banda de frequência (curvas do meio e inferior na Figura 6-4-A, respectivamente). Os quadros que obedecem a tais pré-requisitos são selecionados e submetidos individualmente à *Decomposição Harmônica de Pisarenko – PHD* para determinação de sua frequência, revelando assim os perfis magnéticos. Para cada “*slot*” de observação do laço – que na Figura 6-4-A corresponde ao trecho “ligado” de duração 16 ms (vai do instante 695 ms ao 711 ms) – o detector comercial gera uma única estimativa de frequência, que é convertida em estimativa de variação na indutância ΔL (em relação à indutância de regime) e transmitida via porta serial para armazenagem e processamento. Amostras consecutivas no tempo obtidas desta forma formam o perfil magnético que denominamos aqui como “convencional”. Um exemplo

de perfil obtido desta forma para uma folha de alumínio com dois cortes transversais ⁵⁰, viajando por sobre o sensor encontra-se na Figura 6-4-B. Um perfil em alta resolução para o mesmo objeto – uma amostra do perfil a cada 1,1 ms – é mostrado na Figura 6-4-C para comparação.

Agora vamos estabelecer um paralelo entre o aparato de emulação e o mundo real. A *ocupação O* na Tabela 3-1, caracterizada como a medida de tempo “*b*” na Figura 3-4-D (páginas 56 e 57), é definida como o tempo de permanência de um veículo sobre um laço indutivo. Na prática ela é a medida do momento em que o veículo começa a entrar na região de laço indutivo até o momento em que ele sai desta região completamente. Intuitivamente, com um certo grau de aproximação dependente da sensibilidade do laço, a ocupação pode ser determinada então pela soma do comprimento do veículo com o comprimento do laço no sentido longitudinal (no sentido do tráfego), dividido pela velocidade do veículo:

$$b \approx \frac{\ell_{\text{veículo}} + \ell_{\text{laço}}}{v_{t12}} \quad (6-1)$$

Um perfil magnético gerado no aparato, onde a ocupação é $b = 180$ ms por exemplo, pode corresponder no mundo real a um veículo de 3,68 m viajando a 110 km/h, passando sobre um laço de 1,82 m, como mostra a Figura 6-5, pois a esta velocidade (que equivale a 30,56 m/s), um veículo percorre a distância de 5,50 m ($1,82+3,68=5,50$) em 180 ms.

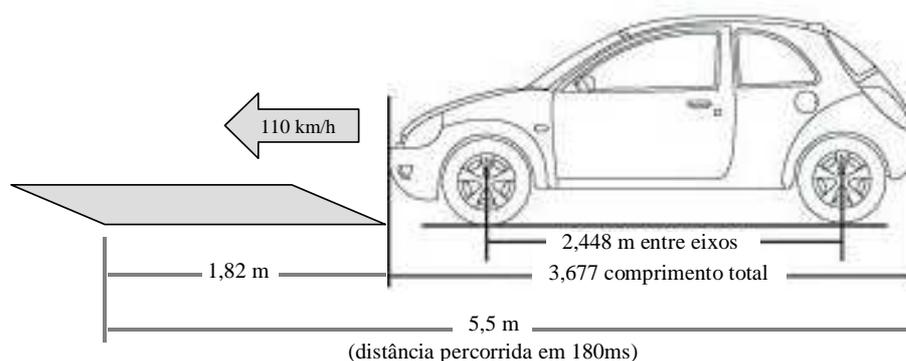


Figura 6-5: A *ocupação O* do laço (Tabela 3-1) de um veículo de 3,68 m de comprimento viajando a 110 km/h sobre um laço de 1,82 m de comprimento longitudinal é de aproximadamente 180 ms.

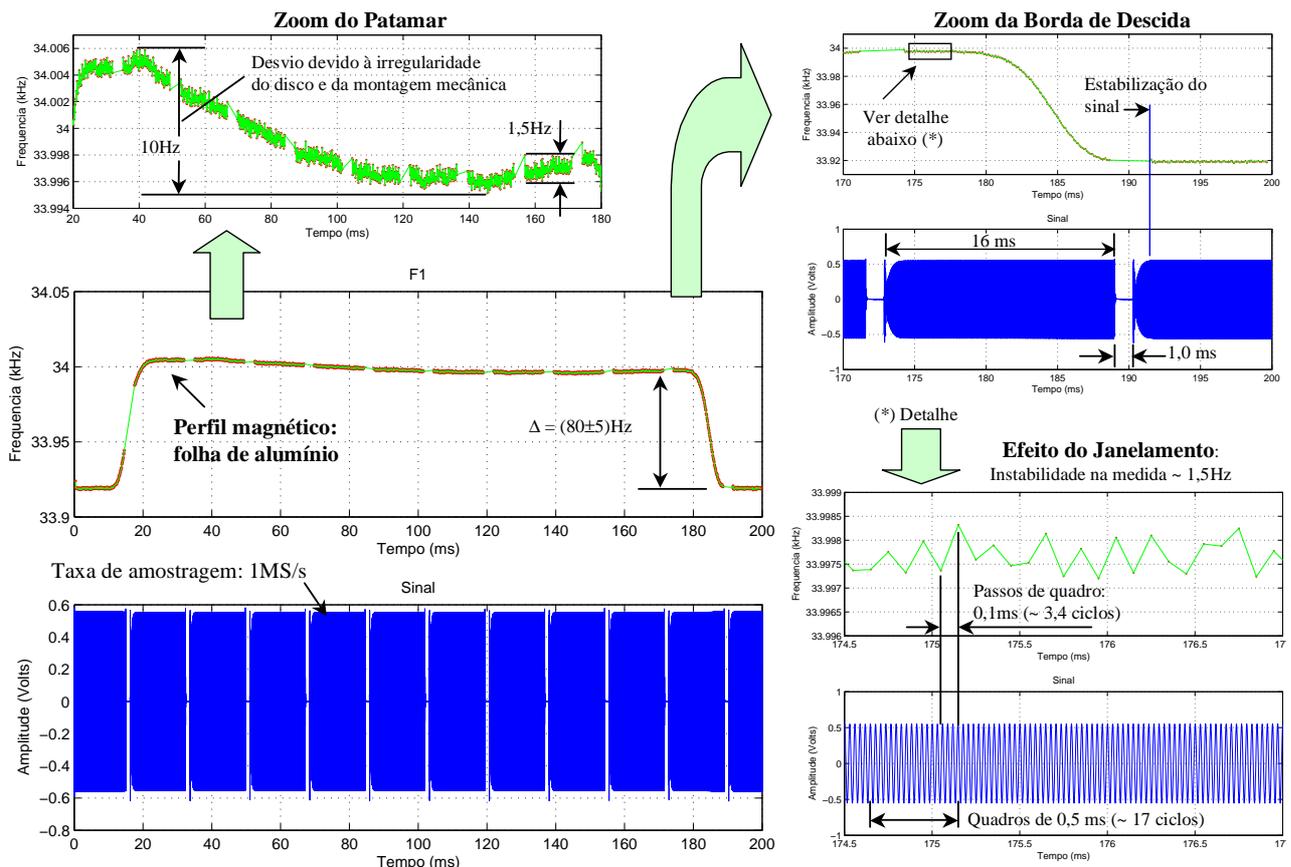
⁵⁰ As correntes parasitas induzidas no metal agem no sentido de diminuir a indutância do laço (i.e., aumentar a frequência). Os cortes, por sua vez, dificultam a passagem de tais correntes, diminuindo a influência do metal. O resultado é que o perfil aproxima-se do ponto de regime (i.e. $\Delta L=0$) na região próxima aos cortes.

Um perfil com ocupação de 180 ms, como no exemplo acima, foi captado no aparato de emulação para uma folha de alumínio disposta em forma de arco ao longo do disco de acrílico em movimento, como mostra a Figura 6-6. Como veremos agora, esta figura nos auxilia a tirar algumas conclusões referentes às limitações do aparato de emulação propriamente dito, além de possibilitar a caracterização da resolução temporal e de amplitude do método, ou seja, o alcance da técnica (algoritmos e hardware) utilizada neste trabalho para extração dos perfis em alta resolução, conforme proposto originalmente.

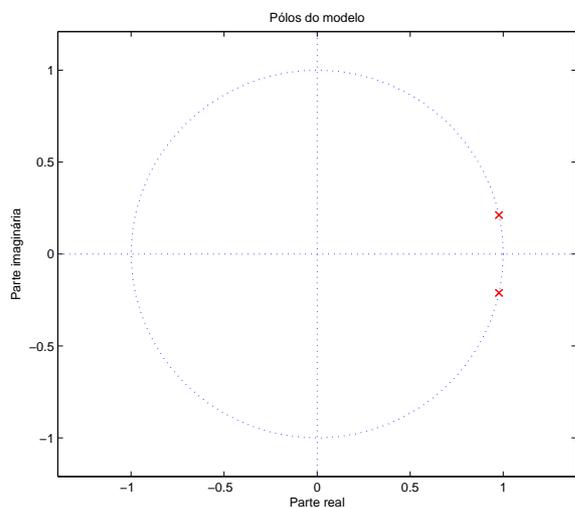
A presença da folha de alumínio neste caso foi responsável por um degrau de 80 ± 5 Hz no perfil magnético, como mostra a Figura 6-6-A. A variação de 10 Hz em torno da frequência central, ressaltada na curva “Zoom do Patamar” no alto à esquerda, deve-se à imperfeição mecânica do conjunto ventilador + discos de acrílico. Devemos ter em mente nas considerações por vir, portanto, que desvios desta ordem de grandeza, quando observados ao longo de um arco de 320° ($\approx 90\%$) de cobertura do disco, referem-se à imperfeição mecânica do aparato usado, que alteram o perfil ao fazer aproximar e afastar o metal do sensor.

O detalhe “Zoom da borda de descida”, no alto à direita, evidencia a correta seleção de quadros válidos para processamento, pois o algoritmo deixa de processar o sinal nos seus momentos de silêncio, que duram 1 ms neste caso. Note ainda que o algoritmo somente retoma a atualização do perfil magnético após a estabilização do novo sinal imposto ao laço. Vale lembrar ainda o fato de que no detector utilizado, a alimentação do laço ao longo dos 16ms irá gerar uma única amostra do perfil magnético. No exemplo mostrado, isto significa que a borda de descida irá aparecer como um simples “degrau” na curva do perfil convencional. Já a técnica de alta resolução, com os ajustes usados aqui – uma amostra do perfil a cada 0,1ms – entrega 150 amostras no mesmo período, se considerarmos, é claro, que o sinal leva aproximadamente 1 ms para se estabilizar novamente.

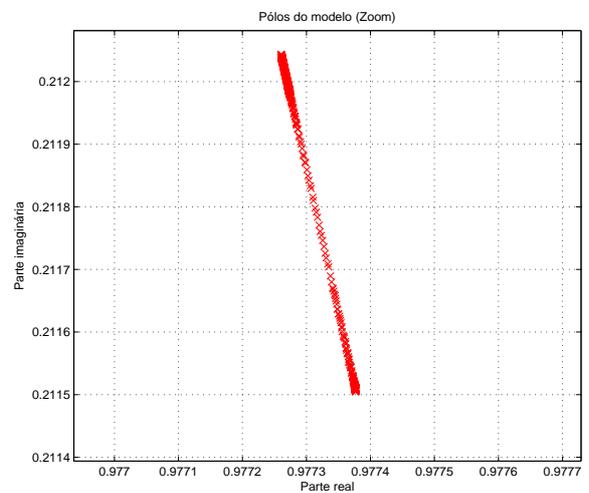
Note o trecho do perfil enquadrado e rotulado com um (*) neste detalhe. Sobre este trecho efetuamos um novo zoom – colocado embaixo à direita ainda na Figura 6-6-A: “Efeito do Janelamento” – de forma a caracterizar a resolução alcançada, que é consequência da escolha de parâmetros de ajuste do algoritmo que equilibram os compromissos conflitantes de suavização em amplitude e resolução no tempo, como tamanho do quadro, taxa de amostragem e passo de atualização.



(A)



(B)



(C)

Figura 6-6: Conhecendo as limitações do aparato de teste e a qualidade do perfil magnético obtido: (A) Perfil magnético de uma folha de alumínio contínuo em arco cobrindo 90% do disco na giga de simulação. A variação de 10Hz, mostrada em detalhe na parte superior esquerda, deve-se à irregularidade da montagem mecânica. A resolução em amplitude alcançada é de 1,5Hz e a resolução em tempo é de 0,5ms, correspondente ao tamanho da janela deslizante mostrada no detalhe embaixo à direita de (A). A taxa de atualização das amostras no tempo é de 0,1ms. (B) Diagrama de pólos do modelo PHD correspondente, para uma taxa de amostragem de 1MS/s. O ângulo do pólo corresponde à frequência do sinal. (C) Zoom da região de localização do pólo no semiplano positivo de (B), evidenciando a variação no tempo de sua posição angular, o que correspondente à variação de frequência que forma o perfil mostrado em (A).

Observamos uma resolução em amplitude não inferior a 1,5 Hz, com um passo de atualização temporal de 0,1 ms. Se considerarmos uma variação máxima esperada para o perfil de 600 Hz, temos uma classe de erro de 0,25% do fundo de escala, que é um valor perfeitamente aceitável de medida da frequência para a aplicação em estudo. O tamanho do quadro escolhido para efetuar a estimação de frequência é de 0,5 ms. No trecho mostrado no exemplo, este valor corresponde a aproximadamente 17 ciclos, pois a frequência da onda aqui varia em torno de 33.997 Hz. O algoritmo faz este quadro deslizar sobre o sinal ao passo de 0,1 ms (que corresponde a uma taxa de amostragem de 10 kHz), que por sua vez corresponde a 3,4 ciclos da onda no exemplo. Esta taxa de atualização é extremamente satisfatória para nosso estudo, ainda mais se compararmos com as taxas de atualização do perfil magnético usadas atualmente, de até 1200 Hz (ou 0,83 ms)⁵¹. E devo acrescentar que há margem para, se necessário, aumentar ainda mais esta taxa: podemos, por exemplo, escolher frequências de operação maiores para os laços (o que nos daria mais ciclos por período), ou podemos aceitar uma variação maior da amplitude do perfil magnético.

Como sabemos do Apêndice A, a Decomposição Harmônica de Pisarenko – *PHD* – assume um modelo de sinal formado por senóides complexas em ruído branco complexo aditivo. De antemão sabemos que, por originar-se de um oscilador sintonizado, o sinal é formado, pelo menos a princípio, por uma única senóide real, que pode ser modelada por um par de senóides complexas como mostra o plano complexo da Figura 6-6-B. Nele estão indicados com um “x” os pólos correspondentes ao modelo PHD obtido para o perfil mostrado na Figura 6-6-A. Os pólos neste modelo residem sobre o círculo unitário e sua variação angular ao longo do tempo nos dá a variação em frequência do sinal, i.e. o perfil magnético. Como esta variação é muito sutil⁵² para ser visualizada nesta figura, a Figura 6-6-C traz um zoom sobre um dos pólos mostrados, evidenciando sua excursão angular ao longo do tempo para o perfil mostrado Figura 6-6-A.

⁵¹ Conforme exposto no final da Seção 3.4 – Geometria do Laço Indutivo, podemos considerar para efeito prático, o estado da arte no quesito taxa de amostragem para detectores de veículos com captura de perfil, a taxa de 1200 Hz (período de amostragem 0,83 ms), sem perder de vista o trabalho de Park et. al. [81], onde são relatadas limitações ao se trabalhar nesta taxa com o detector comercial IST-222, optando-se naquele trabalho por uma taxa de 300 Hz (ou 3,3 ms de período de amostragem).

⁵² Com uma taxa de amostragem $f_s = 1$ MS/s, a banda observada de π radianos corresponde a 500 kHz ($= f_s/2$). Uma variação de 80Hz corresponde, portanto, a uma variação de apenas 0,016 %.

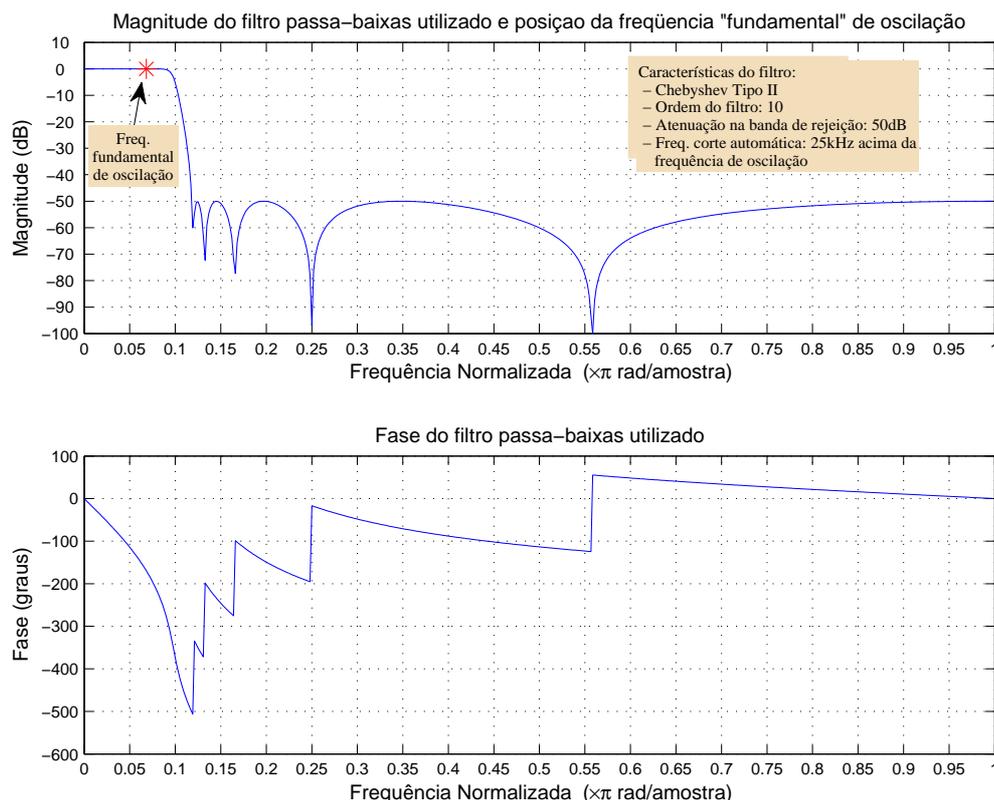


Figura 6-7: Filtro passa-baixas utilizado para restringir o estudo à oscilação de frequência fundamental, rejeitando os harmônicos gerados pelas imperfeições do oscilador.

De fato, a taxa de amostragem a 1 MS/s foi adotada originalmente para possibilitar a investigação da presença de outras frequências no sinal. No decorrer do trabalho constatou-se, contudo, que tais componentes, apesar de presentes, estavam relacionados às imperfeições do oscilador – como harmônicos por exemplo – e não à captação dos perfis magnéticos. Por este motivo, focalizamos a atenção sobre a fundamental. O algoritmo passou a contar com um filtro passa-baixas (Figura 6-7) com frequência de corte sempre 25 kHz acima da frequência fundamental de repouso e a taxa de amostragem em 1 MS/s foi mantida para aumentar o nível de confiança nas medidas efetuadas, ficando para uma etapa futura a investigação do efeito da diminuição da taxa de amostragem sobre a resolução. Também foi investigado o uso de janelas padrão (Triangular, Tukey, Blackman-Harris, etc.) e customizadas, mas o processamento do sinal não janelado (o que equivale a uma janela retangular) resultou em um perfil quatro vezes mais estável em amplitude que o melhor resultado alcançado com janelamento: na melhor condição alcançada com janelas, a instabilidade em amplitude não ficou menor que 6 Hz, quando para o processamento não janelado, como vimos na Figura 6-6, a instabilidade em amplitude ficou em 1,5 Hz. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de termos escolhido um algoritmo de estimação frequencial de alta resolução, no qual já

se pressupõe a presença de senóides puras em ruído branco. Se empregarmos as janelas, estaremos alargando a banda do sinal e dificultando com isto o rastreamento destas senóides.

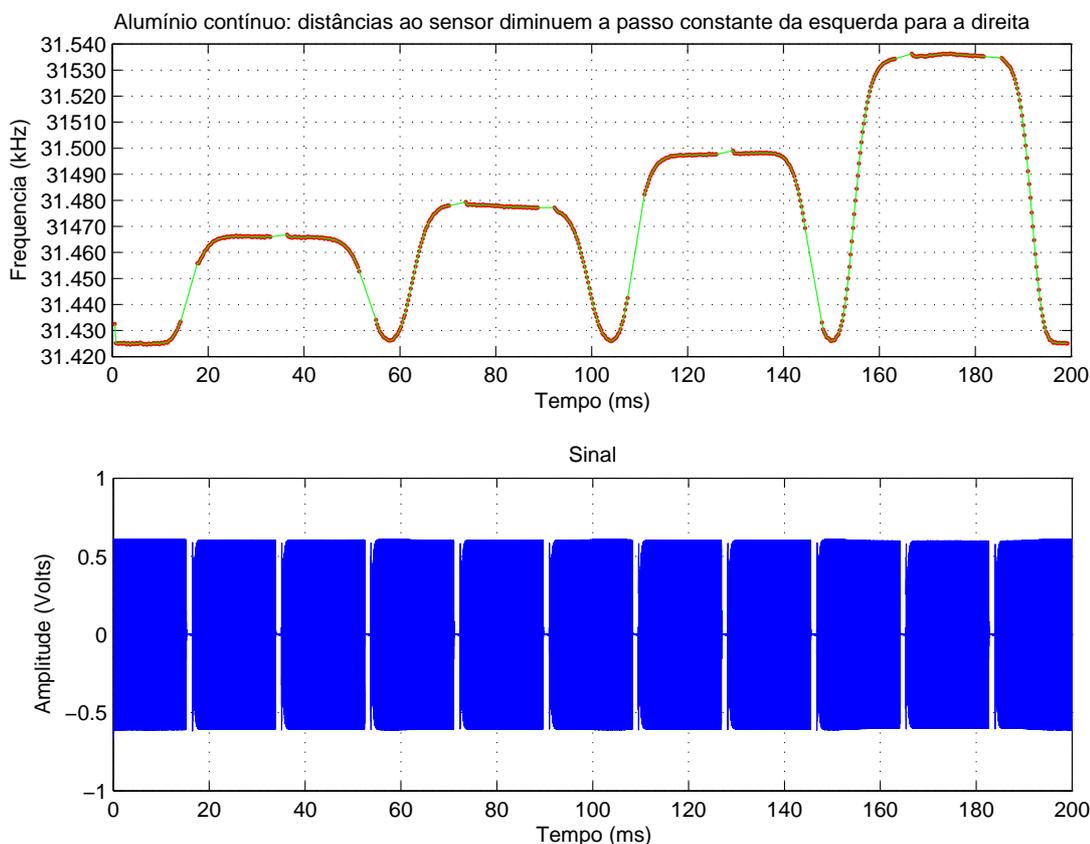


Figura 6-8: Perfil magnético de uma sucessão de folhas de alumínio montadas em "sanduíche" usando os três discos de acrílico (espessura 2mm cada), nas camadas externa mais distante do sensor, interna distante, interna próxima e externa mais próxima (esquerda para direita, respectivamente).

A Figura 6-8 traz o perfil magnético de uma sucessão de folhas de alumínio nas diversas camadas dos três disco de acrílico, ou seja, a diversas distâncias do sensor. A partir desta montagem somos capazes de caracterizar a resposta do sensor a correntes circulando em superfícies localizadas a diferentes distâncias axiais do laço, como mostra a curva na Figura 6-9. Além dos pontos referentes às camadas dos discos, esta figura traz também pontos de medida mais próximos e mais distantes do sensor. A curva mostrada é um polinômio de grau 2, confirmando a variação da sensibilidade do laço com o quadrado da distância, citada na Seção 3.2. Note ainda que a ordenada da Figura 6-9 estabelece uma correspondência entre variações de frequência ΔF e de indutância ΔL (medidos utilizando o detector comercial), que corresponde a um fator multiplicador que varia de 22,8 nH/Hz a 25,8 nH/Hz. Como vimos na Seção 3.2, esta correspondência entre frequência e indutância não é direta nem trivial devido a

vários fatores como resistência induzida, efeito pelicular, capacitâncias parasitas, etc. Como já vimos, a literatura recomenda que medições precisas de indutância dos laços, quando necessárias, sejam feitas a frequências mais baixas que as adotadas na operação normal.

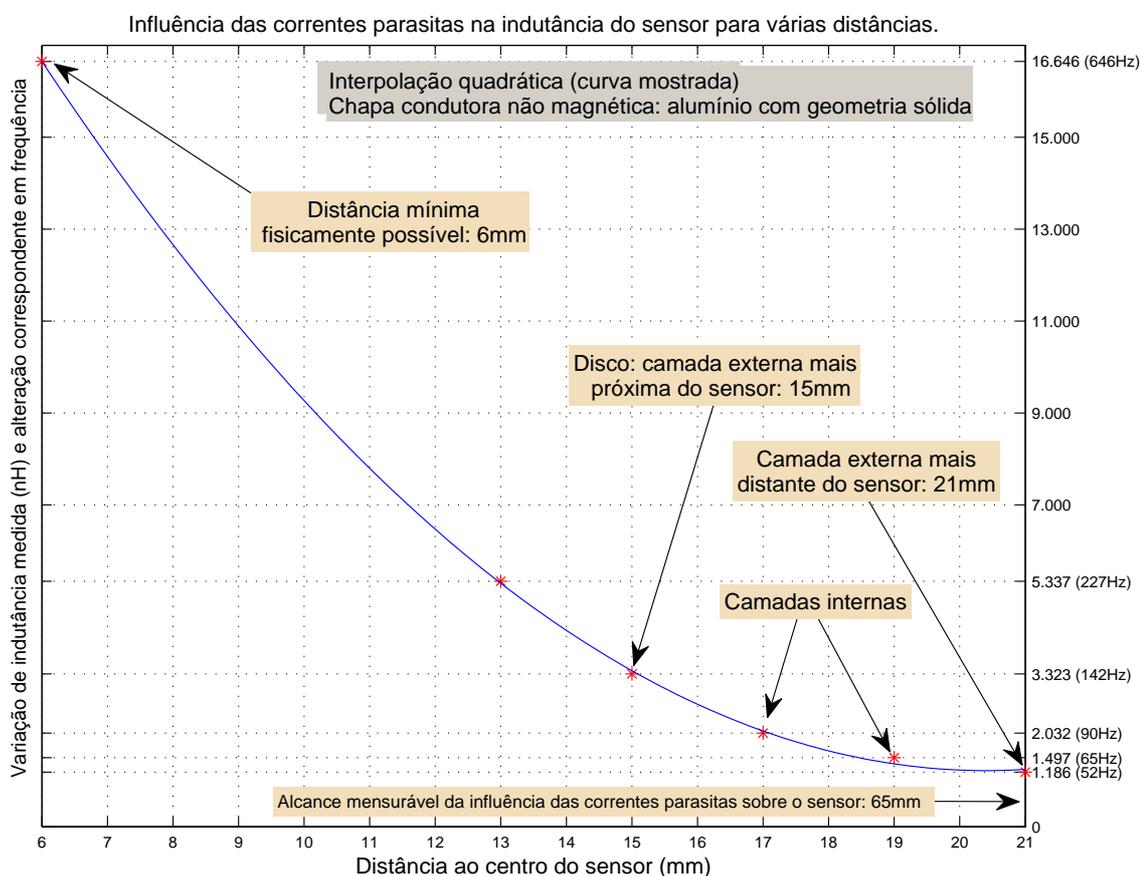


Figura 6-9: Efeito da distância do material condutivo não ferromagnético (no caso, o alumínio) e com área "infinita" na alteração da indutância do laço para o aparato de emulação de tráfego montado.

Para efeito prático neste trabalho, como não estamos interessados especificamente na medição precisa do valor da indutância, mas na sua variação relativa, e como a banda observada é estreita, adotamos um fator linear de conversão $\Delta L/\Delta F$ para toda a faixa observada. Poderíamos seguir fornecendo os perfis em valores de frequência, o que do ponto de vista de medição seria o mais correto, mas considero enriquecedor dar ao leitor uma noção da faixa de valores físicos de indutância envolvidos nas medições efetuadas neste trabalho.

Outra aproximação prática embutida na Figura 6-9 é a eliminação do efeito das bordas do material na medida. Foi constatado pela experimentação que a influência do laço é desprezível para materiais condutivos localizados transversalmente a uma distância da borda do sensor maior do que um "diâmetro do laço". Nos resultados discutidos a seguir, portanto,

escolhemos sempre dimensões transversais (no sentido perpendicular ao fluxo de veículos) com estas características. Assim focalizamos a observação da variação causada pelas bordas apenas no sentido longitudinal (sentido do deslocamento). No caso das medidas efetuadas na Figura 6-9, como elas foram tomadas em posições correspondentes a pontos centrais de patamares como aqueles mostrados na Figura 6-8, afastados mais do que um “diâmetro do laço” de distância da borda do sensor em qualquer direção, consideramos para efeito prático as medidas tomadas como sendo para área “infinita”.

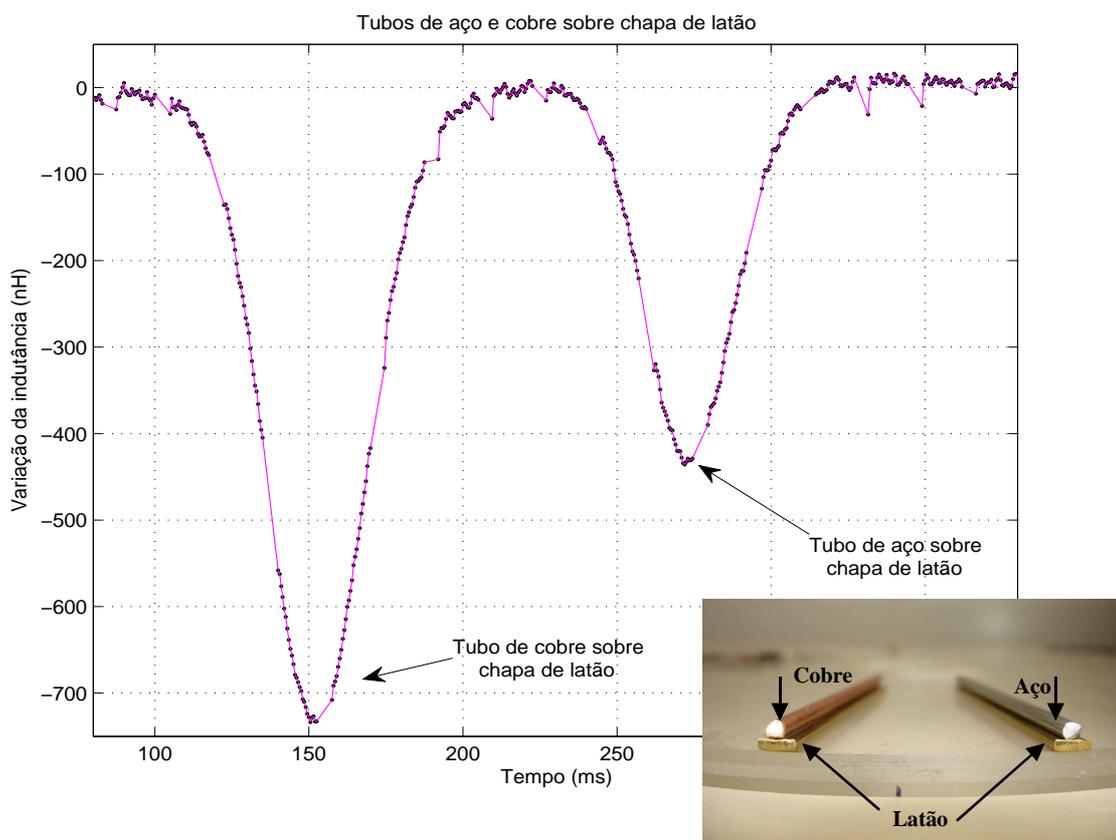
6.2 Resultados – Perfis Magnéticos

Uma vez caracterizados o aparato de emulação e a resolução alcançada pelo algoritmo empregado na obtenção dos perfis magnéticos, prosseguimos expondo resultados relacionados ao fenômeno eletromagnético em si, demonstrando a potencialidade da técnica para extração de características visando a classificação de veículos, bem como para melhoria no processo de medição de velocidade de veículos. As análises feitas a seguir são essencialmente qualitativas, uma vez que não há muitos detalhes a respeito da composição das ligas de metal usadas.

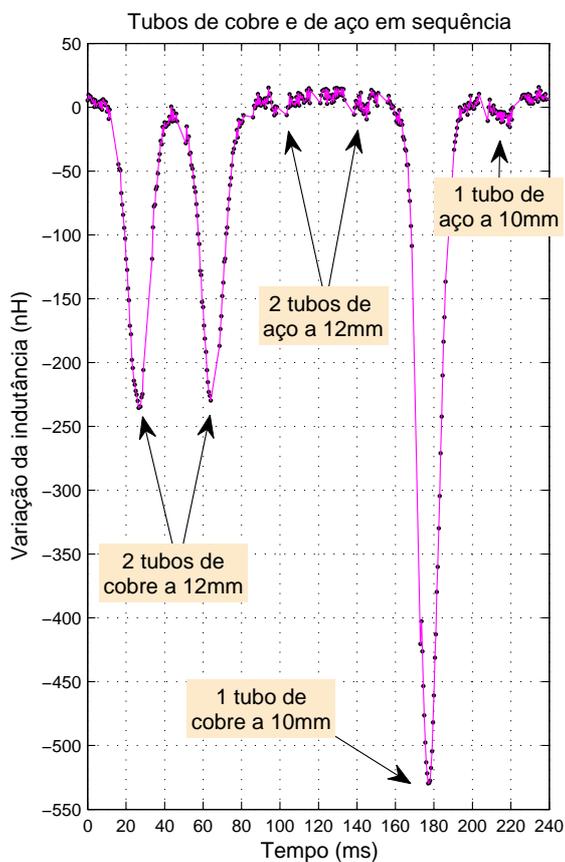
6.2.1 Contribuição dos Efeitos Físicos na Formação do Perfil Magnético

Em primeiro lugar, vamos analisar a contribuição de duas forças antagônicas na formação do perfil magnético: o efeito ferromagnético e as correntes parasitas. Como sabemos, as correntes parasitas diminuem a indutância do laço. Já a variação de indutância causada pelo efeito ferromagnético será investigada a seguir, pois irá depender da distribuição do campo magnético no interior do material, que é função de sua composição, geometria e da frequência de excitação do campo, dentre outros fatores. Para o estudo, colocamos duas barras de latão separadas e sobre elas colocamos um tubo de cobre e outro de aço com geometrias idênticas, como mostra a Figura 6-10-A.

O resultado para a geometria escolhida é uma diminuição significativa no pico máximo alcançado pelo conjunto com tubo de aço, quando comparado com o conjunto com tubo de cobre. Esta diminuição é devida predominantemente à presença do material ferromagnético, pois a geometria da estrutura nas duas situações é a mesma, e a condutividade de ambos os materiais é alta o suficiente a ponto de não ser um fator relevante na diferenciação entre ambos os casos.



(A)



(B)

Figura 6-10: Contribuições antagônicas do efeito ferro-magnético e das correntes parasitas na alteração do perfil magnético:

- (A) Tubos de cobre e de aço sobre chapas de latão (foto). A geometria é a mesma. Concluímos então que o efeito ferromagnético é responsável pela atenuação do pico referente ao tubo de aço. Para um veículo real, podemos intuir que uma roda de liga leve (primeiro conjunto) terá mais influência sobre o perfil que uma roda de aço (segundo conjunto).
- (B) Perfil para tubos de cobre e de aço (sem as chapas de latão). Em primeiro lugar, há uma sucessão de dois tubos de cobre e dois tubos de aço, todos a 12mm de distância do sensor. O perfil dos tubos de aço não é perceptível, pois o efeito ferromagnético parece compensar o efeito de correntes parasitas. Em seguida, vemos o perfil para um tubo de cobre e um tubo de aço, ambos mais perto, a 10mm do sensor. O pico devido ao tubo de cobre mais do que dobra, enquanto para o tubo de aço o perfil praticamente não se altera.

Qualitativamente, estas duas geometrias são similares às geometrias isoladas das regiões das rodas de um veículo, feitos de liga leve e de aço respectivamente, sob uma estrutura de metal não ferromagnético leve (geralmente na carcaça dos veículos predomina o alumínio).

Analisando a influência dos tubos de cobre e aço isoladamente, vemos o resultado na Figura 6-10-C, onde as chapas de latão foram removidas. Temos agora uma sucessão de dois tubos de cobre, seguidos de dois tubos de aço de igual geometria à mesma distância – 12 mm – do sensor, seguidos ainda por um tubo de cobre e um de aço, ambos 2 mm mais próximos do sensor do que os anteriores. Em primeiro lugar, note que comparados aos perfis para os tubos de cobre, os perfis para os tubos de aço são praticamente imperceptíveis. Veja como a aproximação do tubo de cobre para perto do sensor mais do que dobra o pico do perfil resultante, enquanto que para o tubo de aço a alteração com a distância é praticamente nula. Para a geometria e material usados (tubo de aço), parece haver um equilíbrio entre os efeitos ferromagnético e correntes parasitas na alteração da indutância, de forma que os tubos de aço não são captados pelo sensor.

A Figura 6-11 ilustra a construção de uma assinatura mais complexa, usando para isto montagens sucessivas com uma combinação de materiais de forma a estudar a contribuição de cada efeito na formação do perfil magnético. Em primeiro lugar, montamos uma camada de alumínio de referência a 17 mm do sensor, mostrada na primeira curva da Figura 6-11-A. Observe que existe uma leve imperfeição no patamar correspondente a esta camada de alumínio, que se deve a uma emenda do material usado, no caso preservando a condutividade. Este patamar está presente em todas as demais situações mostradas nesta figura. Por ser de material condutivo e não ferromagnético, o efeito observado é o das correntes parasitas, que age no sentido de diminuir a indutância, o que faz subir a frequência de oscilação, mostrada no eixo das ordenadas. Ilustramos este efeito de agora em diante com setas ascendentes sempre que necessário nos gráficos onde a ordenada for a frequência.

A seguir, na curva logo abaixo, colocamos dois recortes também de alumínio na camada mais próxima, a 15 mm do sensor, que resultam em dois picos no perfil nos locais dos recortes. O comprimento longitudinal dos recortes é escolhido igual ao diâmetro externo do sensor.

Na terceira curva, substituímos os dois recortes de alumínio por dois recortes de aço na mesma posição e com as mesmas dimensões, sendo o primeiro de aço inoxidável e o segundo de aço silício de grão orientado, este último usado normalmente no projeto de

transformadores elétricos, portanto com permeabilidade magnética propositalmente maior do que a do aço inoxidável. O efeito ferromagnético age no sentido das setas descendentes, diminuindo a frequência de oscilação devido ao aumento da indutância do laço. Contudo, à medida que o material viaja, o recorte penetra na área de influência do laço indutivo e o efeito das correntes parasitas se fortalece (setas ascendentes), sendo que o formato do pico assim formado (correntes circulando no aço) lembra o formato visto para os recortes de alumínio na curva logo acima.

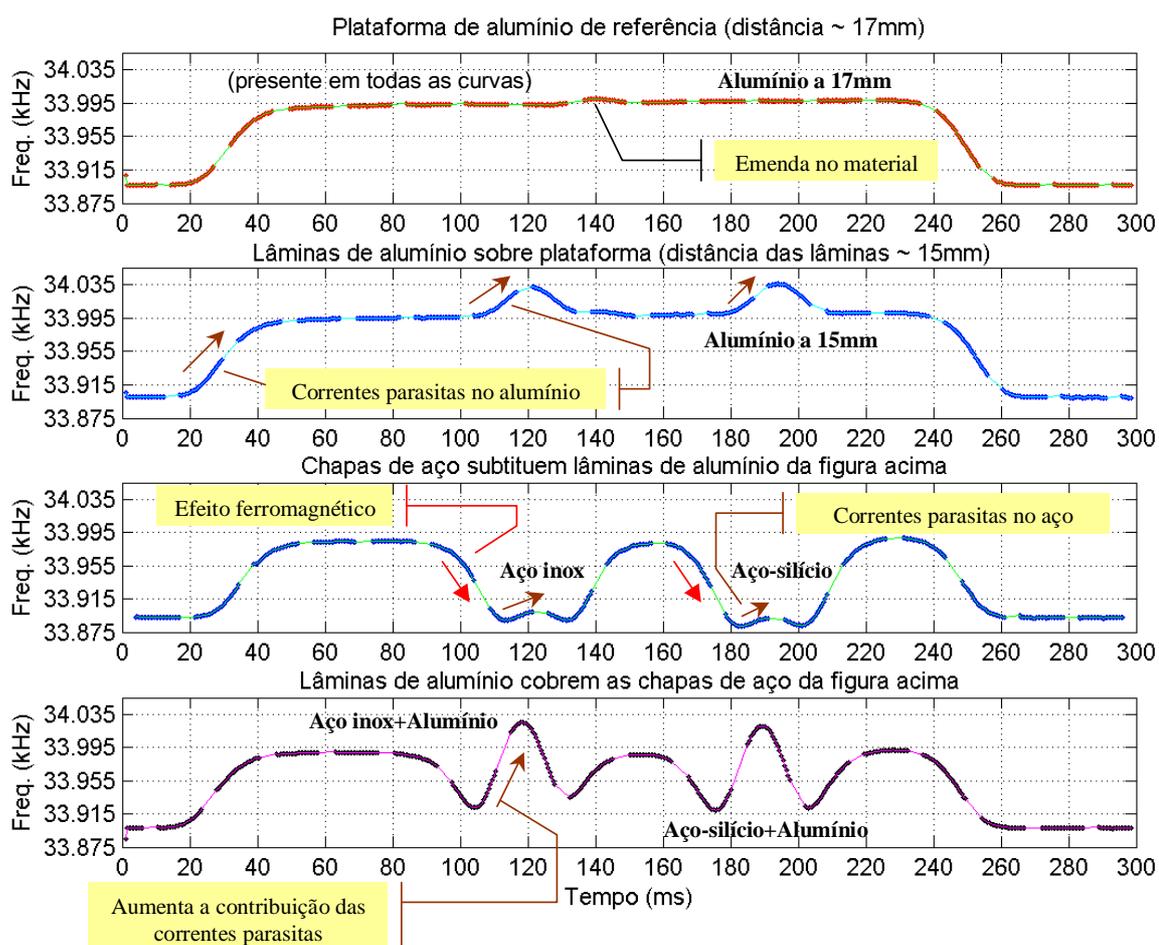


Figura 6-11: Contribuições antagônicas do efeito ferromagnético e das correntes parasitas no perfil magnético: recortes eletricamente isolados de alumínio e de aço são montados sobre uma plataforma de alumínio de referência (primeira curva). Para cada tipo de material, as curvas mostram sempre as correntes parasitas contribuindo para a diminuição da indutância do laço – o que reflete no aumento da frequência (setas ascendentes) – e o efeito ferromagnético que age no sentido contrário, aumentando a indutância (setas descendentes).

Por fim, na quarta curva da Figura 6-11, cobrimos os recortes de aço com folhas de alumínio, o que só fez aumentar a contribuição das correntes parasitas na formação do perfil magnético como um todo.

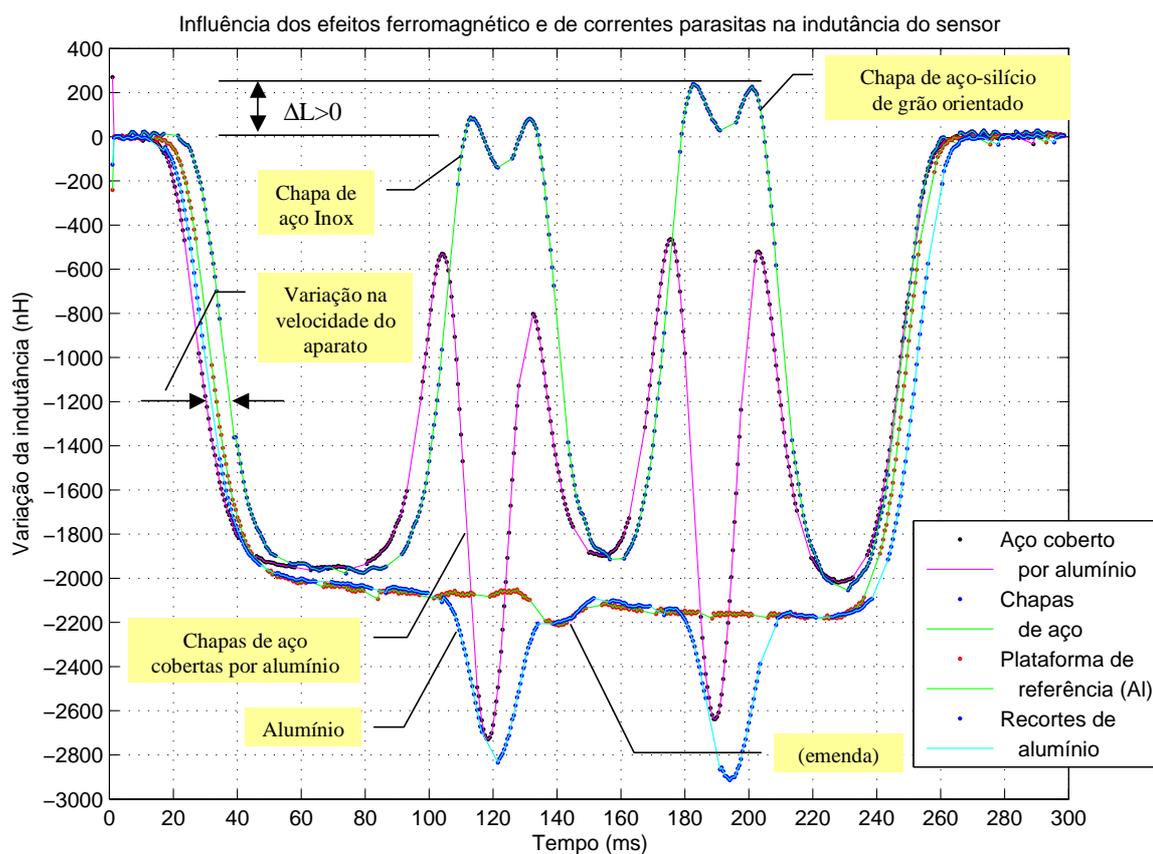


Figura 6-12: Perfis magnéticos da Figura 6-11 convertidos para variação de indutância ΔL e colocados em um mesmo gráfico. Vemos mais claramente nesta figura a maior contribuição do efeito ferromagnético do aço-silício de grão orientado (usado em construção de núcleos de transformadores) – devido à sua maior permeabilidade magnética em relação ao aço inox, pois o ΔL chega a ter um degrau máximo no sentido positivo de 2400 nH para o aço-silício, enquanto que para o aço inox o degrau máximo é de 2180 nH.

Ao converter estas quatro curvas para valores de alteração de indutância ΔL e colocá-las em um mesmo gráfico para comparação, temos a Figura 6-12. Nela, como a escala das ordenadas está mais expandida, fica mais evidente que o efeito ferromagnético é suficiente para causar até mesmo uma variação positiva da indutância ($\Delta L > 0$). Alterações positivas de indutância em relação ao patamar de repouso são normalmente entendidas pelos algoritmos dos detectores comerciais como um novo “patamar” de repouso a ser estabelecido. Esta interpretação é razoável em diversas situações, como em variações ambientais, alguma alteração no pavimento ou mesmo uma re-adequação natural devida a veículos estarem parados sobre o laço no momento em que o detector é ligado: ao sair de cima do laço, o veículo provoca uma variação da indutância no sentido positivo, sendo necessário estabelecer uma nova frequência de repouso. Mas nenhuma destas condições foi a causa da variação

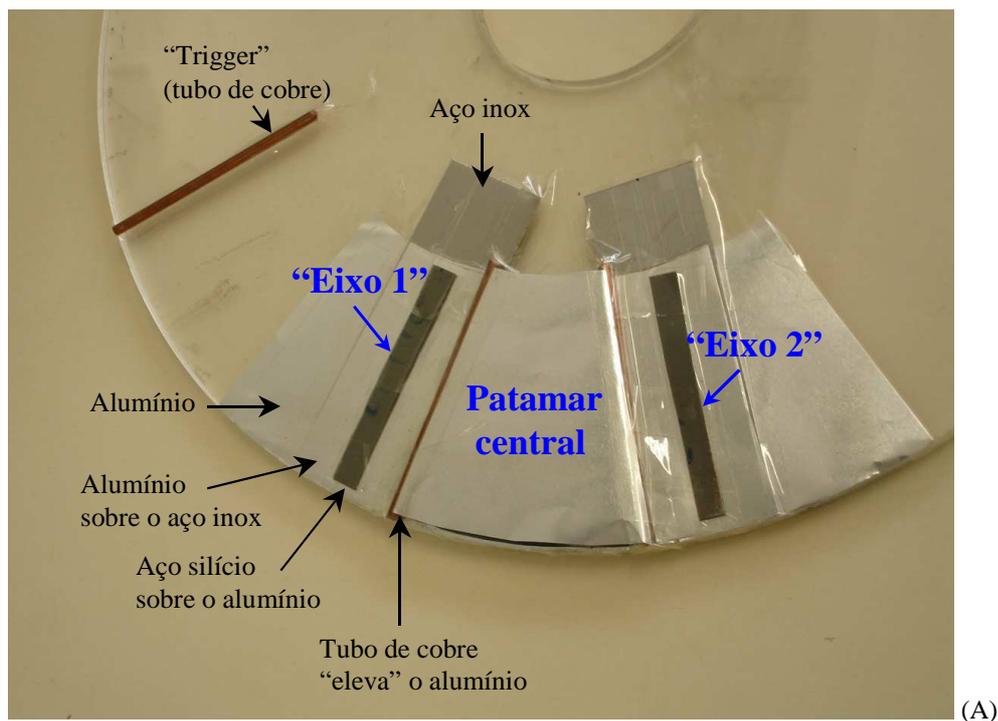
positiva de indutância mostrada na Figura 6-12. No exemplo mostrado, um efeito ferromagnético transitório causou esta variação.

Em tecnologias de detecção simples de veículos por comparação com limiares fixos, a adoção de laços indutivos de comprimento menor – visando obter mais detalhes do perfil por exemplo – podem levar a variações positivas de indutância e, conseqüentemente, resultar em uma interpretação errônea do sinal: não só veículos individuais podem ser interpretados por tais detectores como sendo vários veículos, (acarretando erros na medição de velocidade e na contagem de tráfego), como novos limiares internos de comparação para detecção podem ser estabelecidos além do desejado ao tomarem como base de referência um “patamar de repouso” falso, diminuindo a sensibilidade do conjunto detector, até que ele seja “reiniciado” ou que uma variação lenta o suficiente para ser entendida como “ambiental” volte a estabelecer os limiares em um valor mais realista. Esta é uma séria desvantagem da detecção por comparação simples com limiares fixos, que pesa a favor da recomendação de que, como veremos adiante, a forma de onda seja tratada como um todo não só quando objetivamos a contagem e classificação de veículos, mas também quando desejamos a medição da sua velocidade.

Ainda na Figura 6-12 podemos ver mais claramente a maior ação do efeito ferromagnético do aço-silício de grão orientado em comparação com o aço inox, pois a excursão do perfil no sentido positivo da variação de indutância é bem maior para o aço silício do que para o aço inox. A partir do ponto estabelecido pela plataforma de referência (em torno de 2100 nH), a excursão máxima no sentido positivo de ΔL para o aço-silício é de aproximadamente 2400nH, enquanto que para o aço inox a excursão é menor, de aproximadamente 2180 nH.

6.2.2 Medição de Velocidade por Correlação Cruzada dos Perfis Magnéticos

Conhecendo os efeitos práticos da geometria e da composição dos materiais sobre a forma do perfil magnético, podemos “montar” e captar no aparato de emulação perfis na forma que desejarmos, obtendo com isso a capacidade de reproduzir em laboratório os perfis encontrados no mundo real e estudar como e porque eles adquirem sua forma final. Observe a montagem exemplo na foto da Figura 6-13-A.



Estrutura metálica montada na giga, com perfil magnético similar ao de um automóvel passando sobre uma lâmina sensora

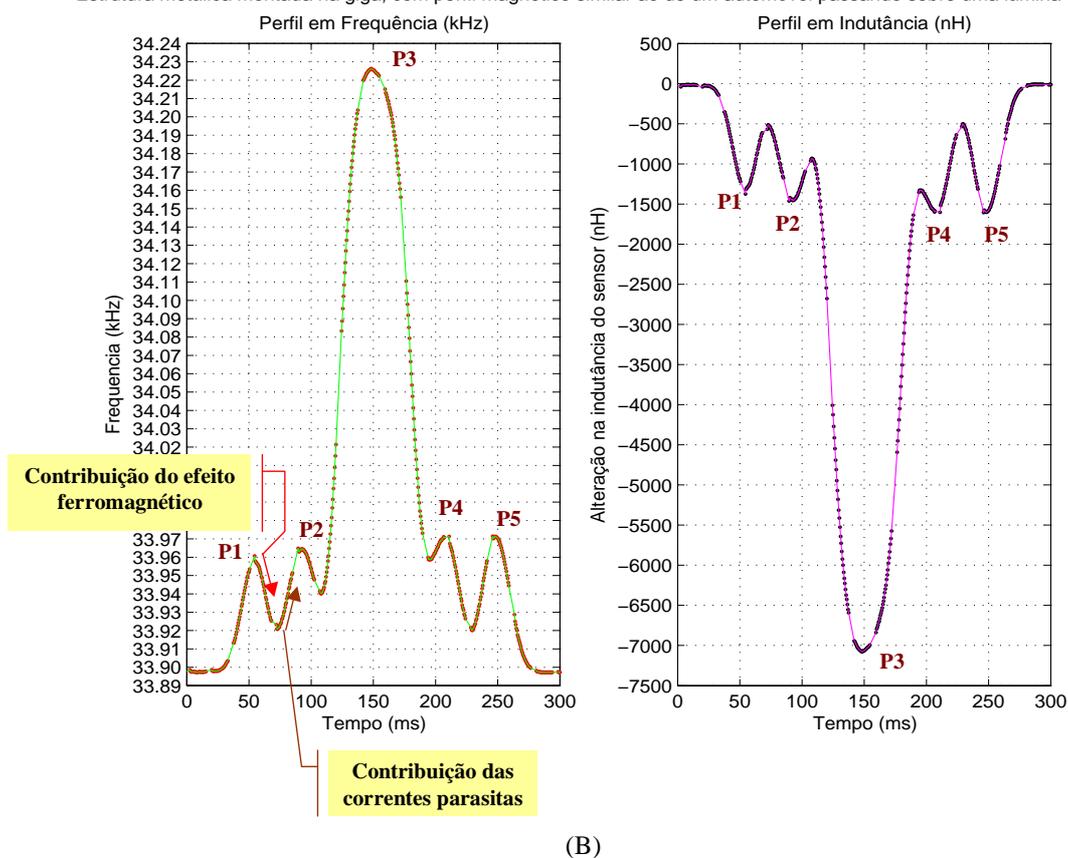


Figura 6-13: Exemplo de montagem de perfil magnético que busca similaridade com o perfil de um veículo de passeio de 2 eixos passando sobre a lâmina sensora descrita na Seção 2.4: (A) Disposição do material usado na montagem da giga. (B) Curva da esquerda: perfil magnético em frequência. (B) Curva da direita: mesmo perfil magnético da esquerda convertido para variação de indutância ΔL correspondente no laço indutivo.

A estrutura mostrada resulta em um perfil similar àquele obtido pela lâmina sensora⁵³, como ilustra a Figura 6-13-B. Vamos agora usar a estrutura mostrada na Figura 6-13 e seu perfil correspondente para demonstrar os resultados alcançados na melhoria da precisão de medição de velocidade através da correlação cruzada, conforme proposto neste trabalho e descrito na Seção 3.6: supondo uma distância D previamente conhecida entre dois laços indutivos, a velocidade v_{r12} de um objeto se deslocando sobre eles em configuração “armadilha de velocidade” pode ser medida a partir do tempo $\tau_v = (t_2 - t_1)$ de deslocamento entre o primeiro e o segundo laço – equação (3-2). Sabemos que a forma convencional de se determinar este tempo, sujeita a uma série de desvantagens já elencadas, é por comparação com limiares fixos. A medição de velocidade por correlação cruzada fornece uma forma mais robusta e precisa de calcular o tempo de deslocamento. Como os laços têm a mesma geometria e os perfis magnéticos referem-se ao mesmo objeto, espera-se que os perfis coletados sejam maximamente correlacionados para um atraso de tempo τ igual ao tempo de deslocamento. Desta forma, efetuamos a correlação cruzada dos perfis – equação (3-3) – e determinamos seu ponto máximo m_{Rmax} , que irá corresponder ao tempo de deslocamento desejado. Por conseguinte, com os valores da distância D e tempo de deslocamento m_{Rmax} disponíveis, temos como calcular pela equação (3-5) a velocidade v_{r12} do objeto, obtida usando o estimador correlação cruzada:

$$v_{r12} = \frac{D}{m_{Rmax}} \quad (3-5)$$

Como neste trabalho capturamos o sinal usando um conversor A/D em paralelo com um detector comercial, temos controle da taxa de amostragem do conversor, mas não temos controle sobre como e quando o detector excita o laço indutivo. Como este detector alimenta de forma multiplexada seus diversos canais, não temos como obter uma amostragem contínua e uniforme do perfil magnético, como fica evidente na Figura 6-14. As duas curvas inferiores mostram o sinal em cada um dos laços, alimentado por um mesmo detector de dois canais modelo Canoga C822. Quando um dos canais está ligado e alimentado, o outro canal está desligado. A onda remanescente em qualquer dos canais durante o período “desligado” deve-se, como já sabemos, à indução causada pelo sinal no canal ativo. No exemplo mostrado, cada

⁵³ Para visualizar um perfil típico da lâmina sensora, refira-se à Seção 2.4, Figura 2-8 e posteriores (pg. 22).

laço permanece 16 ms alimentado e o ciclo de varredura total para os dois canais é portanto de 32 ms. Podemos concluir daí que na configuração mostrada, o detector comercial é incapaz de gerar medições de tempo envolvendo dois canais com resolução inferior a 32 ms.

A curva na parte superior da Figura 6-14 é o perfil magnético obtido usando a técnica de alta resolução, onde fica claro o resultado da multiplexação efetuada pelo detector para a velocidade do objeto: a perda de informação considerável acerca de seu formato. A forma do perfil deveria corresponder àquela mostrada na Figura 6-13, onde enumeramos os picos encontrados de P_1 a P_5 , de forma a facilitar a comparação. Identificamos com um “?” aqueles picos presentes na Figura 6-13 e ausentes na Figura 6-14. Embora desejável, nesta aplicação não temos como pré-requisito a preservação da “informação” contida no perfil magnético conforme dita o teorema de Nyquist. Contudo é interessante apreender a partir da análise feita a seguir que, apesar desta perda de informação, é possível obter ganhos razoáveis na precisão da medida.

Vamos tomar como referência os picos máximos de ambos perfis para estabelecer uma linha de base confiável para a medida do tempo de deslocamento. O instante de ocorrência do pico P_3 do primeiro laço situa-se em 603 ms. Como P_3 para o segundo laço não está disponível, seu instante de ocorrência em 728 ms foi estimado graficamente, calculando-se o ponto médio a partir das amostras da base da curva correspondente ao patamar central. O tempo de deslocamento entre laços obtido desta forma é $\tau_v = 728 - 603 = 125$ ms. O tempo de deslocamento $m_{Rmax} = 121,5$ ms obtido pelo método da correlação cruzada é mostrado na Figura 6-15-A, o que resulta em um erro de aproximadamente 4 ms. Este erro é oito vezes menor que o ciclo de varredura (32ms) e quatro vezes menor que o período de observação do sinal (16ms). Ou seja, pelo método da correlação cruzada, no qual tratamos a onda como um todo, somos capazes, na pior das hipóteses, de aumentar em pelo menos oito vezes a resolução da medida, mesmo contando com um sinal onde reconhecidamente há considerável perda de informação acerca do perfil real.

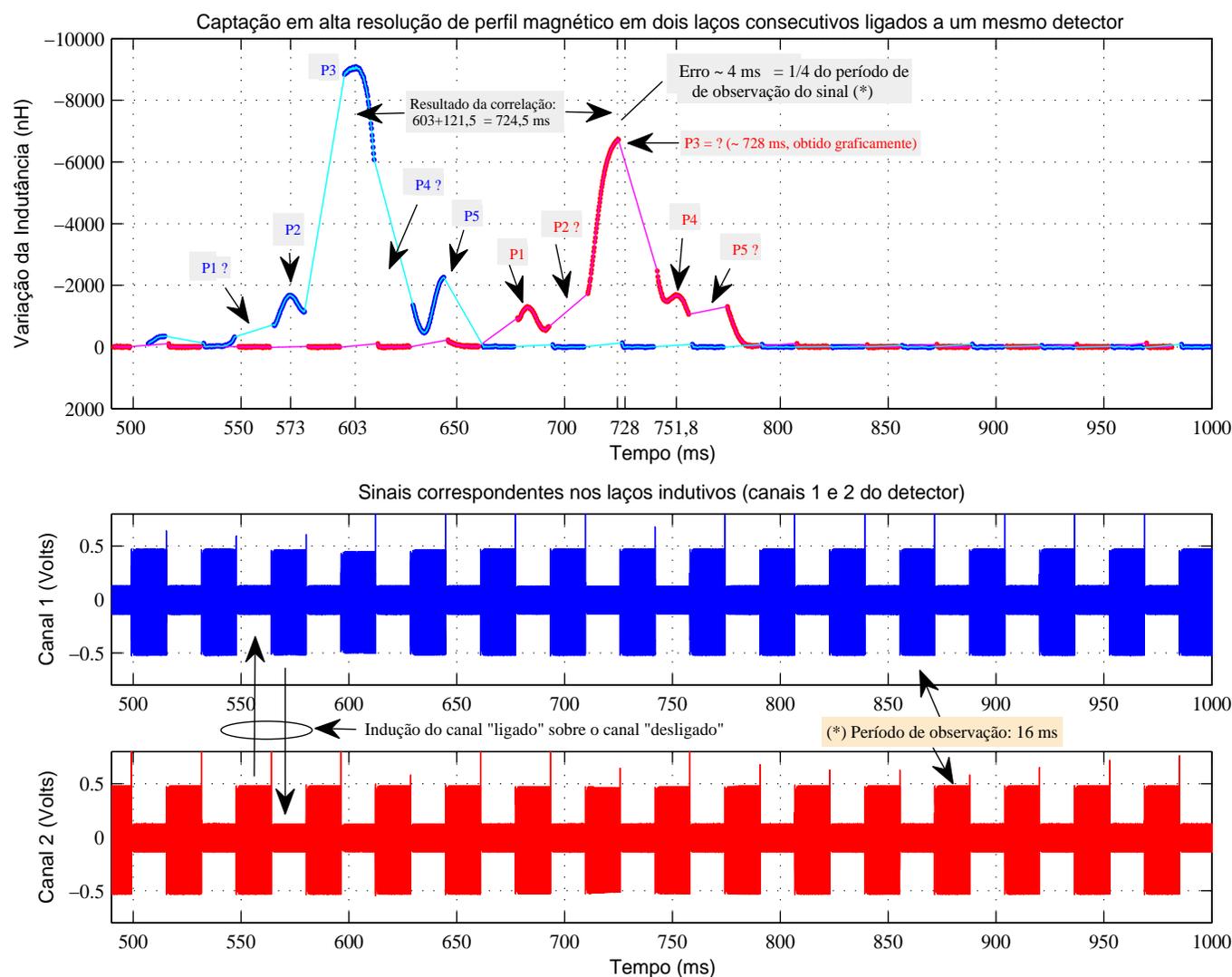


Figura 6-14: Captação dos perfis magnéticos da estrutura mecânica mostrada na Figura 6-13 em dois laços indutivos consecutivos em configuração "armadilha de velocidade". Como se pode ver, os perfis foram captados em dois canais multiplexados de um mesmo detector Canoga C822.

- As duas figuras inferiores mostram os sinais nos dois canais, evidenciando a indução do canal "ligado" sobre o canal "desligado" e a duração da observação em 16ms por ciclo de varredura.
- A figura superior mostra os perfis magnéticos correspondentes. Eles estão "truncados" devido à multiplexagem. O perfil esperado é como mostrado na Figura 6-13-B. Os picos observados naquela figura foram numerados de P1 a P5 e identificados aqui. Os picos faltantes estão indicados com um "?".
- O instante de ocorrência do pico P3 do primeiro laço situa-se em 603ms. Como P3 para o segundo laço não está disponível, seu instante de ocorrência em 728 ms foi estimado graficamente, calculando-se o ponto médio a partir das amostras da base da curva correspondente ao patamar central (mais especificamente em $\Delta L = -2000$ nH).
- O tempo de deslocamento entre laços é então de $728 - 603 = 125$ ms. O tempo de deslocamento dado pelo método da correlação cruzada (Figura 6-15) é de 121,5ms, o que resulta em um erro de aproximadamente 4ms. Este erro é oito vezes menor que o ciclo de varredura (32ms) e quatro vezes menor que o período de observação do sinal (16ms), valores estes que limitam a precisão máxima alcançável pelo detector comercial utilizado (na sensibilidade ajustada).

Digo na pior das hipóteses, pois atente para o fato de que as amplitudes dos perfis para os dois canais na Figura 6-14 não são as mesmas. Sabemos que a excursão máxima da amplitude dos perfis varia em função da frequência de repouso em torno da qual o objeto é observado pelo sensor, o que por sua vez é função de alguns fatores incontroláveis no mundo real, como fator de qualidade Q , indutâncias e capacitâncias parasitas do cabo alimentador ou pequenas diferenças na indutância dos laços, etc. Esta diferença na amplitude age no sentido de aumentar o erro de medida na detecção por comparação com limiares fixos. Este problema não existe no conceito de medição por correlação cruzada, pois nele avaliamos a similaridade das formas de onda.

6.2.3 Algoritmo para Estimação de Correlação – Amostragem Não Uniforme

Para se estimar a correlação cruzada dos perfis magnéticos sem a disponibilidade de amostras uniformemente distribuídas no tempo (lembre-se que o sinal é interrompido periodicamente devido à multiplexação) foi implementada uma adaptação do algoritmo proposto na equação (3-4), que faz uso apenas das amostras disponíveis, associando a cada ponto de correlação obtido uma medida de confiança, na forma da contagem do número de operações média efetuados (Figura 6-15-B):

- I. Cada amostra disponível dos perfis é inicialmente rotulada com o seu instante de ocorrência no tempo e guardada em dois vetores bidimensionais [ΔL ; instante (s)].
- II. A seguir o algoritmo percorre todas as amostras dos vetores assim formados, efetuando os cálculos de multiplicação cruzada necessários (veja na equação (3-3)) entre as amostras dos perfis.
- III. À medida que executa cada multiplicação, ele consulta a diferença relativa no tempo entre as amostras da vez, usando este valor para indexar a posição correspondente ao resultado em um vetor de acumulação dos resultados. Concomitantemente, o algoritmo armazena em um vetor a contagem de quantidade de operações realizadas para cada um destes índices.
- IV. Ao final, o vetor de acumulação é dividido elemento a elemento pelo vetor de contagem de operações, resultando na melhor estimativa correlação cruzada possível de se obter com as amostras disponíveis. Esta operação média do estimador corresponde à aproximação do operador “valor esperado” na equação (3-3).

O vetor de contagem de amostras resultante do algoritmo descrito pode ainda ser usado para estabelecer o nível de confiança estatística individual para cada ponto da função de correlação obtida. É o que mostra a Figura 6-15-B. Note que as estimativas de correlação cruzada com menos que 10% da contagem máxima obtida (10% de 890 = 89 amostras) não são mostradas na Figura 6-15-A, nem tampouco consideradas para determinar o valor máximo correspondente a m_{Rmax} .

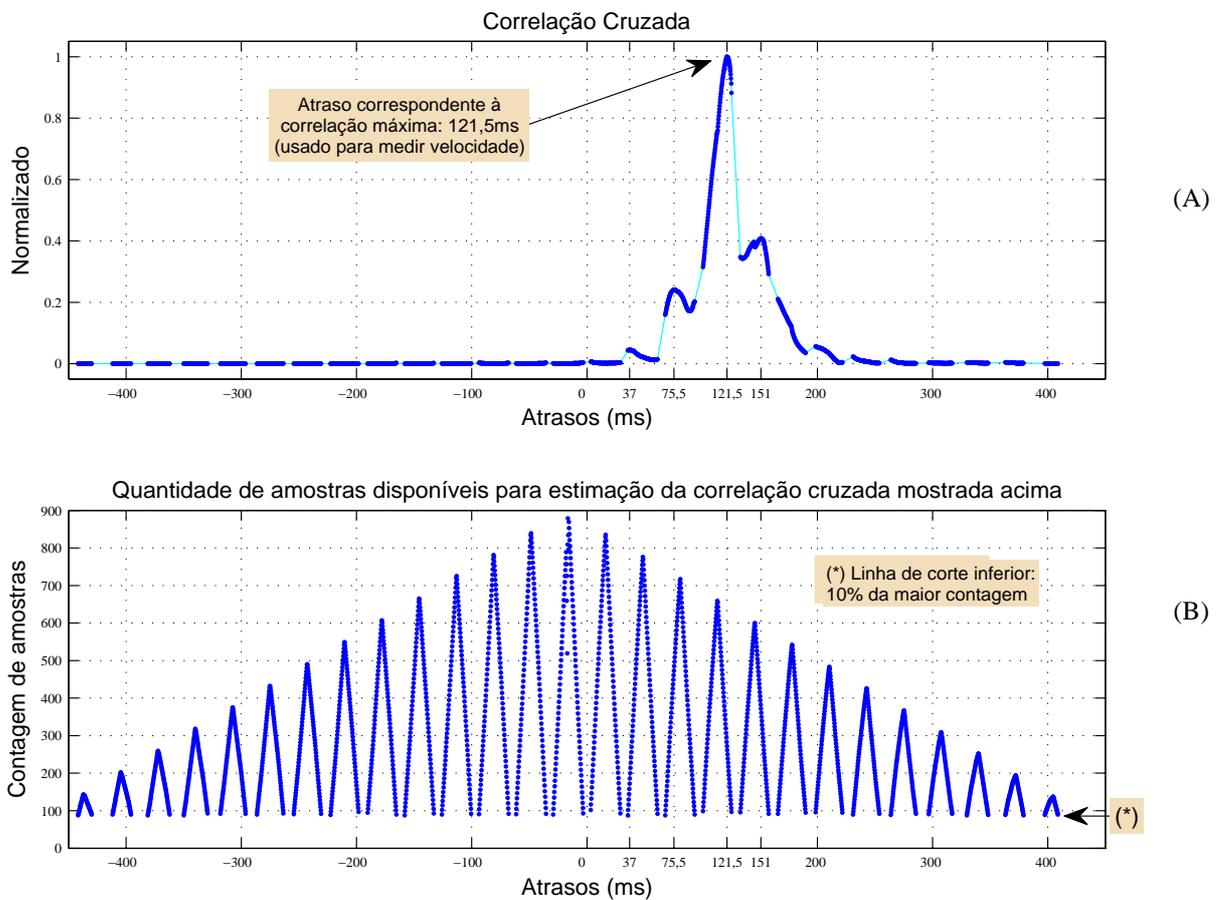


Figura 6-15: (A) Correlação cruzada dos perfis mostrados na Figura 6-14 para determinação de velocidade. O atraso de 121,5 ms no ponto máximo da curva corresponde à medida m_{Rmax} que buscamos: a separação no tempo dos perfis na Figura 6-14, i.e. o tempo de deslocamento do objeto no percurso de um laço para o outro. (B) Quantidade de valores disponíveis, usados pelo estimador de correlação, com linha de corte a 10% da contagem máxima: estimativas de correlação feitas com quantidade de realizações abaixo desta contagem não são mostradas.

6.2.4 Exemplo de Análise de Perfil Magnético Complexo

Com o conhecimento do aparato de testes e suas limitações, do desempenho do algoritmo e dos fenômenos eletromagnéticos sobre o perfil, podemos exercitar o entendimento de assinaturas mais complexas. Montamos diversos materiais dispostos nas várias camadas dos discos de acrílico, conforme ilustra o exemplo a seguir (Figura 6-16). Neste exemplo mesclamos tramas de alumínio e aço de gramaturas e geometrias diversas, ora sobrepondo-se a camadas mais distantes, ora sendo substituídos ao longo do movimento do disco por camadas mais próximas com efeitos ferromagnéticos mais ou menos proeminentes. Numeramos os diversos trechos do perfil magnético correspondente (Figura 6-16-E) e procuramos explicá-lo passo a passo à luz do que foi apreendido até aqui.

A seguir comentamos cada trecho numerado do perfil magnético visto no item (E) da Figura 6-16, extraído a partir de um giro completo da montagem exemplo sobre o sensor. Aqui podemos observar claramente a contribuição de cada material da montagem mostrada. Na leitura do texto a seguir, faça portanto a correspondência com a numeração na Figura 6-16-E:

1. O laço indutivo ainda está na área vazada mostrada na Figura 6-16-A, antes do ponto de “trigger”. O sinal encontra-se com sua frequência no patamar de repouso, pois não há material metálico nesta região.
2. O disco é girado no sentido horário e o laço indutivo entra na região indicada como “trigger”. A folha de alumínio na camada inferior faz com que circulem correntes parasitas cuja tendência é contrapor o campo no laço indutivo, diminuindo a indutância do mesmo. Isso ocasiona então um aumento da frequência no laço indutivo, que vai de 33,92 kHz para 33,97 kHz, um degrau de aproximadamente 50 Hz. A segunda metade desse novo patamar (indicado como “2” na figura) conta com uma trama de alumínio revestida com um composto resistivo ⁵⁴ na camada intermediária (veja na Figura 6-16-B), que tem o efeito de dificultar a circulação das correntes parasitas na camada inferior, pois a trama a obstrui parcialmente. O efeito é uma ligeira diminuição na frequência observada da primeira metade do patamar “2” para a segunda metade.

⁵⁴ Na trama de alumínio com revestimento, os fios de alumínio não se conectam eletricamente.

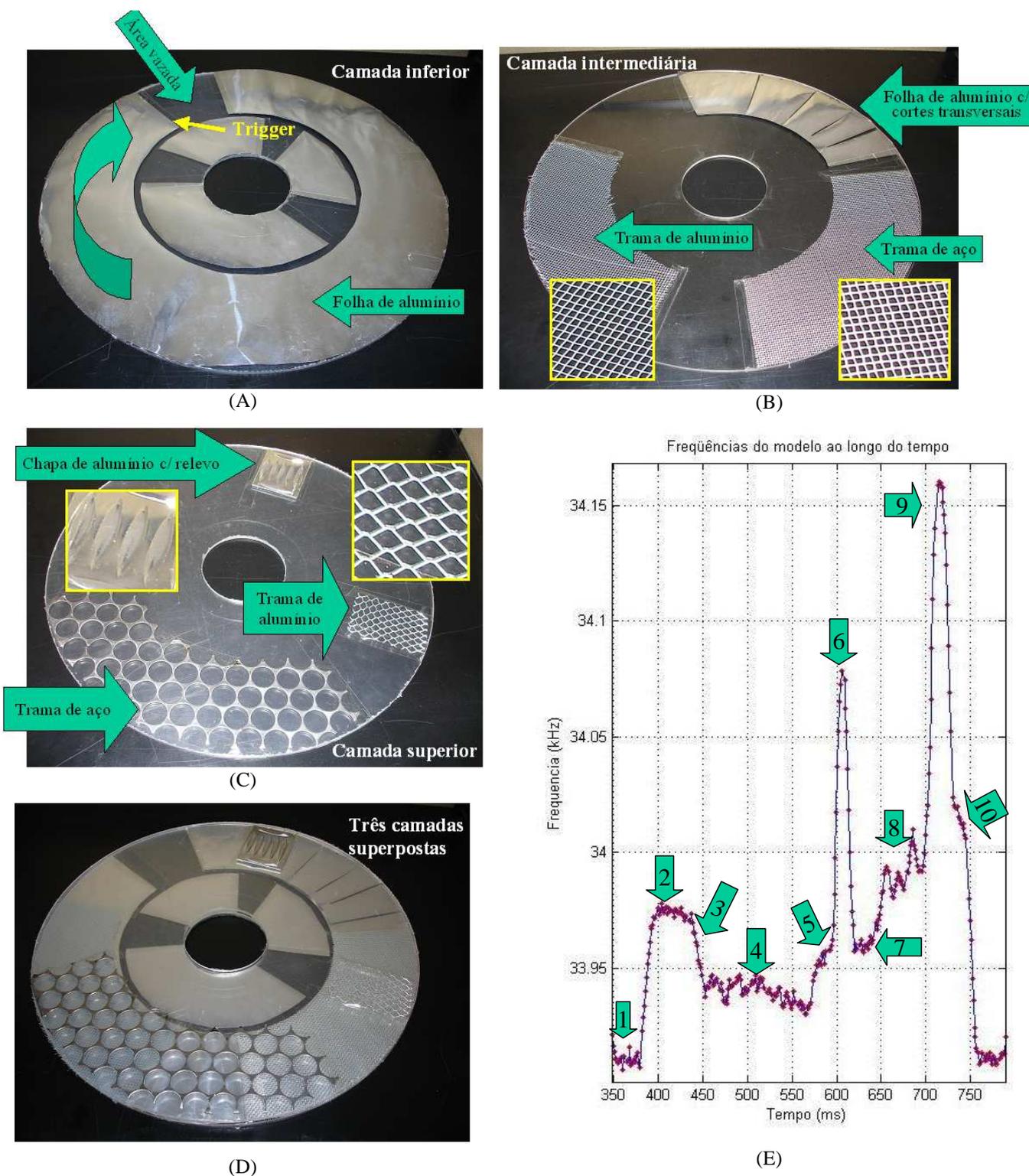


Figura 6-16: Exemplo de montagem dos discos construídos para compor estruturas com perfis magnéticos de diferentes características, variando quanto ao material, textura e distância em relação ao laço indutivo. (A) Camada inferior. (B) Camada intermediária. (C) Camada superior. (D) Conjunto com as três camadas superpostas. (E) Perfil magnético correspondente, coletado em alta resolução pelo método proposto. Consulte o texto para acompanhar o significado da numeração mostrada.

3. Neste ponto a trama de aço (vazada em formas circulares) mostrada na Figura 6-16-C entra na área do laço indutivo. Como o aço é um material ferromagnético, para a distância observada do sensor ao material (alguns milímetros) e para a geometria do material, observamos que o efeito ferromagnético suplanta o efeito causado pela circulação de correntes parasitas, aumentando então a indutância do laço, diminuindo conseqüentemente a sua frequência. Graças à existência da folha de alumínio na camada inferior, o patamar de frequência não fica abaixo daquele valor observado em “1” (frequência de repouso), ou seja, não temos $\Delta L > 0$ graças à camada inferior.
4. As oscilações observadas neste intervalo “4” devem-se às descontinuidades da trama de aço, furada em círculos. Observe ainda que na segunda metade do intervalo indicado, a camada intermediária deixa de contar com a trama de alumínio, que é trocada por uma trama de aço de aproximadamente a mesma geometria (veja a Figura 6-16-B). Esta trama de aço somente tem o efeito de aumentar ainda mais a indutância do laço pelo efeito ferromagnético, embora em menor grau que a trama da camada superior, por estar mais distante. Portanto o efeito observado é a frequência do trecho correspondente ao “4” diminuir ainda mais.
5. Neste momento acaba a trama de aço vazado (com furos circulares) na camada superior. Permanece a trama de aço na camada intermediária que impede que a frequência suba ao valor anterior igual ao patamar “2”, ditado pela camada inferior, ainda contando com a folha de alumínio contínuo. Portanto, a diferença de valores de frequência entre o trecho “5” e o trecho “2” se deve exclusivamente à presença da trama de aço usada na camada intermediária, descontada é claro a imperfeição mecânica do aparato de teste, evidenciada na Figura 6-6.
6. No pico observado neste momento, entra em cena a trama de alumínio da camada superior, mostrada na Figura 6-16-C. Ela tem uma gramatura maior do que as tramas da camada intermediária, seus fios estão conectados eletricamente e está bem mais próxima do laço indutivo. Seu efeito de circulação de correntes parasitas tão próximo do laço indutivo suplanta o efeito ferromagnético da camada intermediária, causado pela trama de aço, além de obstruí-la. O efeito da composição final é a diminuição da indutância e elevação da frequência no laço de 33,96kHz para 34,08kHz, ou seja, um degrau de 120 Hz.

7. Neste instante da curva a situação volta àquela anterior à chegada da trama de alumínio na camada superior de que trata o item “6”. A camada inferior permanece com a folha de alumínio da Figura 6-16-A que percorre todo o disco (exceto pela região vazada usada como “trigger”) e a camada intermediária com a trama de aço da Figura 6-16-B. A frequência neste ponto é, portanto, a mesma alcançada em “5”.
8. Neste trecho do disco, a trama de aço da camada intermediária é substituída pela folha de alumínio com cortes transversais (Figura 6-16-B). A folha de alumínio, por ser condutiva e não magnética, e ainda por estar mais próxima do laço (na camada intermediária), traz a frequência a níveis superiores aos observados no patamar “2” (que corresponde à folha de alumínio da camada inferior). No entanto, os três cortes transversais interrompem o caminho das correntes parasitas, o que é captado no sinal como três vales no trecho “8”.
9. Após o último corte transversal, aparece na camada superior uma chapa de alumínio (Figura 6-16-C). Por ser não magnético, mais condutivo e por estar tão mais perto do laço (a chapa tem espessura aproximada de 1,5 mm), seu efeito resultante é de propiciar uma queda abrupta da indutância do laço devido à formação de correntes parasitas, resultando em um pico de frequência de 34,16 kHz, distante 250 Hz do patamar de repouso do laço (i.e. sem material metálico próximo ao laço).
10. Após a saída da chapa de alumínio da área de alcance do sensor, permanece a folha de alumínio na camada intermediária. A diferença de frequência observada entre os trechos “10” e “2” deve-se exclusivamente à diferença de distância dos materiais ao laço, pois ambos os materiais são folhas de alumínio contínuas, sendo que em “2” ela está na camada inferior e em “10” ela está na camada intermediária. A partir daí, os materiais metálicos acabam e o disco volta à posição inicial, quando o laço novamente está sobre a área vazada. Sua frequência volta então para o valor de repouso inicial.

6.3 Conclusões – Perfis Magnéticos

Uma vez que sabemos – por conhecimento prévio – que há apenas uma componente relevante de frequência presente no sinal, a determinação da ordem do modelo de Pisarenko não é um problema neste caso. A ordem é igual a três: duas dimensões correspondentes às duas

exponenciais complexas conjugadas que formam a senóide real, mais uma dimensão para o subespaço do ruído. Isto equivale a dizer que temos uma matriz de autocorrelação \mathbf{R}_p de ordem 3, o que resulta em uma solução computacionalmente eficiente na sua decomposição e posterior fatoração da expressão polinomial do auto-filtro ⁵⁵, que resulta por sua vez em um polinômio de segundo grau. A implementação de tal algoritmo para operação em tempo real é perfeitamente factível.

Como vimos, a técnica da *Decomposição Harmônica de Pisarenko* mostrou-se adequada e robusta no rastreamento da frequência existente nos laços indutivos ao longo do tempo, trazendo da casa das dezenas de milissegundos para a casa das centenas de microssegundos a taxa de atualização das frequências correspondentes, sem que com isso houvesse uma renúncia à operação em alta sensibilidade normalmente necessária nos dispositivos comerciais disponíveis. Ou seja, constatou-se um ganho da ordem de grandeza de 100 vezes na taxa de atualização da frequência com o método proposto, enquanto o detector comercial usado permaneceu ajustado em sua sensibilidade máxima ⁵⁶. O ajuste em alta sensibilidade é geralmente proibitivo nas aplicações que requerem medição de velocidade com restrições rígidas na precisão da medida, como as exigidos por órgãos de trânsito: a taxa de atualização fica mais lenta, pois os detectores com canais multiplexados permanecem mais tempo excitando os laços e contando a quantidade de ciclos observados antes de gerarem resultados. Para medição de velocidade, os detectores são então normalmente ajustados em sua sensibilidade mínima, o que resulta em respostas mais rápidas, mas às custas de um comprometimento na detecção de veículos pequenos, como motocicletas, por exemplo, que passam despercebidos. A técnica usada neste trabalho resolve este problema, possibilitando alta sensibilidade concomitante com alta taxa de atualização.

Observe a Figura 6-17, onde o perfil corresponde ao da estrutura da Figura 6-13-A, mas com o aparato de teste movendo-se à sua velocidade máxima (622 RPM). Ela traz um exemplo de como o detector modelo Canoga usado neste trabalho, ajustado em sua sensibilidade máxima, deixa de captar nuances do perfil magnético em situações limite. Para cada período de 16 ms

⁵⁵ A matriz de autocorrelação \mathbf{R}_p é definida formalmente no Apêndice A, Seção A.2. A expressão polinomial do auto-filtro é definida na equação (A 19), onde no caso particular aqui tratado, $M=2$ e $p+1=3$.

⁵⁶ Nos casos mostrados foi utilizado o detector Canoga C822 na modalidade “Presença”, sensibilidade “6”.

de alimentação do laço, apenas uma amostra é gerada pelo detector, mas 64 amostras são geradas neste exemplo, empregando a técnica aqui proposta de captação e processamento em alta resolução. É uma taxa de atualização de 4 kHz, ou seja, bem menor que os 10 kHz mostrados na Figura 6-6, quando exploramos os limites da técnica. Um perfil com duração de 23 ms como esse poderia corresponder no mundo real, por exemplo, a um veículo de dois metros de comprimento passando a 360 km/h sobre um laço de 30 cm de comprimento longitudinal.

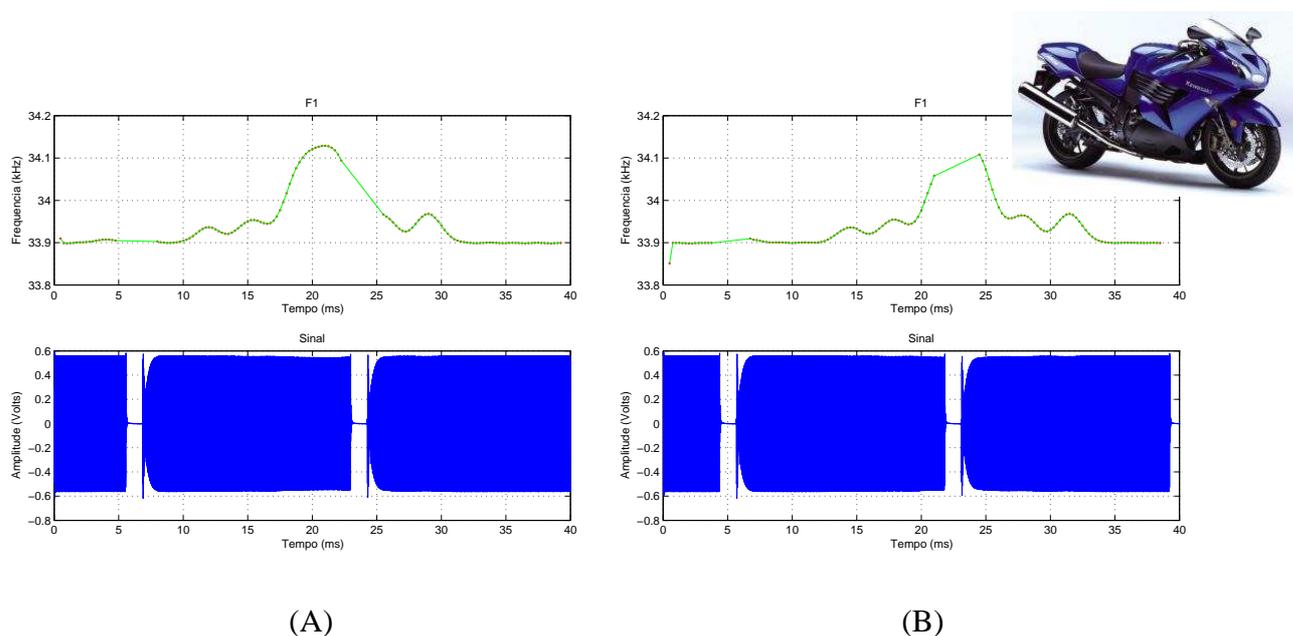


Figura 6-17: Sinal e perfil magnético correspondente, em dois momentos distintos (A e B), captados usando a montagem mostrada na Figura 6-13, onde a velocidade linear no aparato de teste é de 8m/s. A taxa de atualização do perfil em alta resolução é de $250\mu\text{s}$. A descontinuidade do perfil corresponde ao trecho em que o detector comercial interrompe a alimentação do laço. Uma correspondência possível em escala do mundo real para este perfil seria a de um bólido de 2m de comprimento passando a 360 km/h sobre um laço de comprimento longitudinal à via igual a 30 cm. No detalhe da foto vemos uma Kawasaki ZX14, capaz de alcançar velocidades acima de 320 km/h.

O ganho em resolução da análise espectral do sinal no domínio da frequência resulta em uma maior resolução também do perfil no tempo, pois ao utilizarmos quadros com menor quantidade de amostras do sinal para processamento, aumentamos também a taxa de atualização temporal. Passa a ser possível então criar instalações avançadas em campo, onde pode ser realizada a confecção de laços indutivos em configurações geométricas longitudinalmente mais curtas (i.e. no sentido do fluxo de veículos) de forma a traçar com mais detalhes o perfil magnético dos veículos, mesmo veículos pequenos e em altas velocidades, com sensibilidade suficiente para captação e classificação. Isto não é possível

utilizando a captação convencional, a não ser que limitássemos a velocidade dos veículos e nos contentássemos com uma baixa sensibilidade de resposta. E não esqueçamos também de citar a potencialidade revelada pelo aumento constatado de oito vezes alcançado na precisão da medida de velocidade ao utilizarmos a técnica de correlação cruzada do perfil captado em alta resolução.

Concluindo, os detalhes em um perfil podem “enganar” um detector simples por comparação com limiares fixos sempre que o perfil cruzar o nível de limiar ajustado, o que obriga neste caso a construção de laços indutivos de grandes dimensões. Assim, a integração espacial das contribuições eletromagnéticas pontuais resulta em um perfil “suavizado”, inadequado para a classificação. Naturalmente, quanto mais detalhes obtivermos no perfil magnético, melhor será a precisão na obtenção de medida de velocidade por correlação cruzada e melhor será o desempenho nos algoritmos de classificação de veículos. Mostramos aqui que a técnica proposta de monitoração dos laços indutivos é capaz de soltar com sucesso estas amarras.

SÍNTESE

Com os experimentos realizados antecipamos em laboratório, em condições relativamente controladas, os desafios de uma operação do equipamento em campo, quando da coleta de dados oriundos de veículos reais. Ao lado do valioso conhecimento apreendido nesta etapa para o auxílio à compreensão do comportamento dos dados a serem coletados em campo, os experimentos realizados serviram para a comprovação da eficácia das técnicas propostas, resultando em aumento na acurácia da medição de velocidade e capacidade de maior detalhamento do perfil magnético, mesmo para sistemas legados. Estas melhorias ajudam a extrair características mais representativas do sinal, contribuindo para o aumento do índice de acerto alcançável pelos algoritmos de classificação de veículos.

7 Conclusões Finais

Neste trabalho vimos que a classificação de veículos é uma tarefa complexa, pois lida com o tratamento matemático de características extremamente heterogêneas e diversas providas pelos sensores utilizados, como velocidade dos veículos, contagem de eixos, comprimento, cor, tamanho e peso do veículo, formato do perfil magnético, etc. Vimos também que o objetivo da classificação em si pode demandar a alteração na importância relativa de algumas características do classificador de acordo com a aplicação. Sistemas de reforço à lei de trânsito, por exemplo, dão mais valor à medição de velocidade instantânea, enquanto os engenheiros de tráfego privilegiam a coleta de estatísticas de ocupação da via, velocidade média e peso (ou tamanho) dos veículos que nela circulam para projeto e expansão de vias. Os concessionários de pedágio, por sua vez, podem estar interessados em classificar os veículos pelo número de eixos em aplicações de auditoria, por exemplo. Vimos a partir da revisão bibliográfica que a metodologia de fusão de sensores com otimização multi-objetivo lexicográfica hierarquizada tem a habilidade de tratar de forma natural esta heterogeneidade das características, ao mesmo tempo em que permite a hierarquização das etapas sucessivas de classificação de forma guiada, a partir dos objetivos específicos de cada aplicação.

Neste cenário de classificação de veículos, expandimos as possibilidades de extração de características dos laços indutivos ao introduzirmos a técnica de coleta em paralelo com detectores pré-existentes e posterior análise em alta resolução do perfil magnético pela *Decomposição Harmônica de Pisarenko – PHD* – e estimadores de frequência a partir do subespaço de ruído, ao supor que os sinais podem ser modelados por senóides complexas em ruído branco aditivo. Ao combinar o processamento dos sinais em alta resolução com a medição de velocidade por correlação cruzada dos perfis em armadilha de velocidade, possibilitamos a redução das dimensões dos laços indutivos – o que permite maior acuidade na observação de características individuais dos veículos – sem que com isso percamos a sensibilidade necessária à detecção de veículos menores, e ao mesmo tempo proporcionamos o aumento da acurácia da medida de velocidade em até oito vezes, mesmo para operação em paralelo com detectores convencionais legados que contam com canais multiplexados e *crosstalk*.

No decorrer do experimento envolvendo laços indutivos, tomamos contato também com a percepção dos fenômenos físicos antagônicos formadores dos perfis magnéticos, quais sejam o efeito ferromagnético e as *correntes de Foucault* ou correntes parasitas. Constatamos através dos experimentos realizados que é possível, pelo menos a princípio, compor intencionalmente materiais e geometrias para o veículo de tal forma que exacerbem, atenuem ou até mesmo anulem a percepção de sua passagem pelo laço indutivo. Acumulamos também conhecimento experimental suficiente para entender a razão pela qual formam-se as assinaturas magnéticas complexas.

Ao concluirmos este trabalho, além dos avanços relatados, contamos com:

- Um protótipo funcional para coleta de sinais em campo de veículos reais
- Um *framework* inovador em software para delegação de serviços, cuja filosofia de arquitetura estende o conceito *SOA – Service Oriented Architecture* – desde o espaço de endereçamento interno de uma máquina até um cenário de sistemas distribuídos geograficamente. Sua adoção veio facilitar a inclusão disciplinada e com qualidade de novas funcionalidades ao desenvolvimento do equipamento construído. Além disso, este *framework* é genérico o suficiente para ser aplicável ao desenvolvimento de quaisquer sistemas de tempo real, embarcados ou não, *multithread* e ou distribuídos, onde a qualidade do software, o baixo acoplamento entre as partes e a rastreabilidade de eventos sejam requisitos desejados.

Apêndice A

Estimação Freqüencial de Sinais Baseada em Autovetores e Autovalores – Prony, PHD e MUSIC/EV

A.1 Introdução

A classe de técnicas baseadas na auto-análise da matriz de autocorrelação ou da matriz de dados tem sido citada na literatura como tendo uma melhor resolução na estimação de características no domínio da freqüência do que técnicas espectrais tais como as auto-regressivas ou de Prony, especialmente em baixos valores de relação sinal ruído, onde estas últimas técnicas freqüentemente falham para estimar sinais senoidais ou componentes espectrais de faixa estreita. A chave para este desempenho é a divisão da informação contida na matriz de autocorrelação ou na matriz de dados em dois espaços vetoriais: um subespaço de sinal e um subespaço de ruído.

Funções de vetores em ambos subespaços de sinal ou ruído podem ser usadas para criar estimadores de freqüência que, quando plotados, mostram picos acentuados na região de localização das senóides ou outras componentes espectrais de banda estreita. Estes não são estimadores de Densidade Espectral de Potência (PSD - “Power Spectral Density”) porque eles não preservam a energia entre os domínios do tempo e da freqüência, ou não permitem que a seqüência de autocorrelação possa ser recuperada pela transformada inversa de Fourier dos estimadores de freqüência. Em resumo, eles não obedecem à relação de Parseval, sendo freqüentemente denominados estimadores pseudo-espectrais.

Incluídos nesta classe de estimadores baseados em autovalores estão a decomposição harmônica de Pisarenko (PHD) e os estimadores freqüenciais MUSIC - “Multiple Signal Classification” ou “Classificação Múltipla de Sinais” e EV - “Eigenvalue” ou “Autovalor”.

A.2 Auto Análise da Matriz de Autocorrelação para Senóides em Ruído Branco

Pode-se mostrar [66] que a seqüência de autocorrelação de um processo estacionário no sentido amplo formado por M senóides complexas de fase aleatória em ruído branco aditivo é dada por:

$$r_{xx}[k] = \sum_{i=1}^M P_i \cdot \exp(j2\pi f_i kT) + \rho_w \delta[k] \quad (\text{A } 1)$$

Na qual P_i é a potência da i -ésima senóide e ρ_w é a variância do ruído. Se o processo consiste de M senóides reais em ruído branco aditivo, a seqüência de autocorrelação será:

$$r_{xx}[k] = \sum_{i=1}^M P_i \cos(2\pi f_i kT) + \rho_w \delta[k] = \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{2} [\exp(j2\pi f_i kT) + \exp(-j2\pi f_i kT)] + \rho_w \delta[k] \quad (\text{A } 2)$$

A matriz Toeplitz Hermitiana de p -ésima ordem da autocorrelação, de dimensão $(p+1) \times (p+1)$ é:

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} r_{xx}[0] & \cdots & r_{xx}^*[p] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}[p] & \cdots & r_{xx}[0] \end{bmatrix} \quad (\text{A } 3)$$

Para o caso de senóides reais em ruído branco, esta matriz tem a estrutura:

$$\mathbf{R}_p = \sum_{i=1}^M P_i \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H + \rho_w \mathbf{I} \quad (\text{A } 4)$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade de ordem $(p+1) \times (p+1)$, o subscripto “ H ” refere-se à transposição hermitiana (transposição seguida de conjugação complexa) e \mathbf{s}_i é um vetor de ordem $(p+1)$ e carrega a informação de frequência do sinal:

$$\mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(2\pi f_i T) \\ \vdots \\ \exp(2\pi f_i pT) \end{bmatrix} \quad (\text{A } 5)$$

A matriz \mathbf{R}_p pode ser escrita como a soma da matriz de autocorrelação do sinal com a matriz de autocorrelação do ruído:

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{S}_p + \mathbf{W}_p \quad (\text{A } 6)$$

sendo,

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^M P_i \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_i^H \quad (\text{A } 7)$$

$$\mathbf{W}_p = \rho_w \mathbf{I} \quad (\text{A } 8)$$

onde \mathbf{S}_p e \mathbf{W}_p são matrizes de ordem $(p+1) \times (p+1)$. Se a matriz de autocorrelação tem ordem maior que o número de senóides complexas ($p > M$), então a matriz de sinal \mathbf{S}_p terá um rank igual a M e a matriz de ruído terá rank cheio, isto é, igual a $p+1$.

A matriz de sinal terá a seguinte auto-decomposição:

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^{p+1} \lambda_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^H \quad (\text{A } 9)$$

na qual os autovalores são ordenados em ordem decrescente $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{p+1}$ e os autovetores são ortonormais. Pode-se mostrar [66] que uma matriz de dimensão $p+1$ com rank $M < p+1$ terá $p-M+1$ autovalores iguais a zero. A decomposição da matriz anterior pode então ser escrita como:

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^H \quad (\text{A } 10)$$

Os autovetores $\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_M$ conhecidos como os “autovetores principais”, varrem o mesmo subespaço de sinal que os vetores $\mathbf{s}_1, \dots \mathbf{s}_M$. Isto significa que qualquer autovetor principal pode ser escrito como uma combinação linear dos vetores de sinal, ou seja:

$$\mathbf{v}_i = \sum_{k=1}^M \beta_{ik} \mathbf{s}_k \quad (\text{A } 11)$$

para $1 \leq i \leq M$. Para ser um autovetor de \mathbf{S}_p , então:

$$\mathbf{S}_p \mathbf{v}_i = \lambda_i \cdot \mathbf{v}_i \quad (\text{A } 12)$$

Substituindo a equação (A 12) na expressão (A 7), temos:

$$\sum_{k=1}^M P_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H \mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad (\text{A } 13)$$

ou

$$\mathbf{v}_i = \sum_{k=1}^M \left(\frac{P_k}{\lambda_i} \mathbf{s}_k^H \mathbf{v}_i \right) \mathbf{s}_k \quad (\text{A } 14)$$

para $1 \leq i \leq M$.

Sendo $\mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_j = 0$ se $i \neq j$ ou 1 se $i = j$ tem-se uma representação alternativa da matriz identidade em função dos autovetores ortonormais:

$$\mathbf{I} = \sum_{i=1}^{p+1} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (\text{A } 15)$$

Podemos escrever a auto decomposição da matriz de autocorrelação a partir da equação (A 6) e utilizando as equações (A 10) e (A 15):

$$\mathbf{R}_p = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H + \rho_w \sum_{i=1}^{p+1} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H = \sum_{i=1}^M (\lambda_i + \rho_w) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H + \sum_{i=M+1}^{p+1} \rho_w \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (\text{A } 16)$$

Da equação (A 16) tem-se que os autovetores $\mathbf{v}_{M+1}, \dots, \mathbf{v}_{p+1}$ varrem o subespaço de ruído de \mathbf{R}_p , tendo todos os autovalores idênticos a ρ_w . Os autovetores principais $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M$ varrem os subespaços de sinal de ambos \mathbf{R}_p e \mathbf{S}_p com os autovalores $\lambda_1 + \rho_w, \dots, \lambda_M + \rho_w$. Os autovalores dos autovetores principais são, portanto, compostos pela potência de ambos sinal e ruído. Assim sendo, o ruído branco de fato contribui na ponderação dos autovalores correspondentes aos autovetores do subespaço de sinais livres de ruído.

A decomposição da matriz de autocorrelação pode ser explorada de duas formas para gerar os estimadores espectrais melhorados, ou mais rigorosamente, os estimadores de frequência:

- *Retendo-se apenas a informação dos autovetores do subespaço de sinais* (isto é, formando-se uma aproximação da matriz \mathbf{R}_p com rank inferior), incrementa-se a relação sinal ruído SNR pela omissão da contribuição em potência das componentes do subespaço de ruído. Esta é a base dos estimadores frequenciais focados no subespaço de sinais, também conhecidos como “*estimadores frequenciais por componentes principais*”.

- Ao notarmos que os autovetores são ortogonais e que os autovetores principais varrem o mesmo subespaço dos vetores de sinal, então *os vetores de sinais são ortogonais a todos os vetores no subespaço de ruído, incluindo qualquer combinação linear*:

$$\mathbf{s}_i^H \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} \alpha_k \mathbf{v}_k \right) = 0 \quad (\text{A } 17)$$

para $1 \leq i \leq M$ (ou $2M$ no caso de M senóides reais). Esta propriedade é a base para definição dos *estimadores de frequência a partir do subespaço de ruído*. No caso especial de $p = M$ (ou $p=2M$ para o caso de M senóides reais) o subespaço de ruído terá apenas um autovetor, \mathbf{v}_{p+1} com autovalor ρ_w .

Os M vetores de sinal serão ortogonais a este autovetor.

$$\mathbf{s}_i^H \mathbf{v}_{p+1} = \sum_{k=1}^{M+1} v_{p+1}[k] \exp(-j2\pi f_i k T) = 0 \quad (\text{A } 18)$$

para $1 \leq i \leq M$. Assim as raízes da equação polinomial:

$$\sum_{k=0}^M v_{p+1}[k+1] z^{-k} \quad (\text{A } 19)$$

estarão localizadas sobre o círculo de raio unitário nos pontos definidos pelos ângulos $2\pi f_i T$ para $1 \leq i \leq M$. Este é o conceito central da decomposição harmônica de Pisarenko (PHD - “Pisarenko Harmonic Decomposition”) apresentado mais adiante.

A.3 Técnicas de Prony

O método de Prony é uma técnica para modelagem de dados amostrados como uma combinação linear de exponenciais. Embora não seja uma técnica de estimação do espectro de potência (PSD - “Power Spectral Density”, grandeza esta definida a partir da teoria de processos aleatórios), o método está estreitamente relacionado com os algoritmos de predição linear por mínimos quadrados utilizados para a estimação de parâmetros dos modelos AR (auto-regressivo) e ARMA (auto-regressivo com média móvel). O método de Prony busca encontrar um modelo exponencial *determinístico* que se encaixe aos dados, ao passo que os métodos AR e ARMA buscam um modelo aleatório a partir da estatística de segunda ordem

dos dados. Pode-se ter uma interpretação espectral do método de Prony como sendo o cálculo da densidade espectral de energia (ESD - “Energy Spectral Density”) do modelo exponencial determinístico.

Existem três passos básicos no método de Prony:

- I. Determinar os parâmetros de predição linear que modelem os dados disponíveis;
- II. As raízes de um polinômio formado a partir dos coeficientes de predição linear irão fornecer as estimativas das frequências senoidais e seus respectivos graus de amortecimento, para cada termo exponencial do modelo.
- III. Resolve-se um segundo conjunto de equações lineares que nos fornecem as estimativas de amplitude das exponenciais e a fase inicial das senóides.

A relação com os parâmetros de predição linear para o modelo AR nos leva a interpretar os passos I e II como a solução do problema objetivando encontrar os pólos do modelo AR. Sendo assim, qualquer análise espectral AR ou ARMA que envolva um estudo da localização dos pólos poderia ser encarada informalmente como um procedimento de Prony. Embora o método original de Prony buscasse a modelagem *exata* dos dados, o método moderno de Prony faz uso de análises por mínimos quadrados para modelar *aproximadamente* por exponenciais amortecidas, quando o número de dados disponíveis é maior que o necessário para se desenvolver o modelo. Uma modificação do método moderno de Prony tenta modelar os dados com senóides puras, não amortecidas. A técnica MUSIC para estimação frequencial baseia-se neste princípio de modelagem, ou seja, tenta modelar *aproximadamente* os dados por senóides não amortecidas. Neste caso, não estaremos buscando fatores de amortecimento nem a amplitude ou fase inicial das senóides, mas apenas as suas frequências.

A.4 Estimação Espectral Auto-regressiva pela Matriz de Covariância Modificada

Assuma uma seqüência de dados de N pontos $x[1], \dots, x[N]$, a partir da qual se deseja estimar os parâmetros AR de um modelo de ordem p .

O preditor linear “*posterior*” $\hat{x}_f[n]$ tem a forma usual:

$$\hat{x}_f[n] = -\sum_{k=1}^p a_p^f[k] x[n-k] \quad (\text{A } 20)$$

onde $a_p^f[k]$ são os coeficientes de predição linear posterior de ordem p . A predição é dita “posterior” (f - “forward”) no sentido que a predição da amostra atual é a soma ponderada das p amostras anteriores a ela (amostras passadas).

O erro de predição linear posterior é dado por:

$$e_p^f[n] = x[n] + \sum_{k=1}^p a_p^f[k]x[n-k] \quad (\text{A 21})$$

O erro de predição pode ser definido numa faixa de $n = 1$ até $n = N+p$, se considerarmos que os dados anteriores à primeira amostra e posteriores à última amostra são iguais a zero. O erro de predição posterior pode ser escrito em forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} e_p^f[1] \\ \vdots \\ e_p^f[p+1] \\ \vdots \\ e_p^f[N-p] \\ \vdots \\ e_p^f[N] \\ \vdots \\ e_p^f[N+p] \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} x[1] & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[p+1] & \ddots & x[1] \\ \vdots & & \vdots \\ x[N-p] & \ddots & x[p+1] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x[N] & & x[N-p] \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & x[N] \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}_p} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p^f[1] \\ \vdots \\ a_p^f[p] \end{bmatrix} \quad (\text{A 22})$$

onde \mathbf{X}_p é uma matriz de dados Toeplitz retangular $(N+p) \times (p+1)$. Os cantos superior direito e inferior esquerdo da matriz de dados são zeros, enfatizando de forma clara o “janelamento” da seqüência de dados. A matriz \mathbf{X}_p pode ser particionada em três componentes.

$$\mathbf{X}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_p \\ \mathbf{T}_p \\ \mathbf{U}_p \end{bmatrix} \quad (\text{A 23})$$

onde a matriz triangular inferior \mathbf{L}_p de ordem $p \times (p+1)$, a matriz retangular \mathbf{T}_p de ordem $(N-p) \times (p+1)$ e a matriz \mathbf{U}_p triangular superior de ordem $p \times (p+1)$ são definidas como:

$$\mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} x[1] & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x[p] & \cdots & x[1] & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A } 24)$$

$$\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} x[p+1] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-p] & & x[p+1] \\ & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N] & \cdots & x[N-p] \end{bmatrix} \quad (\text{A } 25)$$

$$\mathbf{U}_p = \begin{bmatrix} 0 & x[N] & \cdots & x[N-p+1] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x[N] \end{bmatrix} \quad (\text{A } 26)$$

A magnitude do erro quadrático de predição linear posterior a minimizar é:

$$\rho_p^f = \sum_n |e_p^f[n]|^2 \quad (\text{A } 27)$$

Dividindo-se ρ_p^f por N temos a variância da amostra. Os limites de somatório não foram especificados propositalmente, pois existem várias maneiras possíveis de se processar os dados. Três casos têm sido usados para análise espectral:

- I. *Janelado*: somatório na faixa de $e_p^f[1]$ a $e_p^f[N+p]$, pois envolve o pré e pós janelamento dos dados, ou seja, igualando os dados não disponíveis a zero;
- II. *Pré-janelado*: somatório na faixa de $e_p^f[1]$ a $e_p^f[N]$, pois os dados antes de $x[1]$ são igualados a zero;
- III. *Não janelado*: somatório de $e_p^f[p+1]$ a $e_p^f[N]$, pois apenas dados disponíveis são utilizados.

O método janelado é denominado método da *autocorrelação* e o método não janelado é conhecido como método da *covariância* para predição linear. Esta terminologia é baseada em uso histórico do processamento da fala, e não tem nada a ver com as definições formais de

autocorrelação e covariância dadas na teoria estatística (i.e. a covariância equivale à autocorrelação com a média removida).

A relação entre os erros de predição linear posterior e os coeficientes de predição linear para o *método da autocorrelação* (ou janelado) pode ser então expressa de forma sucinta como:

$$\mathbf{e}_p^f = \mathbf{X}_p \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^f \end{bmatrix} \quad (\text{A } 28)$$

A grandeza a minimizar dada na equação (A 27), na forma matricial equivale a:

$$\rho_p^f = (\mathbf{e}_p^f)^H \mathbf{e}_p^f \quad (\text{A } 29)$$

As equações normais que minimizam o erro quadrático da equação (A 27) ou, de forma equivalente, da equação (A 29) são dadas por:

$$\mathbf{X}_p^H \mathbf{X}_p \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_p^f \\ \mathbf{0}_p \end{bmatrix} \quad (\text{A } 30)$$

O produto $\mathbf{X}_p^H \mathbf{X}_p$ forma uma matriz quadrada $(p+1) \times (p+1)$ Toeplitz Hermitiana \mathbf{R}_p , para a qual existem algoritmos eficientes para a solução numérica, i.e. algoritmo de Levinson:

$$\mathbf{R}_p \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_p^f \\ \mathbf{0}_p \end{bmatrix} \quad (\text{A } 31)$$

O janelamento implícito no método da autocorrelação citado acima, contudo, é responsável por uma aparente redução na resolução se comparado a outros estimadores baseados em predição linear. Portanto, este enfoque é raramente utilizado na prática para segmentos de dados muito pequenos, pois outras técnicas de mínimos quadrados alcançam resultados melhores.

Analogamente, a relação entre os erros de predição linear posterior e os coeficientes de predição linear para o *método da covariância* (ou não janelado) pode ser expresso de forma sucinta como:

$$\mathbf{e}_p^f = \mathbf{T}_p \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^f \end{bmatrix} \quad (\text{A } 32)$$

Também de forma análoga, o conjunto de equações que minimizam o erro quadrático levam a uma matriz formada por um produto da forma $\mathbf{R}_p = \mathbf{T}_p^H \mathbf{T}_p$, que embora não seja Toeplitz Hermitiana, cada um de seus fatores é Toeplitz separadamente. Desta forma, existem algoritmos similares ao algoritmo de Levinson que exploram tais simetrias para tornar seu cálculo numérico eficiente. Uma condição necessária, mas não suficiente para que a matriz \mathbf{R}_p seja não singular é que $p \leq N/2$. A ordem do modelo não pode então ser maior que a metade do comprimento da seqüência de dados.

Analogamente ao erro de predição linear posterior, podemos definir o erro de predição linear “anterior” como sendo:

$$e_p^b[n] = x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^b[k] x[n-p+k] \quad (\text{A } 33)$$

O termo *anterior* (*b* - “backward”) significa que o filtro correspondente estima a amostra atual com base na ponderação pelos coeficientes a_p^b das *p* amostras seguintes a ela (amostras futuras). É como se estivéssemos seguindo a linha do tempo no sentido inverso. Como a estatística do sinal é supostamente a mesma nos dois sentidos, para uma seqüência finita de dados teremos o dobro de pontos de erro no qual basearmos o nosso modelo. Isto é especialmente relevante se estivermos interessados em processar seqüências de dados de comprimento pequeno.

Ao minimizarmos em um mesmo estimador pelo método da covariância os erros de predição anterior e posterior simultaneamente, temos o que se denomina o *método da covariância modificado*. A equação do erro de predição combinado \mathbf{e}_p na forma matricial para este caso pode ser expressa de forma sucinta como:

$$\mathbf{e}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_p^f \\ \mathbf{e}_p^{b*} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{T}_p \\ \mathbf{T}_p^* \mathbf{J} \end{bmatrix}}_{mcm} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^{fb} \end{bmatrix} \quad (\text{A } 34)$$

onde o termo “*mcm*” quer dizer “Matriz de Covariância Modificada”, o asterisco (*) significa conjugação complexa e a matriz \mathbf{J} é a matriz reflexão, que quando pós multiplica uma matriz, inverte a ordem das colunas desta matriz em torno de seu eixo vertical:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A } 35)$$

A partir da definição da matriz \mathbf{T}_p na equação (A 25), o produto matricial $\mathbf{T}_p^* \mathbf{J}$ fica:

$$\mathbf{T}_p^* \mathbf{J} = \begin{bmatrix} x^*[1] & \cdots & x^*[p+1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*[p+1] & \cdots & x^*[N-p] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*[N-p] & \cdots & x^*[N] \end{bmatrix} \quad (\text{A } 36)$$

que forma uma matriz Hankel de elementos que são os dados conjugados. O resultado obtido em (A 36) é uma das partes que, juntamente com a matriz \mathbf{T}_p , forma a matriz de covariância modificada mostrada na equação (A 34), usualmente adotada pelo método de Prony. Pelas diversas razões expostas até aqui, a matriz de covariância modificada é adotada neste trabalho para implementar os estimadores MUSIC/EV.

A.5 Auto Análise da Matriz de Dados para Senóides em Ruído Branco

A seqüência de autocorrelação dificilmente é conhecida e as propriedades descritas anteriormente para a matriz de autocorrelação definida na equação (A 3) são predominantemente mais teóricas do que práticas. Os conceitos desenvolvidos até aqui para a seqüência de autocorrelação podem, no entanto, ser estendidos para a matriz de dados de covariância e para a matriz de dados de covariância modificada, que são parte da técnica de estimação exponencial de Prony.

Pode-se mostrar [66] que a matriz de dados tem propriedades de decomposição em autovalores e autovetores similares às da matriz de autocorrelação. Os autovetores principais da matriz de dados varrem predominantemente o subespaço de sinal, e os valores singulares desses autovetores principais tendem a ser maiores que os valores singulares do subespaço de ruído. Assim valores singulares determinados pela decomposição em valores singulares da matriz de dados são a base para a separação dos autovetores em um subespaço com predominância de sinal e um subespaço com predominância de ruído.

Como vimos, o método de Prony, originalmente proposto para senóides amortecidas, tem como ponto central a solução de um conjunto de equações lineares envolvendo o produto matricial $\mathbf{T}_p^H \mathbf{T}_p$ semelhante à matriz de autocorrelação, no qual \mathbf{T}_p , definida na equação (A 25), é a matriz de dados de ordem p do método da covariância para predição linear posterior. O método de Prony modificado, uma variação do método de Prony, envolve a matriz de covariância modificada, dada na equação (A 34):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{T}_p \\ \mathbf{T}_p^* \mathbf{J} \end{bmatrix}}_{mcm} \quad (\text{A } 37)$$

Pode ser demonstrado [66] que qualquer autovetor principal tanto de $\mathbf{T}_p^H \mathbf{T}_p$ como de $\mathbf{T}_p \mathbf{T}_p^H$ pode ser expresso como uma combinação linear dos vetores de sinal. A matriz \mathbf{T}_p tem M valores singulares diferentes de zero, que são simplesmente as raízes quadradas dos autovalores. Os autovetores dos autovalores iguais a zero da matriz $\mathbf{T}_p^H \mathbf{T}_p$ ou $\mathbf{T}_p \mathbf{T}_p^H$ são ortogonais aos M autovetores do subespaço de sinal ou autovetores principais associados aos autovalores diferentes de zero no subespaço de sinal. Se os dados contêm ruído, estas propriedades não são totalmente verdadeiras, mas são uma boa aproximação. Assim os M valores singulares principais de uma matriz \mathbf{T}_p composta de amostras contaminadas por ruído tendem a ser maiores que os $p-M$ valores singulares de menor valor (que são exatamente zero no caso não contaminado por ruído). Os resultados expostos aqui para a matriz de covariância \mathbf{T}_p podem ser estendidos para a matriz de covariância modificada em (A 37).

A.6 Estimadores de Frequência Baseados no Subespaço de Ruído

Na Seção A.2 vimos que todos os estimadores na classe do subespaço de ruído levam em conta a propriedade de que os autovetores do subespaço de ruído de uma matriz de autocorrelação ou de uma matriz de dados são ortogonais aos autovetores de sinal, ou qualquer combinação linear destes. As matrizes de dados usualmente de interesse são aquelas associadas aos métodos da covariância, equação (A 32) e da covariância modificada, equação (A 34) para predição linear.

A.6.1 Decomposição Harmônica de Pisarenko

O método da *Decomposição Harmônica de Pisarenko* (PHD - “*Pisarenko Harmonic Decomposition*”) assume que um dado processo consiste de M senóides complexas em ruído branco complexo aditivo e deriva as frequências senoidais, potências senoidais, e a variância do ruído branco a partir da seqüência de autocorrelação “conhecida” $r_{xx}[0]$ a $r_{xx}[M]$. Se o processo consiste de M senóides reais adicionadas a ruído branco, então a seqüência de autocorrelação deve ser conhecida para o intervalo de 0 a $2M$.

A matriz de autocorrelação \mathbf{R}_{M+1} formada pela seqüência de autocorrelação tem, no caso complexo, um único autovetor no subespaço de ruído com autovalor igual a ρ_w , correspondendo à variância do ruído branco. Este é também o autovalor mínimo da matriz de autocorrelação \mathbf{R}_{M+1} , o que pode ser expresso por:

$$\mathbf{R}_{M+1} \mathbf{v}_{M+1} = \rho_w \mathbf{v}_{M+1} \quad (\text{A } 38)$$

Uma vez determinado o autovetor associado ao menor autovalor, as frequências podem ser determinadas através da fatoração da expressão polinomial do auto-filtro definida em (A 19):

$$\sum_{k=0}^M v_{p+1}[k+1]z^{-k} \quad (\text{A } 19)$$

Determinadas as frequências, a potência das senóides pode ser determinada da seqüência de autocorrelação $r_{xx}[M]$, ..., $r_{xx}[0]$ pela equação (A 1):

$$r_{xx}[k] = \sum_{i=1}^M P_i \cdot \exp(j2\pi f_i kT) + \rho_w \delta[k] \quad (\text{A } 1)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \exp(j2\pi f_1 T) & \exp(j2\pi f_2 T) & \cdots & \exp(j2\pi f_M T) \\ \exp(j2\pi f_1 2T) & \exp(j2\pi f_2 2T) & \cdots & \exp(j2\pi f_M 2T) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \exp(j2\pi f_1 MT) & \exp(j2\pi f_2 MT) & \cdots & \exp(j2\pi f_M MT) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx}[1] \\ r_{xx}[2] \\ \vdots \\ r_{xx}[M] \end{bmatrix} \quad (\text{A } 39)$$

que pode ser resolvida para o vetor desconhecido de potências P_1, \dots, P_M das senóides. Na prática deve-se estimar a seqüência de autocorrelação a partir dos dados amostrados. De preferência, deve-se utilizar a estimativa polarizada da autocorrelação para assegurar uma matriz positiva definida.

Quando não se tem conhecimento do processo que gerou os dados a serem analisados, a determinação da ordem M (número de senóides) a ser adotada no modelo PHD é difícil. Uma vez que os autovalores associados à variância do ruído se repetem quando a ordem é maior que o número de senóides. A verificação de autovalores repetidos em uma matriz de autocorrelação de ordem alta pode ser um critério de seleção da ordem M . Na prática, entretanto, o uso de seqüências de autocorrelação não gera autovalores repetidos. O exame da magnitude relativa dos autovalores (valores singulares) da decomposição em valores singulares da matriz de autocorrelação (matriz de dados) é a chave para a separação dos autovetores em dois subespaços.

Uma forma de definir a separação dos subespaços de sinal e ruído é uma modificação do *Critério de Informação de Akaike* (AIC – utilizado para estimar a ordem do filtro de predição linear [66]). Assumindo que $\lambda_0 > \lambda_1 > \dots > \lambda_p$ são autovalores da matriz de autocorrelação $\hat{\mathbf{R}}_p$ estimada, e assumindo que $m < p$, onde m é o número suposto de senóides presentes na seqüência de dados de comprimento N , então:

$$AIC[m] = (p - m) \ln \left(\frac{1}{p - m} \sum_{i=m+1}^p \lambda_i \right) + m(2p - m) \quad (\text{A } 40)$$

$$\left(\frac{1}{\prod_{i=m+1}^p \lambda_i^{-(p-m)}} \right)$$

O número de senóides no subespaço de sinais é determinado pela seleção do valor mínimo de $AIC[m]$.

Neste trabalho, a ordem do modelo é definida em função do número de senóides que supomos estar formando o sinal. Se quisermos considerar, por exemplo, uma fundamental e um único harmônico, a ordem do modelo será fixada em cinco, pois esperamos determinar duas freqüências (cada senóide real corresponde a duas senóides complexas, o que implica em crescer a ordem de dois), adicionando uma dimensão à ordem do modelo para comportar o autovetor único do subespaço de ruído.

A.6.2 Funções Estimadoras de Freqüência

MUSIC e *EV* são estimadores freqüenciais baseados no subespaço de ruído, utilizados como um meio de plotar pseudo-espectros com picos acentuados nas freqüências de localização das senóides. Os $p-M$ autovetores $\mathbf{v}_{M+1}, \dots, \mathbf{v}_p$ do subespaço de ruído de uma matriz de

autocorrelação, matriz de dados de covariância, ou ainda matriz de dados de covariância modificada com um total de p autovetores, sendo M autovetores principais, serão teoricamente ortogonais aos autovetores dos sinais senoidais, de forma tal que combinações lineares com ponderações arbitrárias α_k , tais como:

$$\sum_{k=M+1}^p \alpha_k \left| \mathbf{x}^H(f) \mathbf{v}_k \right|^2 = \mathbf{x}^H(f) \left(\sum_{k=M+1}^p \alpha_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) \mathbf{x}(f) \quad (\text{A } 41)$$

onde $\mathbf{x}(f)$ é um vetor senoidal complexo,

$$\mathbf{x}(f) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi fT) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi fMT) \end{bmatrix} \quad (\text{A } 42)$$

serão zero sempre que $\mathbf{x}(f_i) = \mathbf{s}_i$, um dos vetores de sinal senoidal. Isto significa que a função de estimação freqüencial

$$\frac{1}{\sum_{k=M+1}^p \alpha_k \left| \mathbf{x}^H(f) \mathbf{v}_k \right|^2} \quad (\text{A } 43)$$

terá teoricamente um valor infinito quando avaliada em $f=f_i$, uma das freqüências senoidais. Na prática, erros de estimação irão determinar valores finitos, mas com picos acentuados nas freqüências das senóides. Estimadores de freqüências como em (A 43), como já dissemos, não são realmente estimadores de densidade espectral de potência (*PSD – Power Spectral Density*), mas são estimadores pseudo-espectrais utilizados para extração de senóides ou componentes espectrais de banda estreita com uma resolução melhor que a obtida pelas técnicas de estimação espectral auto-regressiva.

Selecionando $\alpha_k=1$ para todos valores de k , temos o estimador de freqüência pelo algoritmo MUSIC - “Multiple Signal Classification” ou “Classificação Múltipla de Sinais”:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{\mathbf{x}^H(f) \left(\sum_{k=M+1}^p \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) \mathbf{x}(f)} \quad (\text{A } 44)$$

O estimador MUSIC é então baseado estritamente no subespaço de autovetores de ruído, com ponderação uniforme.

Escolhendo $\alpha_k = 1/\lambda_k$ temos o algoritmo EV - “Eigenvalue” ou “Autovalor”:

$$P_{EV}(f) = \frac{1}{\mathbf{x}^H(f) \left(\sum_{k=M+1}^p \frac{1}{\lambda_k} \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) \mathbf{x}(f)} \quad (\text{A } 45)$$

onde cada um dos autovetores do subespaço de ruído é ponderado pelo inverso de seu autovalor associado.

Relata-se na literatura [44] que o desempenho do método EV em condições de relação sinal ruído baixa é melhor que o MUSIC, pois produz menos picos espúrios para uma dada escolha de p devido à ponderação pelos inversos dos autovalores. Ainda segundo a literatura, o método EV também tende a moldar o espectro de ruído melhor que o MUSIC. Por último, o desempenho do estimador de frequência será consequência do modo de seleção dos subespaços de sinal e de ruído. Entretanto, o desempenho de um estimador frequencial será de fato definido em função de quão bem a seleção das dimensões dos subespaços de sinal e de ruído for feita.

A.6.3 Relação do modelo AR com a Decomposição Harmônica de Pisarenko

Dada a matriz de autocorrelação Toeplitz Hermitiana \mathbf{R}_p de um processo auto-regressivo, equação (A 3), ela pode ser decomposta por uma transformação ortogonal da forma:

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H \quad (\text{A } 46)$$

onde \mathbf{V} é uma matriz ortogonal de dimensão $(p+1) \times (p+1)$ composto pelos autovetores:

$$\mathbf{v}_i = [v_{1i} \ v_{2i} \ \dots \ v_{(p+1),i}]^T$$

e $\mathbf{\Lambda}$ é uma matriz diagonal dos autovalores λ_i correspondentes. Se os autovalores forem distintos, os autovetores são reais e positivos e formam um conjunto ortonormal, já que $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}$. Se o autovalor mínimo de \mathbf{R}_p for distinto, pode-se mostrar [66] que o polinômio formado a partir do autovetor correspondente tem suas raízes exatamente sobre o círculo de raio unitário. O mesmo pode ser dito a respeito do autovalor máximo.

A partir da equação (A 31), obtemos uma expressão para o filtro do erro de predição \mathbf{a}_p em termos dos autovalores e dos autovetores de \mathbf{R}_p :

$$\mathbf{R}_p \mathbf{a}_p = \begin{bmatrix} \rho_p \\ \mathbf{0}_p \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{a}_p = \mathbf{R}_p^{-1} \begin{bmatrix} \rho_p \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{V}^H \begin{bmatrix} \rho_p \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \text{onde } \mathbf{a}_p = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^{fb} \end{bmatrix} \quad (\text{A 47})$$

ou:

$$\mathbf{a}_p = \rho_p \left[\frac{v_{11}}{\lambda_1} \mathbf{v}_1 + \frac{v_{12}}{\lambda_2} \mathbf{v}_2 + \dots + \frac{v_{1,p+1}}{\lambda_{p+1}} \mathbf{v}_p \right] \quad (\text{A 48})$$

Observamos que o filtro de erro de predição \mathbf{a}_p é composto por todos os autovetores da matriz \mathbf{R}_p ponderados pelo inverso dos autovalores correspondentes [62]. Logo o autovetor correspondente ao autovalor mínimo domina a estimativa de \mathbf{a}_p . Já sabemos que as raízes do polinômio formado por este autovetor estão exatamente sobre o círculo de raio unitário. O efeito de se somar os demais autovetores faz com que os pólos do filtro AR resultante sofram um deslocamento para o interior do círculo de raio unitário.

No modelo de Pisarenko para estimação do espectro de potência, supõe-se a existência de M senóides complexas de fases aleatórias em ruído branco complexo aditivo, cuja seqüência de autocorrelação dada na equação (A 1) assume a forma matricial dada pela equação (A 38):

$$\mathbf{R}_{M+1} \mathbf{v}_{M+1} = \rho_w \mathbf{v}_{M+1} \quad (\text{A 38})$$

Esta é uma relação autovalor / autovetor. Observemos o seguinte: já sabemos que a matriz \mathbf{R}_p formada a partir da seqüência de autocorrelação em (1) terá, no caso complexo, um único autovetor pertencente ao subespaço do ruído com autovalor proporcional a ρ_w , correspondente à variância do ruído. Esse é exatamente o mínimo autovalor de \mathbf{R}_p . Ao determinarmos o autovetor correspondente ao mínimo autovalor estaremos na verdade recuperando as frequências das harmônicas embutidas na seqüência de autocorrelação. Basta que achemos as raízes do polinômio formado a partir deste autovetor, que estarão garantidamente sobre o círculo unitário (equação (A 19)).

Ora, a estimativa do espectro pelo método AR é composto de todos os autovetores da matriz \mathbf{R}_p somados e ponderados pelo inverso dos autovalores. O autovetor correspondente ao mínimo autovalor é a solução correspondente ao modelo de Pisarenko (ou PHD). Como a proximidade dos zeros de \mathbf{a}_p do círculo unitário determina a resolução espectral do estimador, concluímos que o estimador $\text{AR}(\mathbf{a}_p)$ será sempre uma forma suavizada do estimador

$\text{PHD}(\mathbf{v}_{M+1})$. Cabe ressaltar ainda que a resolução da estimação espectral depende, na prática, bem mais da relação sinal ruído (SNR – Signal-to-Noise Ratio). No caso de um estimador AR para uma ordem fixa, um decréscimo da SNR faz com que as raízes do polinômio $A(z)$ se afastem do círculo unitário. O aumento de ruído fará com que os autovalores de \mathbf{R}_p sejam acrescidos de um valor proporcional à variância desse ruído, que poderá acarretar uma diminuição da distância relativa entre o autovalor mínimo e os demais autovalores. Com isso, o peso dado ao autovetor predominante (escolhido como a solução para o modelo de Pisarenko) será relativamente menor.

Apêndice B

Interface Homem-Máquina do Software

B.1 Interface de Acesso Local ao Software Servidor

O *Software Servidor do MVFV* foi construído de forma tal que é iniciado automaticamente pelo sistema operacional, executando no computador do *Processador* como processo “*daemon*”, isto é, rodando em “*background*”, podendo ser identificado por um ícone na área de notificação da barra de tarefas, como mostra a Figura B-1. Ele permanece gerenciando de modo autônomo as atividades do *hardware* relacionadas à aferição, monitoramento, medições, registros e armazenagem dos dados, bem como a disponibilização destes dados para coleta local ou remota, podendo-se optar neste último caso pela coleta direta (leitura dos registros no diretório) ou pelo uso de versões específicas do *Software Cliente do MVFV* rodando em plataformas concebidas para cada necessidade ⁵⁷.



Figura B-1: Ícone do processo Servidor do MVFV na área de notificação da barra de tarefas.

O acesso ao Servidor é restrito a usuários previamente cadastrados mediante senha. No caso de configuração e operação local do MVFV, o *Software Cliente* não é necessário, bastando utilizar a própria “*Interface Homem-Máquina de Acesso Local*” ao *Software Servidor* para realizar a aferição, configuração e coleta de registros. Esta interface, descrita a seguir, pode ser acessada clicando-se com o mouse sobre o ícone correspondente na área de notificação da barra de tarefas.

⁵⁷ Exemplos de plataformas específicas de cliente seriam um computador remoto rodando uma interface detalhada em uma sala do órgão de trânsito, ou mesmo uma interface simplificada em uma leitora portátil manual sem fio.

A “Interface Homem-Máquina de Acesso Local” é um software no padrão gráfico do *Windows* que, havendo disponibilidade de instalação de um monitor, teclado e mouse no computador do *Processador*, permite a interação local com o *Software Servidor do MVFV* para realização de operações como configuração, aferição, testes e transferência supervisionada de registros de veículos.

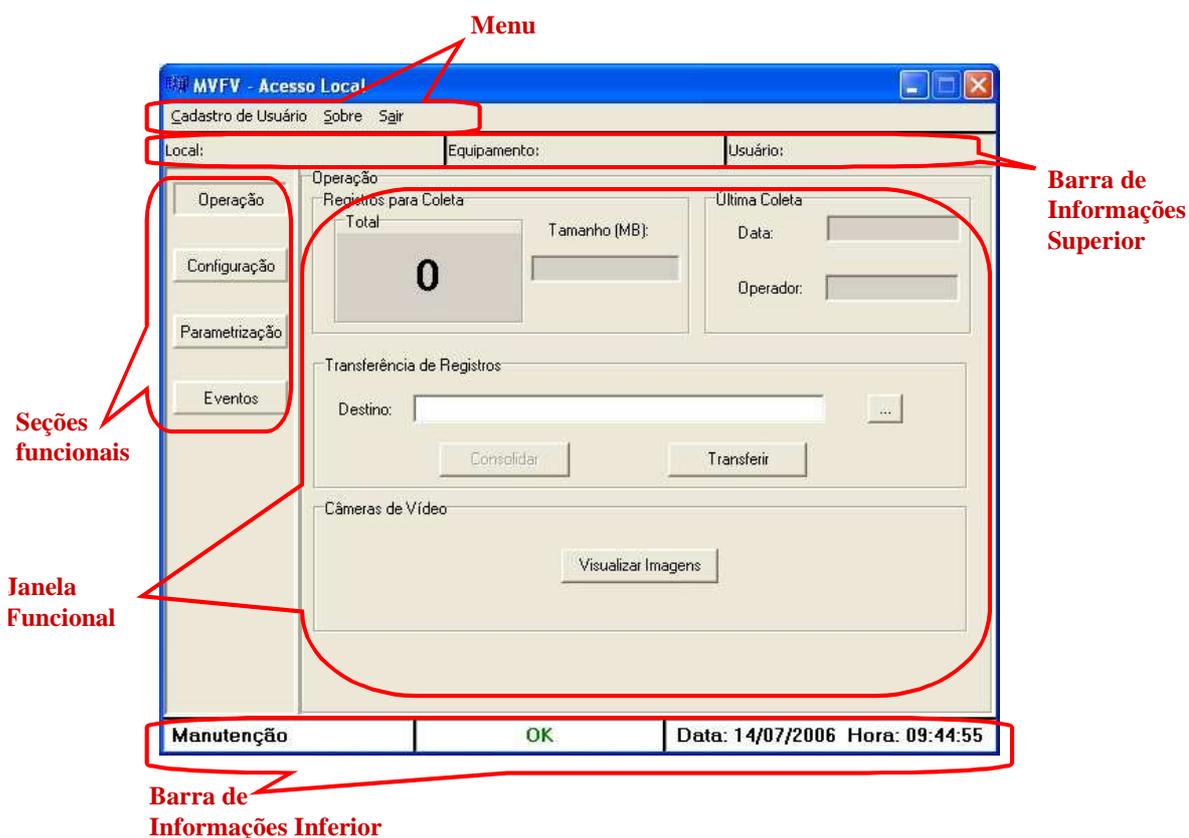


Figura B-2: Campos funcionais da tela principal da IHM de acesso local. A seção funcional “Operação” mostrada informa a quantidade de registros de veículos armazenada, bem como informações de data da última coleta, diretório de destino dos registros e um botão para visualizar imagem das câmeras.

Quando o *Software Servidor* libera o acesso, é mostrada a tela da Figura B-2. Nela estão mostrados os campos: menu principal, barras de informação – superior e inferior, botões de seleção das seções funcionais e a respectiva janela funcional selecionada. Note a partir desta figura que a janela funcional selecionada por *default* após o *login* é a janela “Operação”, e o modo de operação – à esquerda na barra de informações inferior – é o modo “Manutenção”. Segue uma descrição sucinta das funcionalidades da interface. Uma descrição mais completa pode ser encontrada em [65].

A seção funcional “Operação” permite a transferência supervisionada de registros para uma mídia removível, bem como a chamada de um visualizador para conferência no ajuste de câmeras de vídeo, como enquadramento, zoom, foco, etc.

A barra de informações inferior é dividida em três campos a saber: *Modo de operação*, *Eventos* e *Data & Hora*, cuja descrição correspondente está na Tabela B-1:

Tabela B-1– Barra de Informações Inferior

Campo	Descrição
<i>1 – Modo de Operação</i>	Informa o modo de operação corrente do MVFV. “Um duplo clique” do mouse sobre este campo abre uma janela que permite a alteração do modo de operação do equipamento (Figura B-3). Os modos de operação possíveis são abordados na Tabela B-2.
<i>2 – Eventos</i>	Informa existência de eventos de alerta – históricos ou atuais – nas operações do equipamento que merecem uma consulta do operador para ciência do(s) evento(s) e providências. Um duplo clique sobre este campo leva à tela de <i>log</i> “Eventos”, atrás da janela de Parametrização), para análise detalhada. A tela de Eventos é uma das telas funcionais, acessível também através do botão “Eventos” na área de seleção de Seções Funcionais (à esquerda na Figura B-2). O reconhecimento pelo operador dos eventos e as ações corretivas eventualmente necessárias, quando implementadas, resultam no retorno à operação normal do MVFV, refletindo na indicação “OK” neste campo, como ilustrado na Figura B-3.
<i>3 – Data e Hora</i>	Mostra a data e a hora atual do MVFV. Um duplo clique neste campo abre a janela mostrada na Figura B-3, permitindo o ajuste de ambas.

Tabela B-2: Modos de Operação do Software Servidor do MVFV

Campo	Descrição
<i>Aquisição</i>	Modo de operação autônoma do equipamento. Quando o equipamento está registrando infrações ele está neste modo. A escolha deste modo de operação a partir da janela mostrada na Figura B-3 é equivalente à ação comandada a partir do item de menu “Sair” no menu principal, pois o resultado é também o encerramento da IHM de acesso local, com a entrada em operação autônoma do Servidor do MVFV.
<i>Manutenção</i>	Quando o Servidor do MVFV autoriza o <i>login</i> do operador via IHM, a janela <i>default</i> da interface – mostrada na Figura B-2 é aberta e o Servidor do MVFV entra neste modo “Manutenção”, cessando o registro de infrações e habilitando a coleta de registros, entre outras operações e ajustes permitidos a partir da interface de acesso local.
<i>Aferição</i>	Este modo de operação é usado quando o equipamento é aferido. Os registros gerados quando neste modo são marcados como registros de aferição, não sendo portanto armazenados como registros de infração.
<i>Teste</i>	Este modo de operação é usado quando o equipamento é testado em campo. Os registros gerados quando neste modo são marcados como registros de teste, não sendo armazenados como registros de infração nem de aferição.

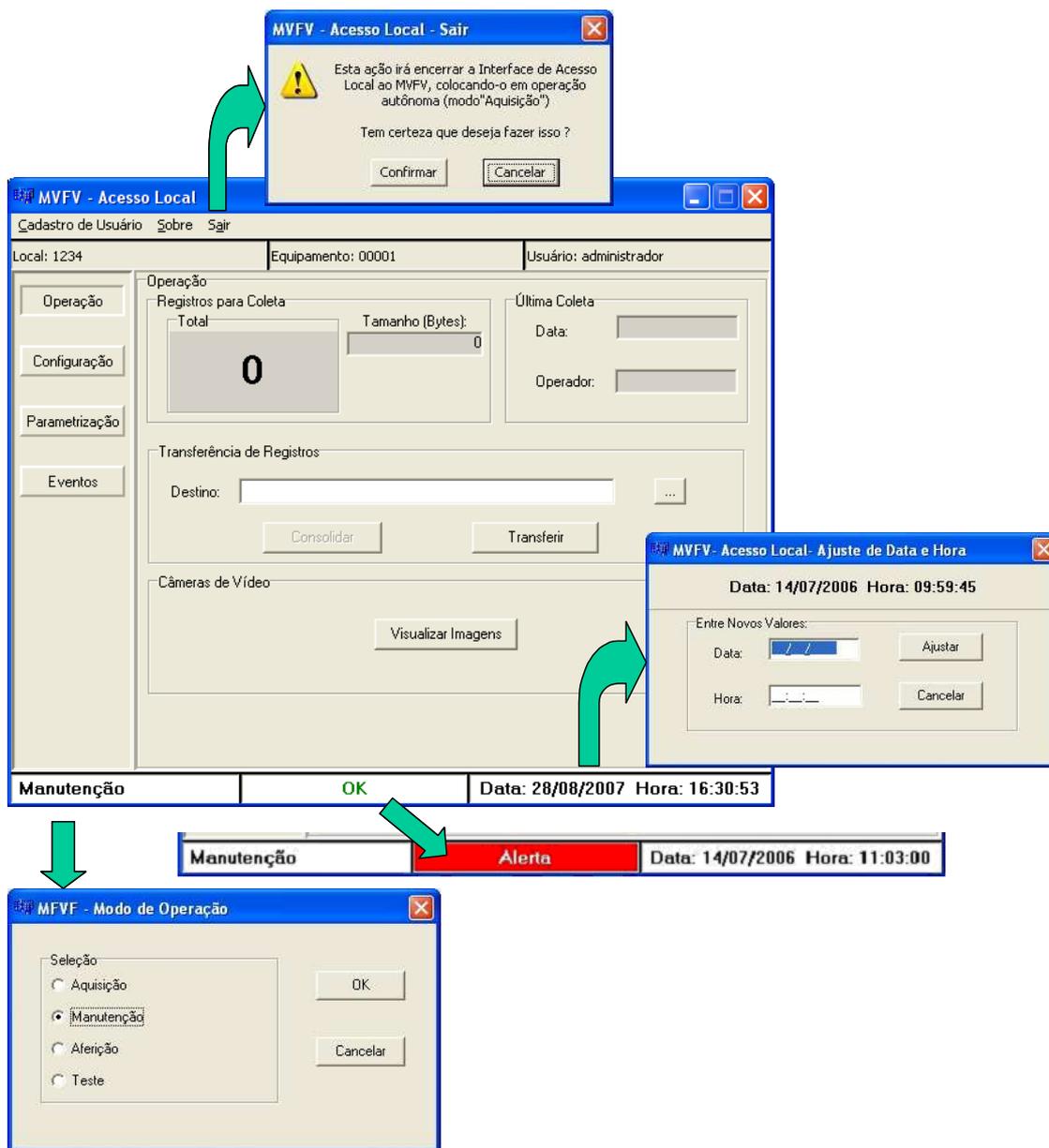


Figura B-3: Menu principal: a ação “Sair” coloca o equipamento em estado de Aquisição (operação autônoma). Barra de informações inferior: com um click de mouse no campo apropriado, é possível mudar o modo de operação, visualizar os eventos de alerta ou atualizar data e hora.

Em alternativa à transferência supervisionada de registros, existe também a possibilidade de transferência não supervisionada, que consiste na descarga automática de registros em mídia removível previamente cadastrada assim que a mídia é inserida no dispositivo periférico ou porta de comunicação. Esta modalidade de transferência pode ser ativada na guia “Registros” da seção funcional “Configuração” (Figura B-4) para as mídias previamente cadastradas

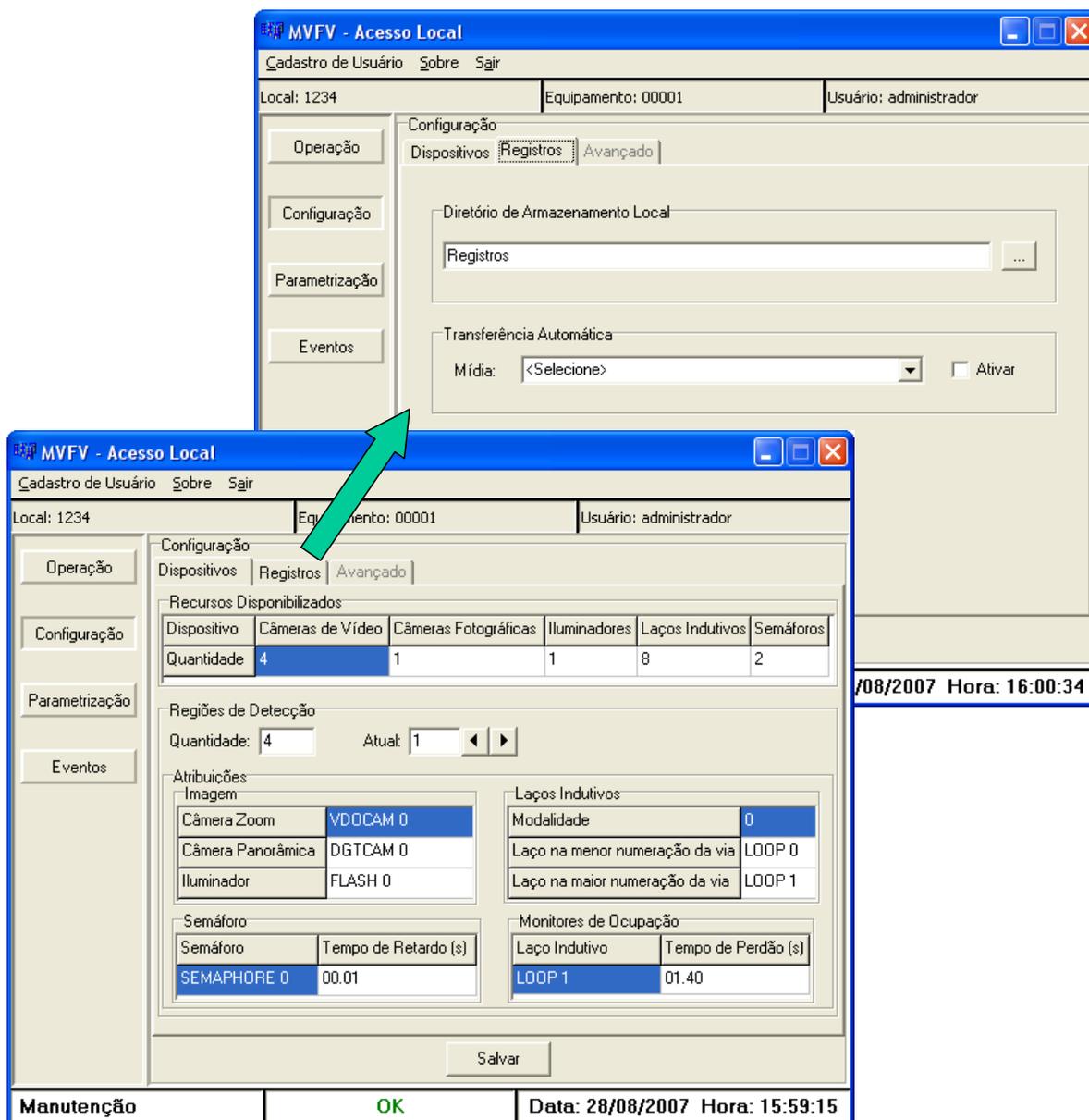


Figura B-4: Seção "Configuração": a guia "Dispositivos" permite visualizar a quantidade de sensores e dispositivos de captura de imagem alocados por região de detecção. Na guia "Registros" é possível escolher o diretório de armazenamento dos registros de veículos, bem como selecionar um dispositivo para coleta automática em campo.

A janela funcional "Configuração" permite o estabelecimento de parâmetros para configuração da instalação específica do MVFV, abordando na guia "Dispositivos" (Figura B-4) os aspectos do equipamento alocados por região de detecção veicular e na guia "Registros" aspectos do equipamento relacionados com armazenamento e transferência automática de registros.

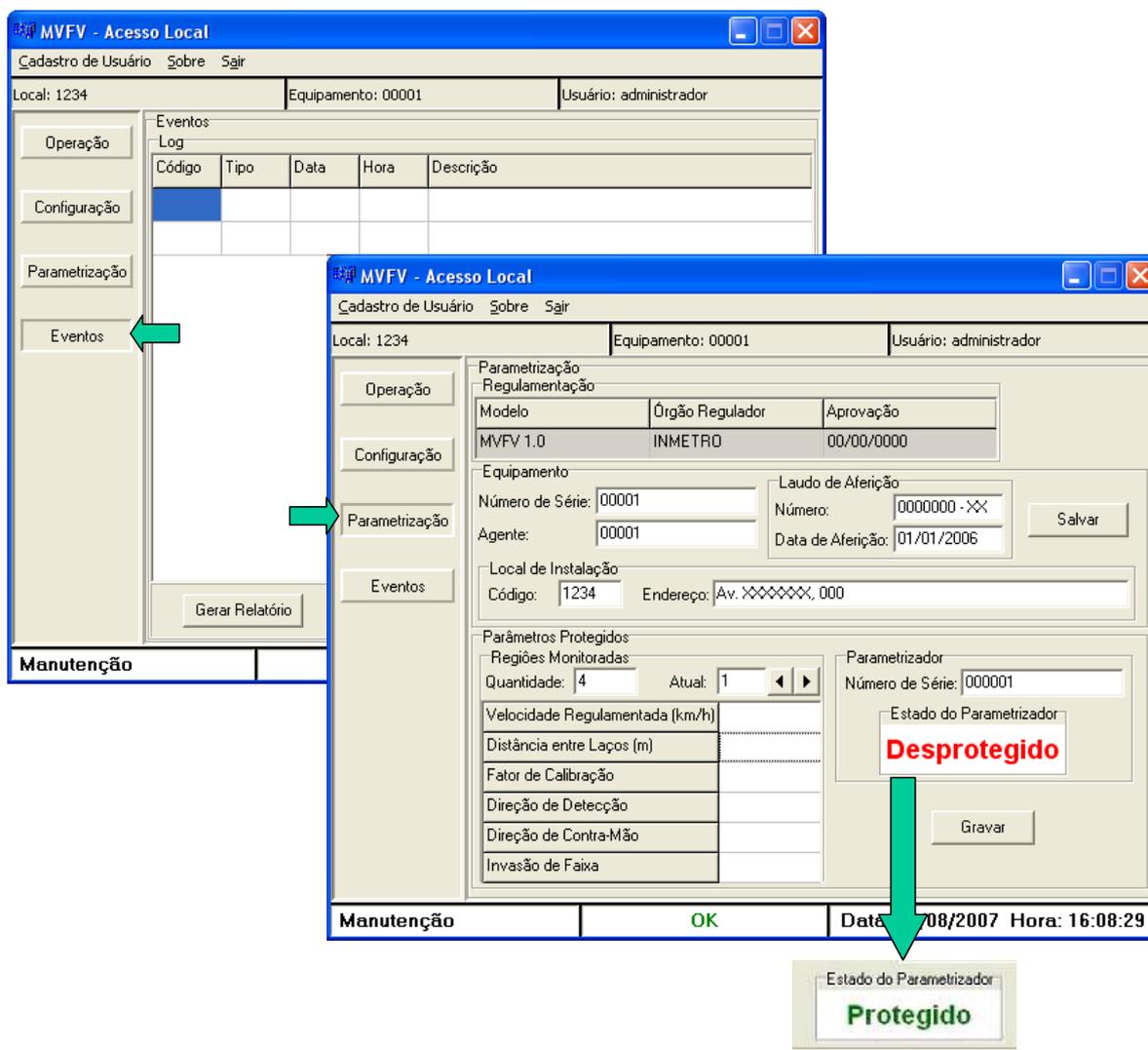


Figura B-5: Seções funcionais “Parametrização” e “Eventos”.

A seção funcional “Parametrização” (veja a Figura B-5) permite a configuração de informações do ponto de instalação requeridas pelo órgão regulador, que após processo de aferição são armazenadas no dispositivo parametrizador (Figura 4-9), que por sua vez é protegido contra escrita e selado. A seção funcional “Eventos” permite o acompanhamento do histórico de eventos de operação.

B.2 Software Cliente

O *Software Cliente* do equipamento descrito aqui implementa a interface homem-máquina – IHM – para acesso às funções, configurações e registros do Servidor via estação remota constituída por um computador desktop. Ela foi concebida para rodar tanto localmente (na

mesma CPU do Servidor) quanto remotamente, sendo a comunicação realizada via IP. A Figura B-6 traz uma visão geral da IHM do cliente em ambiente MDI ⁵⁸. São mostradas quatro janelas principais: *Operação*, *Configuração*, *Estatística* e *Detalhamento*. Assim como o software servidor, o cliente foi implementado em ambiente Windows XP e linguagem C++ utilizando o compilador Borland C++ Builder 6.0.

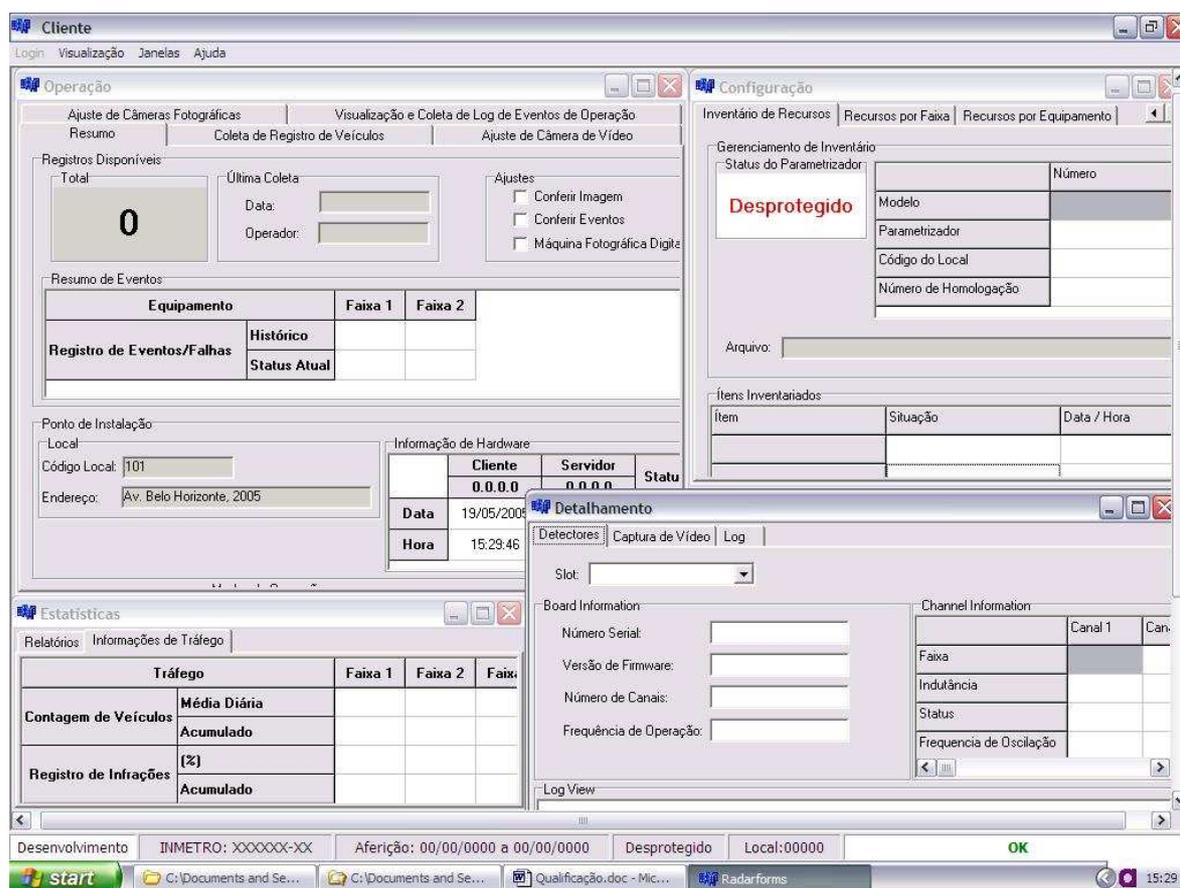


Figura B-6: Software “cliente”: visão geral da IHM em ambiente MDI, mostrando superposição das janelas de Operação, Configuração, Estatísticas e Detalhamento. A barra inferior mostra o modo de operação atual do software (no caso, “desenvolvimento”), o número de registro no órgão regulador, as datas de última aferição e agendamento da próxima aferição, o status de proteção do parametrizador, o código do local de instalação e o status de eventos e falhas (no caso, “OK”).

A janela “Operação”, mostrada com sua aba “Resumo” na Figura B-7, tem como foco o operador do equipamento, que o aborda com o intuito de coletar registros e conferir o ajuste das câmeras, além de consultar o histórico de eventos e falhas no equipamento.

⁵⁸ Ambiente MDI – *Multiple Document Interface*: a aplicação permite a abertura de múltiplas janelas, mas as novas janelas permanecem circunscritas à sua janela principal.

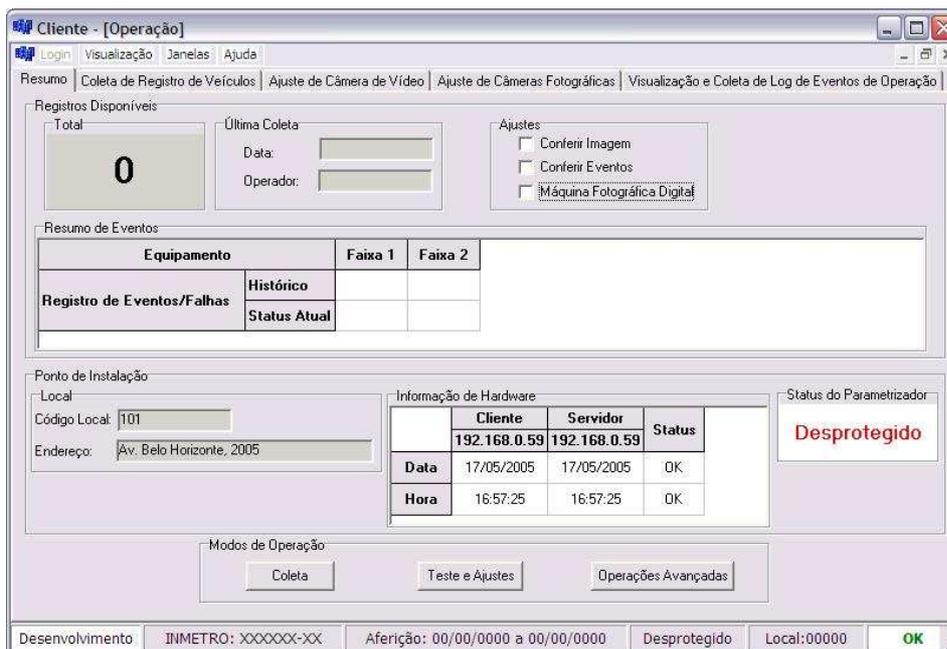


Figura B-7: Software “Cliente”: tela resumo de operação, mostrando quantidade de registros armazenados, agendamento de ajustes, registro de eventos/falhas e informações de data/hora e de conexão cliente-servidor via IP. Os ajustes de câmeras de vídeo e fotográfica, bem como a consulta a eventos de falhas são feitos nas abas correspondentes.

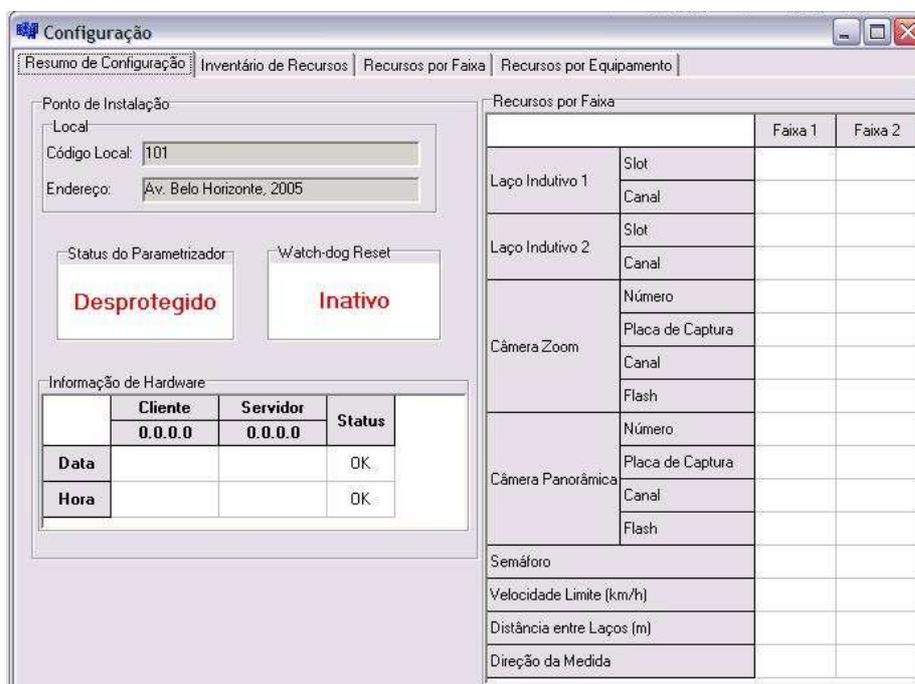


Figura B-8: Software “Cliente”: tela resumo de configuração, mostrando alocação de recursos por faixa. Os recursos disponíveis constam da aba “Inventário de Recursos”; a atribuição de recursos é feita nas abas “Recursos por Faixa” e “Recursos por Equipamento”.

A janela “*Configuração*”, cuja aba “*Resumo de Configuração*” é mostrada na Figura B-8, é usada para cadastrar os recursos disponíveis (câmeras, detectores no *rack*, etc.) e atribuí-los às vias de tráfego, bem como cadastrar diretórios para armazenagem das informações, cadastrar usuários, endereços IP e dispositivos de mídia para coleta dos registros.

A janela “*Estatística*” serve para emissão de relatórios de tráfego em forma de gráficos e tabelas. A janela “*Detalhamento*” traz informações necessárias ao desenvolvimento do equipamento, como frequência de oscilação e variação de indutância dos laços, log de eventos de comunicação, etc. A janela de ajuste das câmeras de vídeo é mostrada como exemplo na Figura B-9.

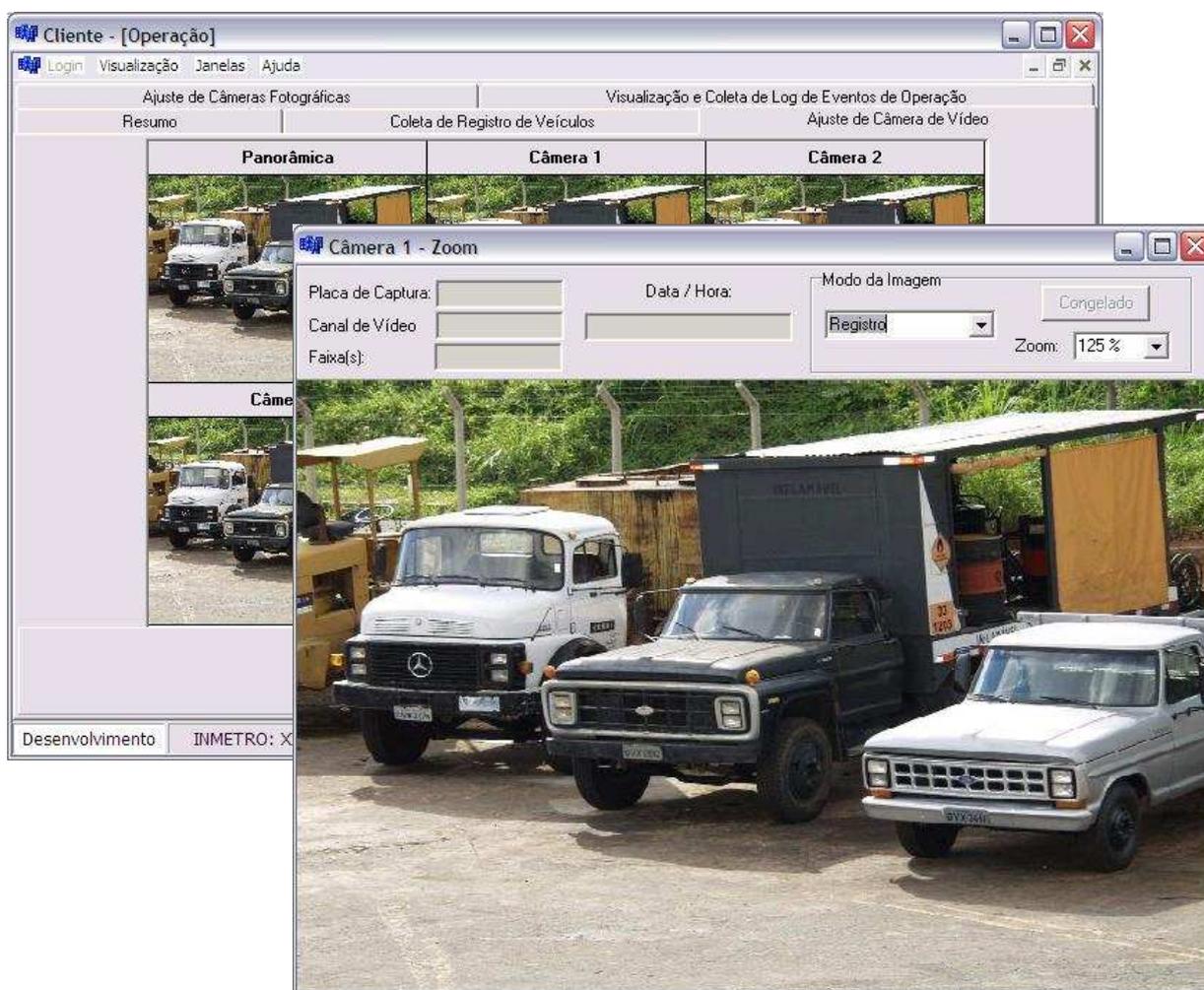


Figura B-9: Software “Cliente”: telas de ajuste das câmeras de vídeo, com ferramenta de zoom e opções de visualização “ao vivo” ou “congelado”. A origem da imagem pode ser o último registro efetuado (opção mostrada) ou imagem atual.

Apêndice C

Delegate Software Usage

User's application thread should look like the block shown in Figura 5-6, composed of "DelegateServiceProvider", "DelegateInterface" and "DelegatePort" classes (the last two being optional). The lower left region of that diagram is zoomed and reproduced below in Figura C-1, showing the aforementioned block ⁵⁹.

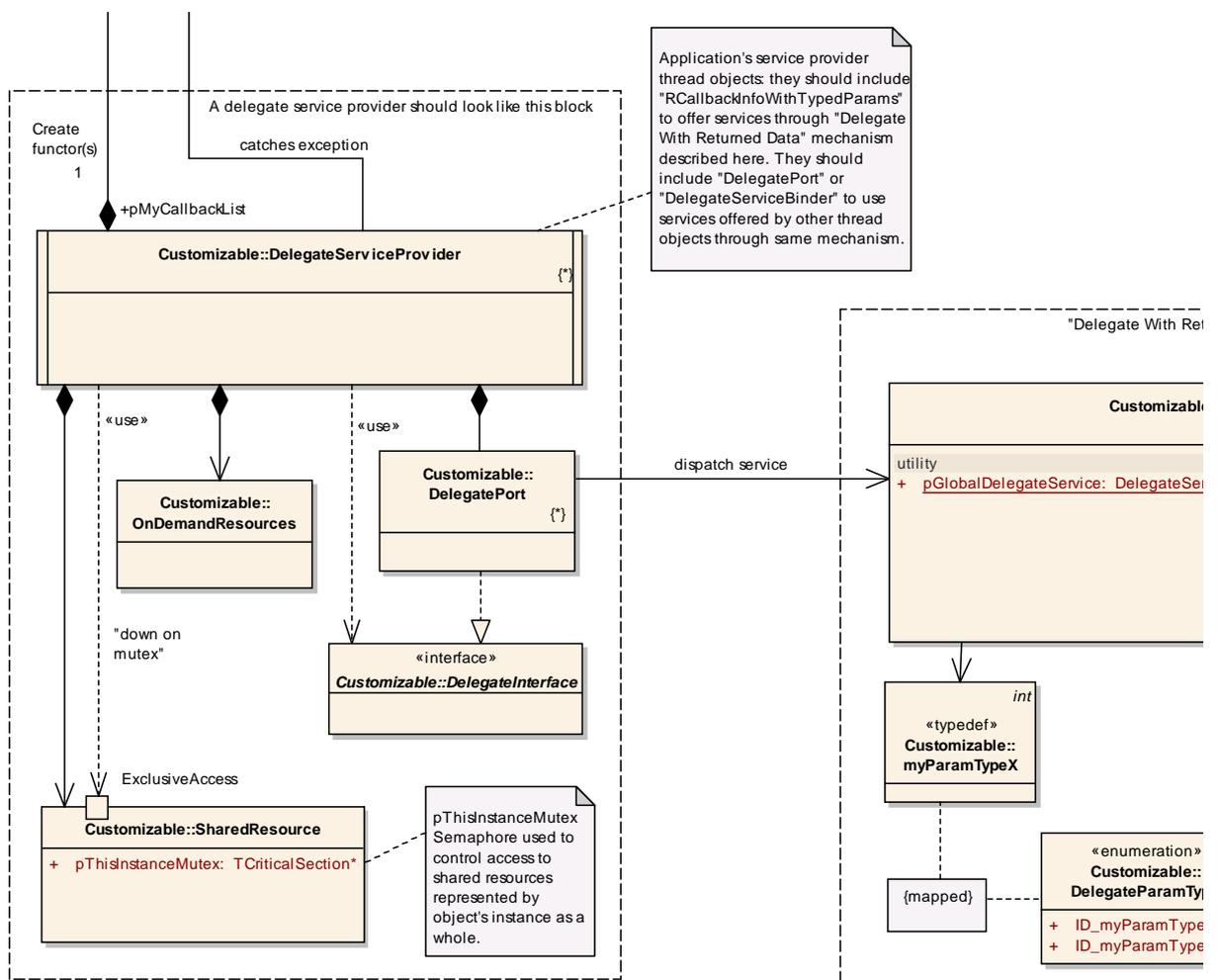


Figura C-1: A zoom into lower left of Figura 5-6 shows the block where a class architecture is advised to represent service provider classes that want to use *RDelegate* mechanism. The same architecture is advised for use with *SDelegate* mechanism. You only need to change the functor's include file from `"RCallbackInfoWithTypedParams.h"` to `"CallbackInfoWithTypedParam.h"`.

⁵⁹ O software e sua documentação foram desenvolvidos em língua inglesa (com exceção das interfaces homem-máquina), para promover a universalização de sua compreensão e uso.

DelegateServiceProvider is the user's application thread class. It creates functors and publish them to be called anywhere in the application address space through use of only its service name and parameter types. There are two kinds of offered delegate callback mechanisms *SDelegate* and *RDelegate* for one-way and two-way service dispatch, respectively. Usage examples for both delegate mechanisms are shown in following items C.1 and C.2. These mechanisms are made available in C++ user application classes that play the *provider* role by simply including the functor's definition header files "*CallbackInfoWithTypedParam.h*" and/or "*RCallbackInfoWithTypedParams.h*" respectively, depending on which delegate mechanism is desired. The application target class is the functor publisher: it owns it and is responsible for it. A delegate service provider class object can also access services from other service provider thread objects using same mechanism, preferably through the *DelegateInterface - DelegatePort* scheme illustrated in Figura C-1.

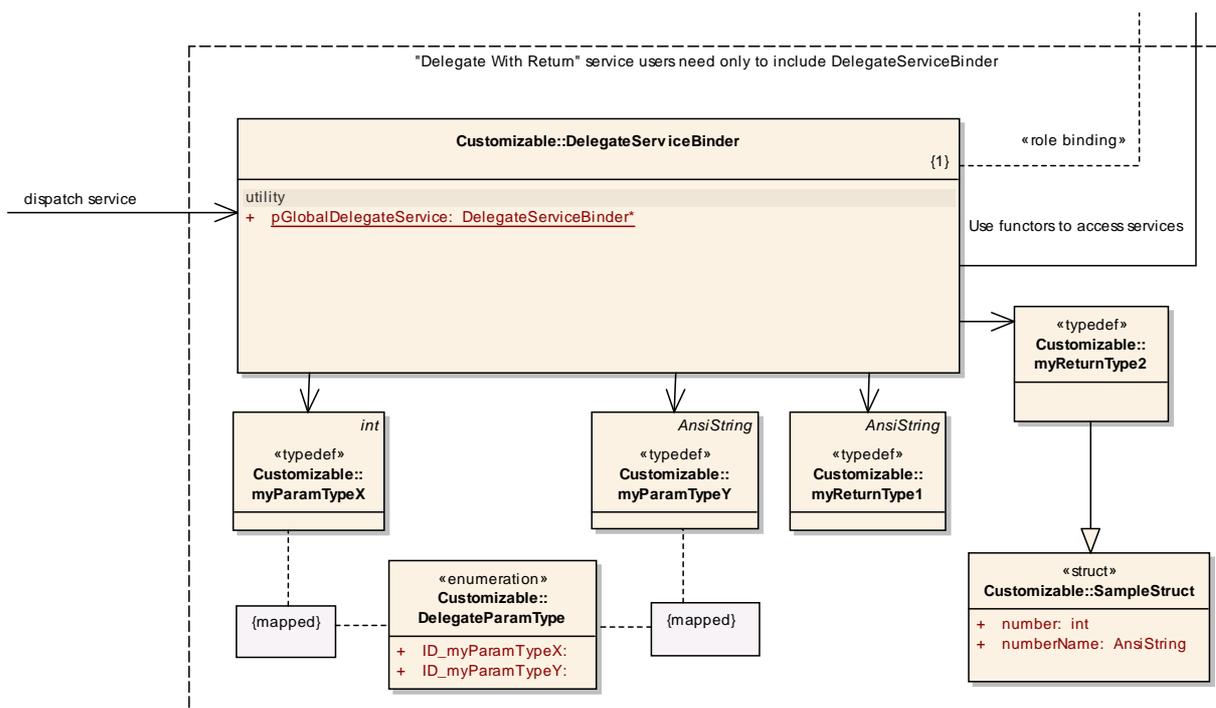


Figura C-2: A zoom into lower right of Figura 5-6 shows the block where a global dispatcher binds service calls to service lists, with type checking made at compile time. The C++ classes that are service users need only to include *DelegateServiceBinder.h* in their definitions. The *typedefs* shown are samples of user-defined parameters for use in examples shown in items C.1 and C.2.

The class *DelegateServiceBinder*, shown in Figura 5-6 and reproduced in Figura C-2, is needed as a single global instance per user application, and must be accessible by all classes that want to request services through delegate mechanism, i.e., based only on service name and parameters passed. Overloading mechanism lets compiler bind correct parameter type

calls from corresponding "*callbackDispatch*" calls to multiple lists in memory, that are responsible for guarding and dispatching services. These template class lists are selected automatically at run-time: *OfferedServicesWithTypedParams*<*MyParamType*> and *ROfferedServicesWithTypedParams*<*MyParamType*,*MyReturnTypes*>, for one-way *SDelegate* and two-way *RDelegate*, respectively. The last one is represented in Figura 5-6, and the first one takes a similar place and plays a similar role at *SDelegate* class diagram (not shown).

In the examples shown, the user-defined exchange parameters had their type definitions concentrated in a single file called *DelegateParamTypes.h*. Though not mandatory, this helps when the data types are to be integrated further with Proxy framework described in Seção 5.1.3.

SERVICE PROVIDER

To help understand given examples as a service provider class, read notes below:

- Note 1: see all *DelegateServiceProvider*, *DelegatePort*, *DelegateInterface* and *DelegateServiceBinder* following documentation to help understand the usage examples.
- Note 2: for each type of templated parameter <*MyParamType*> type or pair of templated parameter <*MyParamType*, *MyReturnTypes*> types passed (and the way of passing the INPUT parameter either by value or reference) to operations pointed at by functors, there must be a corresponding "*dispatch*" method at *DelegateServiceBinder* class.
- Note 3: in examples given, in order to generate "*Hello World*" message you must call in your application the service named "*John*" passing number "1" as a parameter. So you must instantiate your application object as a service user object and call it through the *pGlobalDelegateService* pointer. To see how to turn your class into a service user, read *Service User* text explanation below and examine *DelegateServiceBinder* example for details.
- Note 4: *myParamTypeX* in the examples has its type defined at *DelegateParamTypes.h*, which by its turn is included in *DelegateServiceBinder* class declaration. It is simply a *typedef* to "*int*" to be passed by value as a functor parameter.

This and the following parameters type choices were made so that the example could be easily compiled and tested.

- Note 5: *myParamTypeY* in this example has its type defined at *DelegateParamTypes.h*, which is included in *DelegateServiceBinder* class declaration. It is a *typedef* to "*AnsiString*" parameter to be passed as reference to a constant, so that the example should be tested using strings.
- Note 6: *myReturnType* in this example has its type defined at *DelegateParamTypes.h*, which is included in *DelegateServiceBinder* class declaration. It is a *typedef* to a *void* pointer (i.e.: *void **) parameter to be passed by reference. One of the intentions of delegate mechanism is to move the programmers from using void pointers to return data from callbacks, emphasizing a type-safe programming environment instead. But the choice for a *void* pointer return parameter in this example is to show that the mechanism still works for this type of pointer, what eases gradual incorporation of legacy code into the environment.
- Note 7: be careful not to get into deadlocks – instantiation of objects of new functors inside service dispatch handlers is not allowed. If you do that, you will be trying to read the service list to dispatch the service and at the same time you will be trying to register a new service in the same list (that won't be available for writing). It is advised to instantiate all needed functors at once and then start using them do dispatch services.
- Note 8: dispatches of services that use same parameter types, either passed by value or by reference, are protected by the same semaphore.

SERVICE USER

As a user of offered services, you should follow steps listed below:

- Step 1: Customize *DelegateServiceBinder* parameter types and call methods:
 - ***SDelegate***: include *OfferedServicesWithSingleTypedParam.h* header file into *DelegateServiceBinder* class definition. *SDelegate* is used for callback functors of operations that receive a single input parameter and need no return to caller. Every particular type (for example *<myParamTypeX>*, *<myParamTypeY>*, ...

etc.), either passed by value or by reference, must be bound to a service call as static operations named *dispatch()* in the *DelegateServiceBinder* class, as shown in examples given. Modify these examples to fulfill your application needs, replacing example parameter types with your own. If you need to pass more than one parameter at a time, you always can create a new structure or class type that encapsulates all parameters to be passed as a single one. If you also need to get data return from service, use *RDelegate* mechanism instead.

- ***RDelegate***: include *ROfferedServicesWithTypedParams.h* header file into *DelegateServiceBinder* class declaration. *RDelegate* is used for callback functors of operations that receive a single input parameter and provide a single return to caller, as well as an event signal resulting from a successful service processing. Every particular input / output pair type (for example *<myParamTypeX,myReturnType>*, *<myParamTypeY,myReturnType>*, ... etc.) needed in the application, either with input parameter passed by value or by reference, must be bound to a service call as static operations named *dispatch()* in the *DelegateServiceBinder* class, as shown in examples. Modify them to fulfill your application needs. If you do not need to get processed data returned back from service, use *SDelegate* mechanism instead.
- Step 2: Certify that there is at least one instance of a global static *DelegateServiceBinder* object per user application, accessible to all users of services offered through functor callback mechanism. In the examples below, *pGlobalDelegateService* pointer will be used to request services using delegate mechanism. We suggest that you put a line of code like the one below at the end of header file *DelegateServiceBinder.h*, AFTER the *DelegateServiceBinder* class declaration's closing brace (to make it globally accessible), so that when you include this file, the global dispatch pointer will be created as well:

```
static DelegateServiceBinder *pGlobalDelegateService = new DelegateServiceBinder;
```

- Step 3: Include *DelegateServiceBinder.h* header file in declaration of all classes that need to call services using functor's callback mechanism. Certify that the parameter type and parameter passing methods needed by your application are consistent with declarations made in Step 1 above.

- Step 4: In your application, call services as needed, for example:
 - A simple "One-Way" delegate service dispatch, where a single parameter is passed to provider and there is no data return to caller:

```
::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceName,parameter);
```

- A delegate service dispatch with input parameter passed to provider, signal event from provider to caller and processed data return:

```
::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceName,inputParam,pSignalToCaller,
                                     &returnToCaller);
```

C.1 Example of SDelegate Usage (one-way data flow service dispatch)

Example of *SDelegate* usage: a "one way" delegate where the services have only a single input parameter and no returned data to caller:

- To work as a service provider, include file "*CallbackInfoWithTypedParam.h*."
- To work as a service user, include "*DelegateServiceBinder.h*" (which by its turn includes the *OfferedServicesWithSingleTypedParam.h* header file).

C.1.1 DelegateServiceProvider

SAMPLE HEADER FILE "DELEGATESERVICEPROVIDER.H":

```
#include "CallbackInfoWithTypedParam.h" // SDelegate functor and framework definitions
#include "DelegatePort.h" // Optional, used to emphasize good software development practices using ports.
#include "Dialogs.hpp" // Required in this example to show "Hello World" message using Borland C++ Builder

class DelegateServiceProvider
{
public:

    DelegateServiceProvider();
    virtual ~DelegateServiceProvider();

    // Example of operation with single parameter passed by value:
    void operation1_PointedAt(myParamTypeX);

    // Example of operation with single parameter passed as reference to a "myParamTypeY" constant:
    void operation2_PointedAt(const myParamTypeY *);
```

```
private:

// Service names:
AnsiString serviceNameA;
AnsiString serviceNameB;

// Parameters to be passed:
myParamTypeX paramA;
const myParamTypeY *paramB;

// Functor pointers:
CallbackInfoWithTypedParam<myParamTypeX,DelegateServiceProvider> *myFunctor1_byValue;
CallbackInfoWithTypedParam<myParamTypeY,DelegateServiceProvider> *myFunctor2_byRef;

// Pointers needed only if you need to unregister functors:
OfferedServicesWithSingleTypedParam<myParamTypeX> *pCallbackServicesListType1;
OfferedServicesWithSingleTypedParam<myParamTypeY> *pCallbackServicesListType2;
};
```

SAMPLE IMPLEMENTATION FILE "DELEGATESERVICEPROVIDER.CPP":

```
#include "DelegateServiceProvider.h"

// Constructor creates pointer to operations (i.e. functors) within this class
DelegateServiceProvider::DelegateServiceProvider()
{
// Service names:
serviceNameA="John";
serviceNameB="Mary";

// Service parameters to be passed:
paramA = 1;
paramB = new AnsiString ("Hello World");

// Create a functor whose "operation1_PointedAt()" is declared within "this" current
// "DelegateServiceProvider" class. It accepts a parameter of type "myParamTypeX"
// passed by value and the corresponding service will be published through the name of "John":
myFunctor1_byValue = new CallbackInfoWithTypedParam<myParamTypeX,DelegateServiceProvider>
    (this, &DelegateServiceProvider::operation1_PointedAt,serviceNameA);

// Create a functor whose "operation2_PointedAt()" is declared within "this" current
// "DelegateServiceProvider" class. It accepts a parameter of type "myParamTypeY"
// passed as a reference to a constant and the corresponding service will be published
// through the name of "Mary":
myFunctor2_byRef = new CallbackInfoWithTypedParam<myParamTypeY,DelegateServiceProvider>
    (this, &DelegateServiceProvider::operation2_PointedAt,serviceNameB);
}

// Destructor unregisters services provided by the current class instance before its destruction.
DelegateServiceProvider::~DelegateServiceProvider()
{
pCallbackServicesListType1=myFunctor1_byValue->getPtrToServicesListByName();
pCallbackServicesListType1->unregisterService(serviceNameA);

pCallbackServicesListType2=myFunctor2_byRef->getPtrToServicesListByName();
```

```

    pCallbackServicesListType2->unregisterService(serviceNameB);
}

// Service handler published as "John":
void DelegateServiceProvider::operation1_PointedAt(myParamTypeX myParamByValue)
{
    // Operation 1 body, using myParamByValue as input parameter passed by value.
    // Operations to be pointed at by functors in this simplified one-way version must always have one
    // and only one (input) parameter. For complex data, encapsulate all data to exchange in a
    // single augmented user-defined type.
    myParamByValue++;
    if (myParamByValue == 2)
    {
        // You can call a functor within a service handler! Here the service provider becomes a service user!
        ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameB,paramB);
    }
}

// Service handler published as "Mary":
void DelegateServiceProvider::operation2_PointedAt(const myParamTypeY *myParamByRef)
{
    // Operation 2 body, using myParamByRef as input parameter passed by reference.
    // Operations to be pointed at by functors in this simplified one-way version must always have one
    // and only one (input) parameter. For complex data, encapsulate all data to exchange in a
    // single augmented user-defined type.

    // #include "Dialogs.hpp" if you want to run this example using Borland C++ Builder:
    ShowMessage(*myParamByRef);
}

```

C.1.2 *DelegateServiceBinder*

SAMPLE HEADER FILE "DELEGATESERVICEBINDER.H":

```

#include "DelegateEnums.h" // This include is optional. It is needed when Proxy framework is to be used.
#include "DelegateParamTypes.h" // This file concentrates declarations of all data types that will be exchanged
#include "SyncObjs.hpp" // Needed to use mutex objects (semaphores) in Borland C++ Builder

//SDelegate framework definitions are made within the following include file:
#include "OfferedServicesWithSingleTypedParam.h"

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter type passed by value. Simply replace example type "myParamTypeX" with
// real type from your application as needed.
static ServiceCallStatus dispatch(const AnsiString serviceName, myParamTypeX parameter);

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter type passed by reference. Simply replace example type "myParamTypeY"
// with real type from your application as needed.
static ServiceCallStatus dispatch(const AnsiString serviceName, const myParamTypeY * parameter);

```

SAMPLE IMPLEMENTATION FILE "DELEGATESERVICEBINDER.CPP":

```
// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter type passed by value. Simply replace example type "myParamTypeX" with
// real type from your application as needed.
ServiceCallStatus DelegateServiceBinder::dispatch(const AnsiString serviceName, myParamTypeX parameter)
{
    return (OfferedServicesWithSingleTypedParam<myParamTypeX>::callbackDispatch(serviceName,
                                        parameter));
}

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter type passed by reference. Simply replace example type "myParamTypeY"
// with real type from your application as needed.
ServiceCallStatus DelegateServiceBinder::dispatch(const AnsiString serviceName,
                                                const myParamTypeY * parameter)
{
    return(OfferedServicesWithSingleTypedParam<myParamTypeY>::callbackDispatch(serviceName,
                                        parameter));
}
```

C.1.3 DelegateInterface

```
/**
 * Optional interface(s) to grant organized and selective access to user's application threads services via
 * "delegate" functionality.
 *
 * User can customize interface operations as desired.
 * Below there are some examples where the parameter passed directly maps into delegate behavior:
 * (See also DelegateServiceProvider and DelegatePort documentation to help understand usage example)
 *
 * -----
 *
 * class MyApplicationThreadInterface1 {
 * public:
 *
 * // Example for service names to be determined at DelegatePort class instance based on interface function
 * // names: (used when interface has particular service names and signatures for an external application to use)
 * virtual void myNameIsJohn(MyParamTypeX paramByValue) = 0;
 * virtual void myNameIsMary(const MyParamTypeY *paramByRef) = 0;
 *
 * // Example for service names passed as parameters as well:
 * virtual void availableServiceParamTypeX (AnsiString serviceNameA, MyParamTypeX paramByValue) = 0;
 * virtual void availableServiceParamTypeY (AnsiString serviceNameB, const MyParamTypeY *paramByRef) = 0;
 *
 * // etc. (Use your imagination)
 * };
 */

class DelegateInterface
{

};
```

C.1.4 *DelegatePort*

```

/**
 * Optional port(s) to grant organized access (and protocol behavior if applicable) to user's
 * application threads services via "delegate" functionality. Services are offered to other application
 * threads via "DelegateInterface" specifications.
 *
 * User can customize port operations as desired.
 * Below there are some examples where the parameter passed through interface directly maps into delegate
 * behavior: (see also DelegateServiceProvider, DelegateInterface and DelegateServiceBinder documentation
 * to help understand usage example)
 *
 * Note: The following examples in comments mix header and implementation files:
 *
 * class MyApplicationThreadPort1 {
 * public:
 *
 * Example for service names to be determined at DelegatePort instance based on interface function names:
 * (In this case, you know a priori the correspondence between interface names and service names)
 *
 * virtual void myNameIsJohn(MyParamTypeX paramByValue)
 * {
 *     // Some behavioral guard conditions checking made here and ...
 *     ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameA, paramByValue);
 * }
 *
 * virtual void myNameIsMary(const MyParamTypeY *paramByRef)
 * {
 *     // Some service name and behavioral guard conditions checking made here and ...
 *     ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameB, paramByRef);
 * }
 *
 * Example for service names passed as parameters as well:
 * (In this case, a name checking could be made to grant access to service, for example)
 *
 * virtual void availableServiceParamTypeX (AnsiString serviceNameA, MyParamTypeX paramByValue)
 * {
 *     // Some service name and behavioral checking made here and ...
 *     ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameA, paramByValue);
 * }
 *
 * virtual void availableServiceParamTypeY (AnsiString serviceNameB, const MyParamTypeY *paramByRef)
 * {
 *     // Some service name and behavioral checking made here and ...
 *     ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameB, paramByRef);
 * }
 * // etc. (Use your imagination)
 * };
 */
#include "DelegateInterface.h"
#include "DelegateServiceBinder.h"

class DelegatePort : public DelegateInterface
{
public:
    DelegatePort();
    virtual ~DelegatePort();
};

```

C.2 Example of RDelegate Usage (two-way data flow service dispatch)

Example of *RDelegate* usage: delegate behavior where the service has an input parameter and returns processed data to caller and a signaling event:

- To work as a service provider, include file "*RCallbackInfoWithTypedParams.h*".
- To work as a service user, include "*DelegateServiceBinder.h*" (which by its turn includes the *ROfferedServicesWithTypedParams.h* header file).

C.2.1 DelegateServiceProvider

SAMPLE HEADER FILE "*DELEGATESERVICEPROVIDER.H*":

```
#include "RcallbackInfoWithTypedParams.h" // RDelegate functor and framework definitions
#include "DelegatePort.h" // Optional, used to emphasize good software development practices using ports.
#include "Dialogs.hpp" // Required in this example to show "Hello World" message using Borland C++ Builder
```

```
class DelegateServiceProvider
{
public:

    DelegateServiceProvider();
    virtual ~DelegateServiceProvider();

    // Example of operation with input parameter passed by value
    // (John's service implementation):
    void operation1_PointedAt(myParamTypeX, TSimpleEvent *, myReturnType &);

    // Example of operation with single parameter passed as reference to a "myParamTypeY" constant
    // ("Mary's service implementation):
    void operation2_PointedAt(const myParamTypeY *, TSimpleEvent *, myReturnType &);

private:

    // Service names:
    // Service "A" will be named "John" and corresponding service will be called by Caller 1
    // (that results from a mouse click):
    AnsiString serviceNameA;

    // Service "B" will be named "Mary" and corresponding service will be called by Caller 2
    // (which is "John" service):
    AnsiString serviceNameB;

    // Input parameters to be passed:
    myParamTypeX paramA; // To be provided by Caller 1 (passed by value)
    const myParamTypeY *paramB; // To be provided by Caller 2 (passed by constant reference)

    // Event objects to warn service requester (caller) that the task was completed:
    TSimpleEvent *pCaller1EventToWarnHim;
    TSimpleEvent *pCaller2EventToWarnHim;
```

```

// Following there are Callers 1 and 2 memory area to return processed data.
// As it was said earlier, in this example the <myReturnType> is a void *. So two different types
// will be used by callers 1 and 2, and they should be correctly casted at both peers. This is for current
// example only: avoid using void pointers to prevent hard to find run-time errors, once the
// use of templated functor delegate classes was chosen to reify the compile-time type-checking.
// The choice for void * pointer in this example is only to show that the mechanism works for them
// as well, if you decide to migrate legacy code to new mechanism at once.

// Caller 1, as a service user, expects the following sample return data structure
// (passed by reference) to be filled by service provider:
struct Caller1ReturnType
{
    // A number that is the result of service processing:
    int number;

    // An AnsiString that reflects the number as a string:
    AnsiString numberName;

} caller1DataAreaToFill;

// Caller 2 expects an AnsiString object to be filled:
AnsiString caller2DataAreaToFill;

// Functor pointers:
RCallbackInfoWithTypedParams<myParamTypeX,myReturnType,DelegateServiceProvider>
    *myFunctor1_byValue_WithReturn;
RCallbackInfoWithTypedParams<myParamTypeY,myReturnType,DelegateServiceProvider>
    *myFunctor2_byRef_WithReturn;

// Pointers needed only if you need to unregister functors:
ROfferedServicesWithTypedParams<myParamTypeX,myReturnType> *pCallbackServicesListType1;
ROfferedServicesWithTypedParams<myParamTypeY,myReturnType> *pCallbackServicesListType2;
};

```

SAMPLE IMPLEMENTATION FILE "DELEGATESERVICEPROVIDER.CPP":

```

#include "DelegateServiceProvider.h"

// Constructor creates pointer to operations (i.e. functors) within this class
DelegateServiceProvider::DelegateServiceProvider()
{
    // Service names:
    serviceNameA="John";
    serviceNameB="Mary";

    // Service parameters to be passed:
    paramA = 1;
    paramB = new AnsiString ("Hello World");

    // Reset events:
    pCaller1EventToWarnHim->ResetEvent();
    pCaller2EventToWarnHim->ResetEvent();
}

```

```

// Create a functor whose "operation1_PointedAt()" is declared within "this" current
// "DelegateServiceProvider" class. It accepts an input parameter of type "myParamTypeX"
// passed by value and the corresponding service will be published through the name of "John".
// The data from the service provider will be of "myReturnType" type (a pointer to void in this example):

myFunctor1_byValue_WithReturn = new RCallbackInfoWithTypedParams
    <myParamTypeX,myReturnType,DelegateServiceProvider>
    (this, &DelegateServiceProvider::operation1_PointedAt,serviceNameA);

// Create a functor whose "operation2_PointedAt()" is declared within "this" current
// "DelegateServiceProvider" class. It accepts the input parameter of type "myParamTypeY"
// passed as a reference to a constant and the corresponding service will be published
// through the name of "Mary". The data returned from service provider will be of type "myReturnType":

myFunctor2_byRef_WithReturn = new RCallbackInfoWithTypedParams
    <myParamTypeY,myReturnType,DelegateServiceProvider>
    (this, &DelegateServiceProvider::operation2_PointedAt,serviceNameB);
}

// Destructor unregisters services provided by the current class instance before its destruction.
DelegateServiceProvider::~DelegateServiceProvider()
{
    pCallbackServicesListType1=myFunctor1_byValue_WithReturn->getPtrToServicesListByName();
    pCallbackServicesListType1->unregisterService(serviceNameA);

    pCallbackServicesListType2=myFunctor2_byRef_WithReturn->getPtrToServicesListByName();
    pCallbackServicesListType2->unregisterService(serviceNameB);
}

// Service handler published as "John" :
void DelegateServiceProvider::operation1_PointedAt(myParamTypeX myParamByValue,
    TSimpleEvent *pSignalToCaller, myReturnType &returnToCaller)
{
    // Operation 1 body, using myParamByValue as input parameter passed by value.
    // Operations to be pointed at by functors in current version must always have one and only one input
    // and one output parameters.
    // For complex data, encapsulate all data to exchange in a single augmented user-defined type.
    (Caller1ReturnType) returnToCaller.number++;
    (Caller1ReturnType) returnToCaller.numberName = AnsiString(number);

    // Tell caller 1 that "John" service already filled processed data (though it did not finish its work yet).:
    pSignalToCaller->SetEvent();

    if ( (Caller1ReturnType) returnToCaller.number == 2)
    {
        // You can call a functor within a service handler! Here the service provider becomes a service user!
        ::pGlobalDelegateService->dispatch(serviceNameB,paramB,pCaller2EventToWarnHim,caller2DataAreaToFill);

        // Wait for dispatched task to be completed before proceeding:
        pCaller2EventToWarnHim->WaitFor(INFINITY);
    }
}
}

```

```

// Service handler published as "Mary":
void DelegateServiceProvider::operation2_PointedAt(const myParamTypeY *myParamByRef,
    TSimpleEvent *pSignalToCaller, myReturnType &returnToCaller)
{
    // Operation 2 body, using myParamByRef as input parameter passed by reference.
    // Operations to be pointed at by functors must always have one and only one input and one output parameters
    // For complex data, encapsulate all data to exchange in a single augmented user-defined type.

    // #include "Dialogs.hpp" if you want to run this example using Borland C++ Builder:
    ShowMessage(*myParamByRef);
    (AnsiString) returnToCaller=AnsiString("Hello Guy!"); // Fill in processed data to return to caller.
    pSignalToCaller->SetEvent(); // Tell caller 2 that "Mary" service has completed.
}

```

C.2.2 DelegateServiceBinder

SAMPLE HEADER FILE "DELEGATESERVICEBINDER.H":

```

#include "DelegateEnums.h" // This include is optional. It is needed when Proxy framework is to be used.
#include "DelegateParamTypes.h" // This file concentrates definitions of all data types that will be exchanged
#include "SyncObjs.hpp" // Needed when using mutex objects (semaphores) in Borland C++ Builder

//RDelegate functors and framework are defined within the following include:
#include "ROfferedServicesWithTypedParams.h "

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct
// service list according to parameter types passed, where input parameter is passed by value.
// Simply replace example types <myParamTypeX,myReturnType> with real types from your application
// as needed.
static ServiceCallStatus dispatch(const AnsiString serviceName, myParamTypeX inputParam,
    TSimpleEvent *pSignalToCaller, myReturnType &returnToCaller);

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct
// service list according to parameter types passed, where input parameter is passed by reference.
// Simply replace example types <myParamTypeY,myReturnType> with real types from your application
// as needed.
static ServiceCallStatus dispatch(const AnsiString serviceName, const myParamTypeY * inputParam,
    TSimpleEvent *pSignalToCaller, myReturnType &returnToCaller);

```

SAMPLE IMPLEMENTATION FILE "DELEGATESERVICEBINDER.CPP":

```

// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter types passed, where input parameter is passed by value. Simply replace
// example type <myParamTypeX,myReturnType> with real type from your application as needed.

ServiceCallStatus DelegateServiceBinder::dispatch(const AnsiString serviceName, myParamTypeX inputParam,
    TSimpleEvent *pSignalToCaller, myReturnType &returnToCaller)
{
    return (ROfferedServicesWithTypedParams<myParamTypeX,myReturnType>::callbackDispatch
        (serviceName, inputParam, pSignalToCaller, returnToCaller));
}

```

```
// Service dispatching translation function implementing overloaded behavior that selects correct service
// list according to parameter type passed by reference. Simply replace example type "myParamTypeY"
// with real type from your application as needed.
```

```
ServiceCallStatus DelegateServiceBinder::dispatch
                                     (const AnsiString serviceName, const myParamTypeY * inputParam)
{
    return(ROfferedServicesWithTypedParams<myParamTypeY,myReturnType>::callbackDispatch
          (serviceName, inputParam, pSignalToCaller, returnToCaller));
}
```

```
//Remember to customize destructor as well, to prevent memory leak when application ends.
```

Referências Bibliográficas

- [1] Abdulhai, B., Tabib, Seyed M. “Spatio-temporal inductance-pattern recognition for vehicle re-identification”, *Transportation Research Part C*, 11:223-39, 2003
- [2] Addison, P. S. “The Illustrated Wavelet Transform Handbook”, *Institute of Physics Publishing*, 2002.
- [3] Arr, G., Sun, C., Ramachandran, R. P. “Fusion of Wavelet Transform and Color Information Features for Automatic Vehicle Reidentification in Intelligent Transportation Systems”, *ICASSP’04 – Proceedings of the International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, V:285-8, May, 2004.
- [4] Athol, P. “Interdependence of Certain Operational Characteristics within a Moving Traffic Stream”, *HRB – National Research Council*, Highway Research Record 72, pp. 58-87, Washington, D. C., 1965.
- [5] Avery, Ryan P., Wang, Y., Rutherford, G. Scott. “Length-Based Vehicle Classification Using Images from Uncalibrated Video Cameras”, *2004 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp 737-42, Washington, D. C. USA, October, 2004.
- [6] Bahler, S. J., Minge. E. D., Kranig. J. M. “Field test of non-intrusive traffic detection technologies”, *Proceedings of 77th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA, 1998.
- [7] Baker, K. Sullivan, G. “Performance assessment of model-based tracking”, *Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 28-35, Palm-Springs, CA, USA, 1992.
- [8] Barbosa, H., Braga, C., Jota, F., Magalhães, D., Gouvêa, R., Dourado, D., Carvalho, J., Euletério, J., Mendes, V. “Sistema de identificação de veículos por meio de laços de indução: um projeto integrado de ensino e desenvolvimento tecnológico”, *XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.

- [9] Beymer, D. McLauchlan, P., Coifman, B., Malik, J. “A real-time computer vision system for measuring traffic parameters”, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 495-501, San Juan, Porto Rico, 1997.
- [10] Böhnke, P., Pfannerstill, E. “A system for the automatic detection of traffic situations”, *ITE – Institute of Transportation Engineering Journal*, Vol. 56., 1986.
- [11] Buckley, Joseph M. “An Introduction to Eddy Current Testing Theory and Technology”, *Hocking NDT*, <http://www.joe.buckley.net/papers/eddyc.pdf>, (link visitado em Março de 2008 a partir da página http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy-current_testing), 1994.
- [12] Calixto, Sylvio Abrão. “Classificação de Veículos Através de Sistemas Fuzzy”, Dissertação de Mestrado, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, Março de 2006.
- [13] Chachich, A., Pau, A. Barber, A. Kennedy, K., Olejniczak, E. Hackney, J., Sun, Q., Mireles, E. “Traffic sensor using color vision method”, *Transportation Sensors and Controls: Collision Avoidance, Traffic Management and ITS* – *SPIE Proceedings*, 2902:156-65, 1996.
- [14] Chao, T., Lau, B. Park, Y. “Vehicle detection and classification in shadowy traffic images using wavelets and neural networks”. *Transportation Sensors and Controls: Collision Avoidance, Traffic Management, and ITS – SPIE Proceedings*, 2902:136-47, 1996.
- [15] Chatziioanou, A., Hockaday, S., Ponce, L., Kaighn, S., Staley, C. “Video Image Processing Systems Applications in Transportation, Phase II – Final Report”, *California Polytechnic State University*, San Luis Obispo, CA, USA, 1994.
- [16] Cherrett, T. Bell, H. McDonald, M. “Traffic Measurement Parameters from Single Inductive Loop Detectors”, *Transportation Research Record 1719*, pp. 112-20, 2000.
- [17] Chung-Lin Huang, Wen-Chieh Liao. “A Vision-Based Vehicle Identification System”, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04)*, 2004.

- [18] Coifman, B. “A New Methodology for Smoothing Freeway Loop Detector Data: Introducing to Digital Filtering”, *Transportation Research Record 1554*, pp. 142-52, 1996.
- [19] Coifman, B., “Vehicle re-identification and travel time measurement in real-time on freeways using existing loop detector infrastructure”, *Proceedings of 77th Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington, D. C., USA, 1998.
- [20] Coifman, B., Beymer, D., McLauchlan, P., Malik, J. “A real-time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance”, *Transportation Research Part C*, 6: 271-88, 1998.
- [21] Condos, F. “Traffic surveillance and detection systems for intelligent transportation systems applications”, *Proceedings of the 1996 ITE annual Conference*, pp. 139-54, Minneapolis, MN, USA, 1996.
- [22] Courage, K. G., Bauer, C. S., Ross, D. W. “Operating Parameters for Main – Line Sensors in Freeway Surveillance Systems”, *HRB – National Research Council*, Highway Research Record 602, pp 19-28, Washington, 1976.
- [23] Dailey, D. “Travel-time estimation using cross-correlation techniques”, *Transportation Research Board*, 27B(2)97-107, Washington, D. C. , USA, 1993.
- [24] Dailey, D. J., Haselkorn, M. P., Nihan, N. L. “Improved Estimates of Travel from Real Time Inductance Loop Sensors”. *Washington State Transportation Center*, Washington State Department of Transportation, University of Washington, 1993.
- [25] Dailey, Daniel J., Cathey, F. W., Pumrin, S. “An Algorithm to Estimate Mean Traffic Speed Using Uncalibrated Cameras”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(2):98-107, June, 2000.
- [26] DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. “CTB – Código de Trânsito Brasileiro”. In: *Lei N° 9.503 de 23 de Setembro de 1997*, Brasil, In: (link visitado em Abril de 2008): <http://www.denatran.gov.br/ctb.htm>.
- [27] Douglass, Bruce P. “Real Time UML: Advances in The UML for Real-Time Systems, 3rd ed”, *Addison-Wesley*, Boston, MA, 2004, ISBN: 0-321-16076-2.

- [28] FHWA, “Traffic Detector Handbook, Second Edition”, *FHWA*, Publication No. FHWA-IP-90-002, In: <http://www.fhwa.dot.gov/tfhrc/safety/pubs/Ip90002/IP90002.pdf>, 1990 (*link* visitado em maio de 2005).
- [29] FHWA, “Traffic Detector Handbook, Third Edition – Vol I”, *FHWA*, Publication No. FHWA-HRT-06-108, In: <http://www.tfhrc.gov/its/pubs/06108/index.htm>, October 2006 (*link* visitado em maio de 2008).
- [30] FHWA, “Traffic Detector Handbook, Third Edition – Vol II”, *FHWA*, Publication No. FHWA-HRT-06-139, In: <http://www.tfhrc.gov/its/pubs/06139/index.htm>, October 2006 (*link* visitado em maio de 2008).
- [31] FHWA. “Detection Technologies for IVHS”, *Hughes Aircraft Report – US FHWA*, DTFH61-91-C00076, USA, 1995.
- [32] FHWA. “Field test of monitoring of urban vehicle operations using non-intrusive technologies”, *Minnesota Department of Transportation – US FHWA*, USA, May, 1997.
- [33] Gajda, J., Sroka, R., Stencel, M., Wajda, A., Zeglen, T. “A Vehicle Classification Based on Inductive Loop Detectors”, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 460-4, Budapest, Hungary, May, 2001
- [34] Guoqing Weng, Tongneng HE, Mingjun Chen, Youngzeng Shen, “The Vehicle’s Classification Recognition System Based on DTW Algorithm”, *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 4169-71, Hangzhou, P.R., China, June, 2004.
- [35] Gupte, S., Masoud, O., Martin, Robert F. K., Papanikolopoulos, Nikolaos P. “Detection and Classification of Vehicles”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1):37-47, March, 2002.
- [36] Hall, D. “Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion”, *Artech House*, London, 1992.
- [37] Hall, Llinas. “An introduction to multisensor data fusion”, *Proceedings of the IEEE*, 85(1), January, 1997.

- [38] Hall, F. L., Persaud, B. N. “Evaluation of Speed Estimates Made with Single – Detector Data from Freeway Traffic Management Systems”, *Transportation Research Record* 1232, pp. 9-16, 1989.
- [39] Harlow, C., Peng, S. “Automatic vehicle classification system with range sensors”, *Transportation Research Part C*, 9:231-47, 2001.
- [40] Hinz, Stefan. “Integrating Local and Global Features for Vehicle Detection in High Resolution Aerial Imagery”, *ISPRS Archives*, Vol. XXXIV, Part 3/W8, Munich, Germany, September 2003.
- [41] Hockadei, S. “Evaluation of Image Processing Technology for Applications in Highway Operations-Final Report”, *California Department of Transportation Technical Report* 91-2. California Polytechnic State University, CA, USA, 1991.
- [42] Hoose, N. “IMPACTS: and image analysis tool for motorway surveillance”, *Traffic Engineering and Control*, 33(3):140-7, 1992.
- [43] Jia, Z., Chen, C., Coifman, B., Varaiya, P. “The PeMS algorithms for accurate, real-time estimates of g-factors and speeds from single-loop detectors”, *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pp. 536-41, Oakland, CA, USA, August, 2001.
- [44] Johnson, D. H. & DeGraaf, S. R. “Improving the Resolution of Bearing in Passive Sonar Arrays by Eigenvalue Analysis”, *IEEE Trans. Acoustic, Speech and Signal Processing*, ASSP-30:638-47, August, 1982.
- [45] JPL, “Traffic Surveillance and Detection Technology Development, Sensor Development Final Report”, *Jet Propulsion Laboratory*, Publication No. 97-10, 1997.
- [46] Juba, M. “Succeeding with video detection”, *Traffic Technol. Int.*, pp. 33-6, October/November, 1996.
- [47] Juba, M. “Sometimes color isn’t the answer: selecting video cameras for traffic applications”, *Traffic Technol. Int.*, pp. 142-6, 1997.
- [48] Kadar, Ivan (Ed.), “Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5809, May, 2005.

- [49] Karmann, K. Brandt, A., “Moving object recognition using an adaptive background memory”, In: Cappellini, V. (Ed.), *Time Varying Image Processing and Moving Objects Recognition*, Vol. 2, Elsevier, Amsterdam, 1990.
- [50] Kilger, M. “A shadow handler in a video-based real-time traffic monitoring system”, *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 1060-6, Palm Springs, CA, USA, 1992.
- [51] Klein, A. L. “Sensor and Data Fusion Concepts and Applications”, *SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Washington, 1999.
- [52] Klein, Lawrence A. “Sensors and Data Fusion: a Tool for Information Assessment and Decision Making”, *SPIE – The International Society for Optical Engineering*, July, 2004.
- [53] Klein, Lawrence A., “Vehicle Detector Technologies for Traffic Management Applications, Part 1 & 2”, *ITS Online – The Independent Forum for Intelligent Transportation Systems*, June, 1997. Publicação redirecionada para os links: Part 1 in http://www.cotrip.org/its/ITS_Guidelines_Web_New_Format_2-05/Web_Solutions_Packages/ITS_Solution_Packages_-_Web_Copy/Vehicle_Detectors/Klein_Part_1_Vehicle_Detector_Technologies.doc; Part 2 in http://www.cotrip.org/its/ITS_Guidelines_Web_New_Format_2-05/Web_Solutions_Packages/ITS_Solution_Packages_-_Web_Copy/Vehicle_Detectors/Klein_Part_2_-_Vehicle_Detector_Technologies.doc (links visitados em Maio de 2008).
- [54] Klein, L., Kelley, M. “Detection Technology for IVHS: Final Report”, *FHWA Report No. FHWA-RD-95-100*, Hughes Aircraft Company, 1996.
- [55] Kohonen, t., “Self-Organizing Maps”, *Springer*, Berlin, 2001.
- [56] Koller, D., Weber, J., Malik, J., Robust multiple car tracking with occlusion reasoning”, *ECCV*, pp. 189-96, Stockholm, Sweden, 1994a
- [57] Koller, D., Weber, J., Huang, T., Malik, J., Ogasawara, G., Rao, B., Russell, S. “Towards robust automatic traffic scene analysis in real-time”. *ICPR*, 1:126-31, Israel, 1994b.

- [58] Koller, D. Daniilidis, K., Nagel, H. “Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes”, *International Journal of Computer Vision*, 10:257-81, 1993.
- [59] Kranig, J, “Evaluation of non-intrusive detection technologies for traffic detection and data collection”, *Proceedings NATMEC 98*, Charlotte, North Carolina, May, 1998.
- [60] Kühne, R., Palen, J., Gardner, C., Ritchie, S. “Section related measures of traffic system performance”, *76th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington, D. C., 1997.
- [61] Lai, Andrew H. S., Yung, Nelson H. C. “Vehicle-Type Identification Through Automated Virtual Loop Assignment and Block-Based Direction-Biased Motion Estimation”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(2):86-97, June, 2000.
- [62] Magalhães, Hermes A. “Estimação Espectral Paramétrica de “Clutter” Marítimo de Radar - Modelamento AR pela Maximização da Entropia e ARMA por Cumulantes”, *Tese de Mestrado - ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica*, São José dos Campos, SP, Brasil, 1991.
- [63] Magalhães, Hermes A., Araújo, Valdênio M. “Identificação de Freqüências Formantes pela Técnica MUSIC e Comparação com a Técnica LPC”, 2000. *Link* visitado em Maio de 2008: <http://www.cefala.org/~hermes/music/music.htm>.
- [64] Magalhães, Hermes A., Ramalho, Marcelo C., Yehia, Hani C., Braga, A. P., “Medição de velocidade explorando campos consecutivos de um vídeo e detecção de bordas pelo método *Level Set*”, *Primeiro Seminário do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFMG – SPGEE’05*, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2005. *Link* visitado em Maio de 2008: <http://www.cefala.org/~hermes/levelset/velocidade.pdf>.
- [65] Magalhães, Hermes A., Ribeiro, Marcelo R. “MVFV – Medidor de Velocidade e Fluxo Veicular – Memorial Descritivo”, DSP Art Hardware e Software Ltda ME, GCT-Gerenciamento e Controle de Trânsito Ltda, Belo Horizonte, MG, 2006.
- [66] Marple Jr., S. L. “Digital Spectral Analysis with Applications”, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1987.

- [67] Maybeck, Peter, S., “Stochastic Models, Estimation and Control – Volume 1”, *Academic Press*, New York, USA, 1979.
- [68] Mikhalkin, B., Payne, H. J., Isaksen, L. “Estimation of Speed from Presence Detectors”, *HRB – National Research Council*, Highway Research Record 388, pp. 73-83, Washington, D.C., 1972
- [69] Mills, Milton K. “Inductive Loop System Equivalent Circuit Model”, *39th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2:689-700, May, 1989.
- [70] MNDOT, “Field Test of Monitoring of Urban Vehicle Operations Using Non-Intrusive Technologies”, *FHWA Report No. FHWA-PL-97-018*, MN, USA, 1997.
- [71] NEMA, “Traffic Controller Assemblies with NTCIP Requirements”, *NEMA - National Electrical Manufacturers Association*, NEMA Standards Publication TS 2-1998 – Amendment 1 (Approved November 29, 2001), USA, 2001.
- [72] Nihan, N. Leth, M., Wong, A. “Video Image Processing for Freeway Monitoring and Control: Evaluation of the Mobilizer”, *Washington State Department of Transportation Report No. WA-RD 398.1/TNW 95-03*, 1995.
- [73] Oh, C., Ritchie, Stephen G., Jeng, Shin-Ting. “Vehicle Reidentification using Heterogeneous Detection Systems” – Report UCI-ITS-TS-WP-04-3, *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM – Paper 002900, Washington, D. C., January, 2004.
- [74] Oh, C., Ritchie, Stephen G., Jeng, Shin-Ting. “Anonymous Vehicle Reidentification Using Heterogeneous Detection Systems”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3):460- 9, September, 2007.
- [75] Oh, S., Ritchie, Stephen G., Oh, C., “Real Time Traffic Measurement from Single Loop Inductive Signatures”, *81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D. C., January, 2002.

- [76] Oh, C., Ritchie, Stephen G., “Anonymous Vehicle Tracking for Real-Time Traffic Surveillance and Performance on Signalized Arterials” – Report UCI-ITS-TS-WP-03-14, *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM Paper 03-4347, Washington, D. C., January, 2003.
- [77] Oh, C., Ritchie, Stephen G. “Real-time Inductive-Signature-Based Level of Service for Signalized Intersections”, *81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Paper No. 02-3684, Washington, D. C., January, 2002.
- [78] “OMG Unified Modeling Language (OMG UML) Infrastructure V2.1.2”, *OMG – Object Management Group*, <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Infrastructure/PDF>, November, 2007.
- [79] “OMG Unified Modeling Language (OMG UML) Superstructure V2.1.2”, *OMG – Object Management Group*, <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Superstructure/PDF>, November, 2007.
- [80] Paragios, N. P. “Geodesic Active Regions and Level Set Methods: Contributions and Applications in Artificial Vision”, *PhD Dissertation*, INRIA Sophia Antipolis, France, January, 2000
- [81] Park, U., Silva, F., How, Mengzhao., Heidemann, J., Guiliano, G., Wang, X. Prashar, N. “Single- and Multi-Sensor Techniques to Improve Accuracy of Urban Vehicle Classification”, *ISI-TR-2006-614*. ISI, SPPD and CS Departments/Institutes at University of Southern California, 2006.
- [82] Pender, Tom. “UML Bible”, *Wiley Publishing, Inc.*, Indianapolis, IN, 2003, ISBN:0-7645-2604-9.
- [83] Pfannerstill, E. “Automatic Monitoring of Traffic Conditions by Re-identification of Vehicles”, *Proceedings – IEE Conference on Road Traffic Monitoring*, Report 299, pp. 172-5, 1989.
- [84] Rajagopalan, A. N., Burlina, P., Chellappa, R. “Higher Order Statistical Learning for Vehicle Detection in Images”, *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 2:1204-9, Kerkyra, Greece, 1999.

- [85] Ramachandran, Ravi P., Arr, G., Sun, C., Ritchie, Stephan G. “A Pattern Recognition and Feature Fusion Formulation for Vehicle Reidentification in Intelligent Transportation Systems”, *IEEE Int. Conf. on Acoustic Speech and Signal Processing*, IV:3840-3, Orlando, FL, USA, May, 2002.
- [86] Ritchie, Stephen G., Park, S., Oh, Jeng, Shing-Ting, Tok, A. “Field Investigation of Advanced Vehicle Reidentification Techniques and Detector Technologies – Phase 2”, *California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2005-8*, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA, USA, March, 2005.
- [87] Ritchie, Stephen G., Park, S., Oh, C., Jeng, Shin-Ting, Tok, A. “Anonymous Vehicle Tracking for Real-Time Freeway and Arterial Street Performance Measurement”, *California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2005-9*, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA, USA, March, 2005.
- [88] Roberts, Richard A., Mullis, Clifford T. “Digital Signal Processing”, *Addison-Wesley*, Reading, MA, 1987.
- [89] Salomon, David S. “Data Compression – The Complete Reference, 2nd Ed.”, *Springer-Verlag*, New York, 2000.
- [90] Soong, F., Rosenberg, A. “On the use of instantaneous and transitional spectral information in speaker recognition”, *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing*, Vol. 36, pp. 871-9, 1998.
- [91] Specht, D. F. “Probabilistic Neural Networks and General Regression Neural Networks”, *In: Chen, C. H. (Ed.) – Fuzzy Logic and Neural Network Handbook*, 1996.
- [92] Sroka, Ryszard. “Data Fusion Methods Based on Fuzzy Measures in Vehicle Classification Process”, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 2234-8, Como, Italy, May, 2004.
- [93] Sullivan, G. D., Baker, K. D., Worrall, A. D., Attwood, C. I., Remagnino, P. M. “Model-based vehicle detection and classification using orthographic approximations”, *Image Vis. Comput.*, 15(8):649-54, August, 1997.

- [94] Sullivan, G. D., Worrall, A. D., Ferryman, J. M. “Visual object recognition using deformable models of vehicles”, *Proc. Workshop on Context-Based Vision*, pp. 75-86, Cambridge, MA, USA, June, 1995.
- [95] Sullivan, G. “Visual Interpretation of known objects in constrained scenes”, *Phil. Trans. Roy. Soc. (B)*, 337: 361-370, 1992.
- [96] Sullivan, G. D. “Model-based vision for traffic scenes using the ground-plane constraint”, *Phil. Trans. Roy. Soc. (B)*, 337: 361-370, 1992.
- [97] Sun, C., Ritchie, S. G., Tsai, K. “Algorithm development for derivation of section-related measures of traffic system performance using inductive loop detectors”, *77th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Transportation Research Record Preprint, Washington, D. C., January, 1998
- [98] Sun, C., Ritchie, S. G. “Individual Vehicle Speed Estimation Using Single Loop Inductive Waveforms”, *Journal of Transportation Engineering*, pp. 531-8, 1999.
- [99] Sun, C., Ritchie, Stephen G., Tsai, K., Jayakrishnan, R. “Use of vehicle signature analysis and lexicographic optimization for vehicle reidentification on freeways”, *Transportation Research Part C*, 7:167-85, 1999.
- [100] Sun, Carlos C., Arr, Glenn S., Ramachandran, Ravi P., Ritchie, Stephen G. “Vehicle Reidentification Using Multidetector Fusion”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(3):155-64, 2004.
- [101] Waltz, E., Llinas, J. “Multisensor Data Fusion”, *Artech House*, London, 1990.
- [102] Wang, Y., Nihan, N. L. “Freeway Traffic Speed Estimation with Single Loop Outputs”, *Transportation Research Record 1727*, pp 120-6, 2000.
- [103] Wikipedia, A Enciclopédia Livre. “Service-oriented architecture”. *Link* visitado em 01 de Abril de 2008: http://pt.wikipedia.org/wiki/Service-oriented_architecture.
- [104] Wikipedia, The Free Encyclopedia. “Publish/Subscribe”. *Link* visitado em 01 de Abril de 2008: <http://en.wikipedia.org/wiki/Publish/subscribe>.

- [105] Zeng, N., Crisman, J. “Evaluation of color categorization for representing vehicle colors”, *Transportation Sensors and Controls: Collision Avoidance, Traffic Management, and ITS – SPIE Proceedings*, 2902:148-55, 1996.