

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA ÓPTICO DE CLASSIFICAÇÃO**  
**VEICULAR**

por

**ANTONIO CARLOS BURITI DA COSTA FILHO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO, D.Sc.**

Recife, Fevereiro de 2010.

© Antonio Carlos Buriti da Costa Filho, 2010

**C837s**

**Costa Filho, Antonio Carlos Buriti da**

Sistema óptico de classificação veicular / Antonio Carlos Buriti da Costa Filho. – Recife: O Autor, 2010.

xiii, 49 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui Referências Bibliográficas.

**1. Engenharia elétrica. 2. Classificação Veicular. 3. Alinhamento Temporal Dinâmico. 4. Detectores de Infravermelho. I. Título.**

**UFPE**

**621.3 CDD (22. ed.)**

**BCTG/2010-096**



**Universidade Federal de Pernambuco**

***Pós-Graduação em Engenharia Elétrica***

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

**ANTONIO CARLOS BURITI DA COSTA FILHO**

TÍTULO

**“SISTEMA ÓPTICO DE CLASSIFICAÇÃO VEICULAR”**

A comissão examinadora composta pelos professores: RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO, DES/UFPE, LEONARDO DE SOUZA MENEZES, DF/UFPE e JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO, DES/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **ANTONIO CARLOS BURITI DA COSTA FILHO** **APROVADO.**

Recife, 26 de fevereiro de 2010.

**RAFAEL DUEIRE LINS**  
Coordenador do PPGE

**RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO**  
Orientador e Membro Titular Interno

**LEONARDO DE SOUZA MENEZES**  
Membro Titular Externo

**JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO**  
Membro Titular Externo

# Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus pais,  
que sempre estão do meu lado.

## **Agradecimentos**

Torno pública minha gratidão à empresa recifense Claro Tecnologia Ltda. por ceder o equipamento que permitiu a realização deste trabalho. Quero também manifestar minha gratidão a Clayton Benevides, pelos muitos esclarecimentos acerca do equipamento.

Agradeço aos professores Renato Evangelista e João Brito pela atenção, suporte e paciência ao longo de toda a jornada do mestrado. Faço um agradecimento especial a Prof. João Brito por ceder as instalações do LATECE (Laboratório de Análise Térmica de Componentes e Equipamentos Eletroeletrônicos) para desenvolvimento dos trabalhos.

Agradeço ao pessoal da prefeitura universitária, nas pessoas de José Carlos, Luis Lopes, Teresinha, Elisângela, pelas solicitações sempre atendidas e pela simpatia e boa vontade em me atender. Agradeço também a Néelson, Reginaldo, Geraldo e aos motoristas da prefeitura e terceirizados, pela disponibilidade e apoio técnico sempre que se fazia necessário, seja para instalar ou retirar o equipamento do poste, seja para passar o ônibus, caminhão, van e outros veículos da UFPE durante os testes do sistema.

Tenho, também, que manifestar minha gratidão pelo apoio incondicional de meu pai, mãe, irmãos e namorada. Um agradecimento especial aos tios e primas de Olinda.

Aos amigos estudantes da graduação e da pós, agradeço pelo companheirismo. Um agradecimento especial a Adams Soares e Renato Ítalo, que estavam comigo levando sol e chuva durante os testes de campo. Agradeço também aos funcionários do DES por terem sido prestativos diante das minhas solicitações.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro, fundamental para minha permanência no Recife. Aproveito a oportunidade e declaro minha gratidão ao estado de Pernambuco e à UFPE pela oportunidade concedida de cursar uma pós-graduação.

Finalmente, nada seria possível sem a ajuda divina. Graças a Deus, tive saúde, paz, perseverança e paciência para ir até o fim.

Antonio Carlos Buriti da Costa Filho

Recife, 21 de maio de 2010.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”  
**Albert Einstein**

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

## **SISTEMA ÓPTICO DE CLASSIFICAÇÃO VEICULAR**

**Antonio Carlos Buriti da Costa Filho**

Fevereiro/2010

Orientador: Renato Evangelista de Araujo, D.Sc.

Área de Concentração: Eletrônica.

Palavras-chave: classificação veicular, alinhamento temporal dinâmico, detectores de infravermelho

Número de Páginas: xiii + 49.

Esse trabalho apresenta um sistema óptico para classificação de veículos em vias públicas. O sistema de classificação veicular baseia-se em um equipamento emissor e receptor de luz infravermelha. A identificação veicular é alcançada analisando as variações de intensidade, detectadas pelo sensor, da luz refletida por um veículo ao passar pela região monitorada (via pública). Os sinais elétricos, oriundos da detecção da luz refletida por diferentes automóveis, foram digitalizados e armazenados, para a construção de um banco de dados. Aplicando-se a técnica de casamento de padrões Alinhamento Temporal Dinâmico (ATD) através de um código escrito em MATLAB, foi possível identificar o tipo de um determinado veículo comparando o perfil do seu sinal de reflexão aos perfis do banco de dados criado. Os resultados dos testes de campo são mostrados e a funcionalidade do sistema de classificação é demonstrada para os veículos analisados.

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

## **OPTICAL SYSTEM FOR VEHICLE CLASSIFICATION**

**Antonio Carlos Buriti da Costa Filho**

February/2010

Supervisor: Renato Evangelista de Araujo, D.Sc.

Area of Concentration: Electronics.

Keywords: road vehicle identification, pattern matching, infrared detectors

Number of Pages: xiii + 49.

This dissertation presents an optical system for vehicle classification in public roads. The vehicle classification system is based on an infrared emitter/receiver device. Vehicle identification is performed by analyzing variations of light intensity reflected by vehicles that pass in the coverage area (public road), detected by the infrared sensor. Electrical signals, obtained from the detection of reflected light by different vehicles, were digitalized and stored to build a databank. The pattern matching technique Dynamic Time Warping is implemented in MATLAB software and it is used to identify the type of a vehicle by comparing its reflection profile to the profiles stored in a databank. The results of field tests are shown and functionality of the system is demonstrated for the analyzed vehicles.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
LISTA DE SIMBOLOGIA .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Organização da dissertação .....	2
2. TECNOLOGIAS DE GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO.....	3
2.1. Instalação no próprio pavimento .....	3
2.1.1. Tubo pneumático .....	3
2.1.2. Laço indutivo .....	4
2.1.3. Sensor magnético.....	5
2.2. Instalação acima do pavimento.....	7
2.2.1. Radar de microondas .....	7
2.2.2. Ultra-som .....	11
2.2.3. Processamento de imagens de vídeo .....	11
2.2.4. Sensores infravermelhos.....	12
3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO ÓPTICO .....	16
3.1. Introdução .....	16
3.2. Emissor .....	16
3.2.1. Determinação da zona de cobertura.....	17
3.2.2. Circuito eletrônico .....	18
3.3. Receptor.....	19
3.3.1. Fotodiodo e amplificador .....	19
3.3.2. Filtro passa-faixa .....	20
3.3.3. Detector de envoltória .....	20
4. ALINHAMENTO TEMPORAL DINÂMICO.....	22
4.1. Definições .....	22
4.2. Informações gerais.....	23
4.3. Cálculo da distância ATD.....	24
4.3.1. Formulação do problema do alinhamento temporal .....	24
4.3.2. Programação dinâmica .....	25
4.4. Algoritmo de implantação da técnica ATD.....	27
5. RESULTADOS .....	29
5.1. Montagem experimental .....	29
5.2. Perfis veiculares obtidos experimentalmente .....	31
5.3. Resultados da aplicação do algoritmo ATD sobre os perfis.....	37
5.4. Considerações sobre os resultados obtidos.....	44
6. CONCLUSÃO.....	45
6.1. Trabalhos futuros .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1. Tubo pneumático instalado em uma via. O gravador é posicionado na margem. ....	4
Figura 2.2. Laços indutivos retangulares instalados em rodovia. As duas unidades instaladas em cada faixa de rolamento possibilitam a medição de velocidade e contagem de veículos. Uma única unidade possibilitaria apenas contagem. ....	5
Figura 2.3. Magnetômetros de fluxo saturado modelos (a) Groundhog G-8, da Quixote Transportation Technologies e (b) VSN240-T, da Sensys Networks. ....	6
Figura 2.4. (a) Detector magnético em forma de haste e sua correspondente (b) unidade eletrônica. ....	7
Figura 2.5. Ângulos para cálculo da velocidade do veículo quando o radar Doppler está instalado em um poste. ....	8
Figura 2.6. Radar Doppler de 24 GHz da série MW 330, da empresa belgo-australiana Xtralis. ....	9
Figura 2.7. Detector de presença veicular modelo Accuwave 150LX, da empresa canadense Fortran Traffic Systems Limited. O aparelho contém um radar de microondas de onda contínua modulada em frequência, operando em 10,525 GHz (banda X). ....	9
Figura 2.8. Relações frequência-tempo no radar de onda contínua modulada em frequência quando o sinal refletido é deslocado em frequência pelo efeito Doppler (veículo em movimento). (a) Frequências do sinal emitido (linha contínua) e do sinal refletido (linha tracejada). (b) Frequência de batimento referente aos sinais mostrados em (a). ....	10
Figura 2.9. Relações frequência-tempo no radar de onda contínua modulada em frequência quando o sinal refletido não é deslocado em frequência pelo efeito Doppler (veículo parado). (a) Frequências do sinal emitido (linha contínua) e do sinal refletido (linha tracejada). (b) Frequência de batimento referente aos sinais mostrados em (a). ....	10
Figura 2.10. Sensor ultra-sônico de onda contínua, produzido pela empresa japonesa Sumitomo Electric. No lado esquerdo, os transdutores de transmissão e de recepção de ondas ultra-sônicas. ....	11
Figura 2.11. PIV da empresa estadunidense Econolite. As imagens da câmera e os parâmetros de tráfego são obtidos através de uma interface Ethernet. (a) Câmera do sistema e a correspondente (b) unidade eletrônica de processamento. ....	12
Figura 2.12. Sensores infravermelhos passivos: (a) Modelo 842, da empresa estadunidense Eltec Instruments, usado para detecção de presença veicular. (b) Modelo ASIM IR 250, da empresa belgo-australiana Xtralis. Contém vários sensores, que mapeiam diferentes áreas de cobertura. É usado para detecção de presença veicular, medição de velocidade e classificação veicular por comprimento. (c) Distribuição das áreas de cobertura para equipamentos de vários sensores. ....	13
Figura 2.13. (a) Veículo atravessando dois feixes planos de luz infravermelha. A velocidade é calculada através da relação entre a distância entre os feixes e o tempo que o veículo leva para percorrer essa distância. (b) Equipamento com tecnologia infravermelho ativo, com espelho girante, modelo Autosense 600, da empresa estadunidense OSI LaserScan. ....	14
Figura 2.14. Equipamento com tecnologia infravermelho ativo, sem espelho girante, modelo AE TOM 3000, da empresa austríaca Efkon. ....	15
Figura 2.15. Diodos laser instalados perpendicularmente ao fluxo de veículos. Nessa posição, pode-se determinar o número de eixos dos veículos. ....	15
Figura 3.1. Equipamento óptico da Claro Tecnologia Ltda. ....	16
Figura 3.2. Medição experimental do pico de emissão do LED infravermelho BIR-BM13J7M. ....	17

Figura 3.3. Arranjo dos LEDs em forma de triângulo equilátero.....	17
Figura 3.4. Diagrama de blocos do emissor. ....	18
Figura 3.5. Sinal de ativação (modulação) dos LEDs, gerado pelo microcontrolador.....	18
Figura 3.6. Diagrama de blocos do receptor. ....	19
Figura 3.7. Sensibilidade espectral normalizada do fotodiodo BPW34F.....	19
Figura 3.8. Sinais de ativação dos LEDs (sinal 1) e de fechamento da chave (sinal 2). ....	20
Figura 4.1. Alinhamento temporal entre duas séries temporais. Cada segmento de reta faz parte do warp path correspondente a essas séries. ....	23
Figura 4.2. Alinhamento entre duas seqüências usando a técnica ATD. ....	23
Figura 4.3. Matriz de custo $M \times N$ referente às séries temporais X e Y, de dimensões M e N, respectivamente.....	26
Figura 4.4. (a) Alinhamentos temporais realizados nas séries temporais S e Q. (b) Warp path ótimo para as séries S e Q, representado pelos elementos $w_1, w_2, \dots, w_{10}$ . ....	27
Figura 5.1. Equipamento óptico (detalhe circular) instalado em um poste de iluminação pública..	29
Figura 5.2. Dimensões da zona de cobertura do equipamento óptico.....	30
Figura 5.3. Sistema de aquisição e armazenamento posicionado em campo de teste. ....	30
Figura 5.4. (a) Tela obtida pelo osciloscópio representando o perfil de um microônibus. (b) O microônibus usado no experimento.....	31
Figura 5.5. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Uno). ....	32
Figura 5.6. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Uno). ....	32
Figura 5.7. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Toyota Corolla). ....	33
Figura 5.8. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Ford Fiesta). ....	33
Figura 5.9. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Siena). ....	34
Figura 5.10. Perfis de caminhão baú nas velocidades 20 e 60 km/h. ....	34
Figura 5.11. Perfis de ônibus nas velocidades 20 e 40 km/h.....	35
Figura 5.12. Perfis de microônibus nas velocidades 20, 40 e 60 km/h. ....	35
Figura 5.13. Perfis de camionete nas velocidades 20, 40 e 50 km/h. ....	36
Figura 5.14. Perfis de van nas velocidades 20 e 40 km/h. ....	36
Figura 5.15. (a) Perfil com nível de zero não-nulo (aproximadamente 0,4 volt). (b) O mesmo perfil mostrado em (a), porém com o nível de zero nulo. ....	37
Figura 5.16. (a) Perfil não-normalizado do veículo Fiat Uno. (b) Perfil normalizado, que tem o mesmo formato do perfil não-normalizado. ....	42

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 4.1. Pseudocódigo do algoritmo ATD.....	28
Tabela 5.1. Distâncias ATD para perfis normalizados.....	38
Tabela 5.2. Taxas de acerto para cada tipo de veículo. ....	43
Tabela 5.3. Taxas de acerto referentes às comparações entre os diversos tipos de veículos. ....	43
Tabela 5.4. Distâncias ATD entre os perfis do tipo caminhão baú (reprodução parcial da Tabela 5.1). ....	44

# LISTA DE ABREVIATURAS

---

ATD	Alinhamento Temporal Dinâmico
CSV	Comma-Separated Values
DTW	Dynamic Time Warping
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PIV	Processador de Imagem de Vídeo
UNOA2	Fiat Uno da Figura 5.5 a 20 km/h
UNOA4	Fiat Uno da Figura 5.5 a 40 km/h
UNOA6	Fiat Uno da Figura 5.5 a 60 km/h
UNOB2	Fiat Uno da Figura 5.6 a 20 km/h
UNOB4	Fiat Uno da Figura 5.6 a 40 km/h
UNOB6	Fiat Uno da Figura 5.6 a 60 km/h
COR2	Toyota Corolla a 20 km/h
COR4	Toyota Corolla a 40 km/h
COR6	Toyota Corolla a 60 km/h
FIE2	Ford Fiesta a 20 km/h
FIE4	Ford Fiesta a 40 km/h
FIE6	Ford Fiesta a 60 km/h
SIE2	Fiat Siena a 20 km/h
SIE4	Fiat Siena a 40 km/h
SIE6	Fiat Siena a 60 km/h
CAM2	Camionete a 20 km/h
CAM4	Camionete a 40 km/h
CAM6	Camionete a 60 km/h
MIC2a	Microônibus a 20 km/h (primeira amostra)
MIC2b	Microônibus a 20 km/h (segunda amostra)
MIC2c	Microônibus a 20 km/h (terceira amostra)
MIC4a	Microônibus a 40 km/h (primeira amostra)
MIC4b	Microônibus a 40 km/h (segunda amostra)
MIC4c	Microônibus a 40 km/h (terceira amostra)
MIC6a	Microônibus a 60 km/h (primeira amostra)
MIC6b	Microônibus a 60 km/h (segunda amostra)
ONI2	Ônibus a 20 km/h
ONI4a	Ônibus a 40 km/h (primeira amostra)
ONI4b	Ônibus a 40 km/h (segunda amostra)
ONI5a	Ônibus a 50 km/h (primeira amostra)
ONI5b	Ônibus a 50 km/h (segunda amostra)
VAN2	Van a 20 km/h
VAN4a	Van a 40 km/h (primeira amostra)
VAN4b	Van a 40 km/h (segunda amostra)
VAN4c	Van a 40 km/h (terceira amostra)
VAN6a	Van a 60 km/h (primeira amostra)
VAN6b	Van a 60 km/h (segunda amostra)
VAN6c	Van a 60 km/h (terceira amostra)
BAU2	Caminhão baú a 20 km/h
BAU6a	Caminhão baú a 60 km/h (primeira amostra)
BAU6b	Caminhão baú a 60 km/h (segunda amostra)
BAU6c	Caminhão baú a 60 km/h (terceira amostra)

# LISTA DE SIMBOLOGIA

---

GHz	gigahertz
kHz	kilohertz
km/h	quilômetros por hora
m	metro
nm	nanometro
s	segundo
μm	micrometro
μs	microsegundo
V	volt

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1. Motivação

Garantir um fluxo veicular regular nas áreas urbanas e rodovias é uma tarefa que exige um bom conhecimento das condições de tráfego. Isso significa conhecer diversos parâmetros de tráfego, tais como: tipos de veículos, quantidade e velocidade de veículos, distância entre dois veículos consecutivos, entre outros. De posse das condições de tráfego, as companhias de gerenciamento de trânsito podem fazer um melhor planejamento de suas atividades, incluindo expansão/alteração da malha viária, desvio/restrrição de circulação de certos tipos de veículos em função do horário, etc.

Atualmente no Brasil não há oferta de tecnologias que possibilitem a verificação de todos esses parâmetros de tráfego. Usualmente, medem-se apenas velocidade e número de veículos. Diante dessa carência no mercado brasileiro, torna-se interessante ampliar a oferta de tecnologias para gerenciamento de tráfego. Uma das opções é oferecer um sistema de classificação veicular que identifique o tipo do veículo.

Várias tecnologias estão disponíveis no mercado mundial para classificação veicular baseadas no uso de diversos sensores: tubos pneumáticos, laços indutivos, sensores magnéticos, câmeras de vídeo, laser infravermelho, radar de microondas e sensores ultra-sônicos. Foi comentado (URAZGHILDIEV, RAGNARSSON *et al.*, 2007) que não existe uma solução ótima para todas as aplicações possíveis, uma vez que as necessidades dos usuários e condições de classificação podem variar. Portanto, novas técnicas de classificação que possuam vantagens específicas podem ser de grande interesse.

## 1.2. Objetivos

Com o objetivo de atender à carência do mercado brasileiro, conforme comentado na seção 1.1, este trabalho propõe a implantação de um sistema de classificação veicular, usando para isso tecnologia óptica. Pode-se classificar veículos adotando-se diversos critérios, como, por exemplo, altura, comprimento, número de eixos, peso, entre outras. Neste trabalho, será feita a classificação por tipo, ou seja, o veículo será enquadrado em um dos seguintes grupos: carro de passeio, camionete, van, ônibus ou caminhão. A idéia principal do sistema é obter o perfil de veículos e

classificá-los através de comparações entre o perfil obtido e perfis armazenados em um banco de dados pré-construído. As comparações serão realizadas com a técnica Alinhamento Temporal Dinâmico (do inglês *Dynamic Time Warping*), que verifica o grau de semelhança entre duas seqüências de dados. Neste trabalho, os perfis veiculares são seqüências de dados.

### **1.3. Organização da dissertação**

No capítulo 2, são apresentadas diversas tecnologias atualmente disponíveis para gerenciamento de tráfego. Detalhes do equipamento óptico são mostrados no capítulo 3. Em seguida, no capítulo 4, é feita uma descrição da técnica Alinhamento Temporal Dinâmico, bem como o algoritmo que implanta esta técnica. No capítulo 5, são fornecidas informações sobre a montagem experimental, bem como os resultados dos experimentos e as discussões correspondentes. Finalmente, no capítulo 6, as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

## **2. TECNOLOGIAS DE GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO**

---

De acordo com MIMBELA e KLEIN (2007), as tecnologias voltadas para o gerenciamento de trânsito veicular contêm, em geral, três partes principais: o sensor, o dispositivo de processamento de sinal e o dispositivo de processamento de dados. O sensor detecta a passagem ou presença de um veículo. O dispositivo de processamento de sinal converte a saída do sensor em sinal elétrico. O dispositivo de processamento de dados, normalmente um computador, é responsável por converter este sinal elétrico em parâmetros de tráfego.

Cada tecnologia tem seus prós e contras em termos de desempenho, facilidade de instalação do sensor, quantidade de parâmetros que pode ser avaliada, e custos de instalação e manutenção. Por isso, o comprador da tecnologia deve levar em conta todos estes fatores, a fim de adquirir a melhor solução para seu caso.

As tecnologias empregadas no gerenciamento de trânsito podem ser classificadas em dois grupos, conforme a instalação dos sensores seja feita no próprio pavimento ou acima dele.

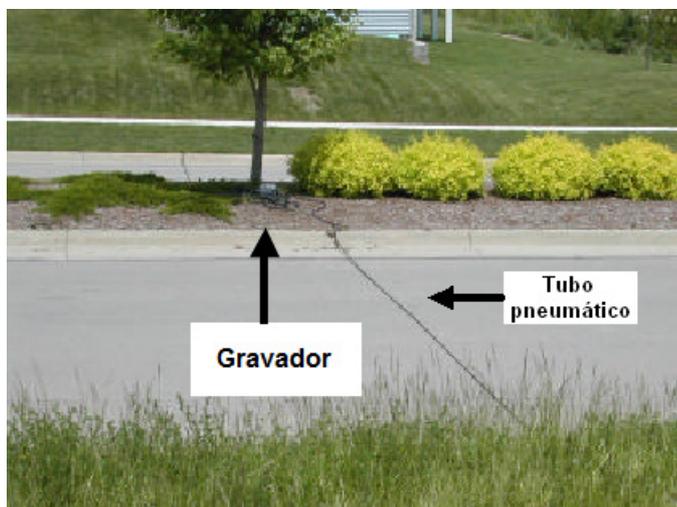
### **2.1. Instalação no próprio pavimento**

Nesta categoria, enquadram-se as tecnologias que usam os seguintes sensores: tubos pneumáticos, laços indutivos e os sensores magnéticos. Estas tecnologias permitem a contagem e a detecção de presença de veículos com apenas uma unidade instalada no pavimento; para medição de velocidade, são necessárias duas ou mais unidades. Todos os sensores caracterizam-se por serem instalados em cortes feitos no pavimento, o que requer a interdição da via durante a instalação. Isto representa uma desvantagem.

#### **2.1.1. *Tubo pneumático***

Os tubos pneumáticos são instalados na superfície do pavimento, em uma direção perpendicular ao fluxo de veículos. Quando os pneus de um veículo passam sobre o tubo, o ar presente no interior do tubo é empurrado para fora, provocando a movimentação de uma membrana situada em uma das extremidades do tubo. Uma chave elétrica acoplada à membrana é engatada, provocando o fechamento de um contato elétrico. Como a chave é ligada a uma bateria, é gerado um pulso elétrico, correspondente à passagem do veículo. Todos os pulsos são registrados em um

gravador, colocado na margem da via (Figura 2.1). Através de software fornecido pelo fabricante, os dados podem ser transferidos do gravador para um computador.



*Figura 2.1. Tubo pneumático instalado em uma via. O gravador é posicionado na margem.  
Fonte: (SMITH, 2002)*

As aplicações usuais dos tubos pneumáticos são contagem de tráfego e classificação veicular por número de eixos. Também podem ser usados para medição de velocidade; neste caso, são necessárias duas unidades instaladas próximas uma da outra. As vantagens dessa tecnologia são a facilidade de instalação e o baixo custo de aquisição e manutenção. Por outro lado, como desvantagens, os tubos pneumáticos podem ser danificados por pneus de veículos pesados e são alvo fácil de atos de vandalismo. Devido a este último motivo, os tubos pneumáticos são usados, geralmente, em aplicações de aquisição temporária de dados (períodos de até vinte e quatro horas).

### **2.1.2. Laço indutivo**

Laços indutivos correspondem a espiras com algumas voltas de fio de cobre isolado, sendo instalados em sulcos – em forma de quadrado ou retângulo – feitos no pavimento (Figura 2.2). Uma central eletrônica de processamento localizada na margem da via é conectada aos laços e faz o registro dos dados de tráfego.

Os laços são submetidos a uma fonte de corrente alternada em uma determinada frequência, usualmente entre 40 kHz e 120 kHz (REIJMERS, 2006). Durante a passagem de um veículo sobre os laços, a permeabilidade magnética em torno dos laços é alterada, devido à presença do material ferromagnético contido no veículo. A consequência dessa alteração é a modificação da indutância observada pela fonte, já que a indutância do laço depende do material percorrido pelas linhas de fluxo magnético – neste caso, o material ferromagnético. Em outras palavras, ocorre modificação

da reatância observada pela fonte. Desta maneira, o momento da passagem de um veículo sobre o laço pode ser conhecida detectando-se uma alteração no ângulo da impedância. Na prática, isso pode ser feito, simplesmente, medindo-se a defasagem entre tensão e corrente.



*Figura 2.2. Laços indutivos retangulares instalados em rodovia. As duas unidades instaladas em cada faixa de rolamento possibilitam a medição de velocidade e contagem de veículos. Uma única unidade possibilitaria apenas contagem.*  
*Fonte: (REIJMERS, 2006)*

Essa é a tecnologia mais usada para aplicações de gerenciamento de tráfego veicular. Isso pode ser explicado, possivelmente, pelo fato de apresentar o menor custo entre todas as tecnologias disponíveis. Os laços indutivos são instalados de forma permanente para contagem de tráfego e medição de velocidade. Neste último caso, duas unidades devem ser instaladas próximas uma da outra na mesma faixa de rolamento. Como desvantagens, os laços sofrem desgaste por causa do estresse mecânico provocado pela passagem dos veículos – o que significa troca periódica dos indutores instalados no chão – e requerem interrupção da via para sua instalação.

### **2.1.3. Sensor magnético**

O princípio de funcionamento do sensor magnético é baseado na detecção de alterações de campo magnético durante a passagem de um veículo sobre o sensor. Como os veículos contêm materiais ferromagnéticos em sua estrutura, os dipolos magnéticos intrínsecos destes materiais interagem com o campo magnético da Terra, de maneira que a passagem de um veículo modifica o campo magnético resultante.

Há dois tipos de sensores magnéticos: os magnetômetros de fluxo saturado (do inglês, *fluxgate magnetometer*) e os detectores magnéticos, também conhecidos por magnetômetros de bobina de indução (do inglês, *induction magnetometer* ou *search coil magnetometer*). Em ambos os casos, os sensores são enterrados no pavimento a uma profundidade que varia entre 6,5 cm e 61

cm. As aplicações mais comuns de sensores magnéticos são contagem de tráfego, medição da distância entre veículos consecutivos e determinação do sentido do deslocamento. Classificação veicular por comprimento também é possível, desde que sejam instaladas na mesma faixa de rolamento, pelo menos, duas unidades próximas entre si.

### Magnetômetro de fluxo saturado

Os magnetômetros de fluxo saturado identificam veículos parados e em movimento. Sua estrutura interna contém um núcleo de ferro doce de alta permeabilidade magnética envolvido por um enrolamento primário – conectado a uma fonte de sinal alternado – e dois enrolamentos secundários. Durante a passagem de um veículo sobre o sensor, surge uma tensão no enrolamento secundário que é medida por um circuito eletrônico. Se o valor dessa tensão superar um limiar pré-definido, significa que houve a passagem de um veículo. Exemplos desse tipo de sensor magnético são mostrados na Figura 2.3.



Figura 2.3. Magnetômetros de fluxo saturado modelos (a) Groundhog G-8, da Quixote Transportation Technologies e (b) VSN240-T, da Sensys Networks.

Fonte: <http://www.qttinc.com> e <http://www.sensysnetworks.com>

### Detector magnético

Os detectores magnéticos identificam, normalmente, apenas veículos em movimento. Isso é feito detectando-se mudanças nas linhas de fluxo magnético provocadas pela passagem de um veículo. Esses dispositivos contêm um único enrolamento em torno de um núcleo em forma de haste, constituído de material magneticamente permeável. Quando um veículo passa sobre os detectores magnéticos, uma tensão surge nos terminais do enrolamento. A unidade eletrônica mede o valor dessa tensão e decide sobre a validade da passagem do veículo. A maior parte dos detectores magnéticos não é capaz de identificar veículos parados ou lentos, isto é, com velocidade inferior a 8 km/h. Um exemplo de detector magnético é mostrado na Figura 2.4.

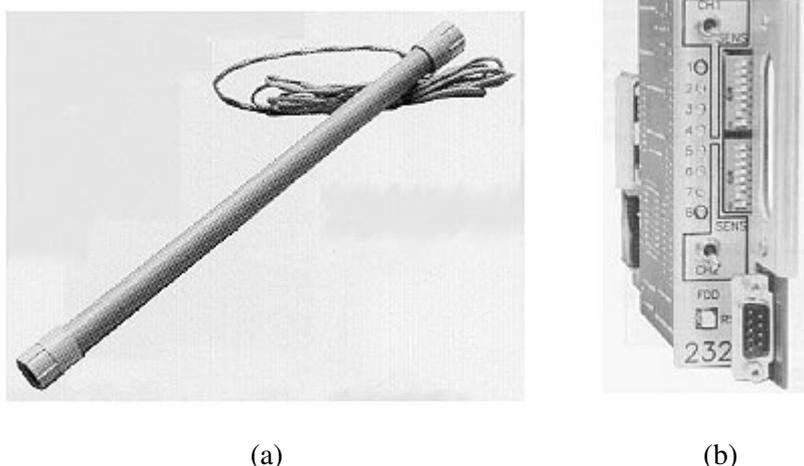


Figura 2.4. (a) Detector magnético em forma de haste e sua correspondente (b) unidade eletrônica.  
 Fonte: (KLEIN, MILLS et al., 2006)

## 2.2. Instalação acima do pavimento

Nesta categoria, encaixam-se o radar de microondas, infravermelho passivo, infravermelho ativo, ultra-som e processamento de imagens de vídeo. Os sensores são colocados a uma certa altura em relação ao pavimento, no meio ou às margens da faixa de rolamento, em um ângulo reto ou oblíquo em relação ao fluxo de veículos. Estas tecnologias realizam medição de velocidade, classificação de veículos, contagem, detecção de presença de veículos e podem prover, com apenas uma unidade instalada, cobertura em mais de uma faixa de rolamento.

### 2.2.1. Radar de microondas

Os radares de microondas recebem essa denominação porque emitem ondas eletromagnéticas, normalmente, na faixa de microondas, isto é, entre 1 GHz e 30 GHz. Para tanto, uma antena é usada para emitir ondas eletromagnéticas em direção aos veículos. Os radares de microondas apresentam algumas vantagens: são pouco sensíveis às condições meteorológicas, realizam medições diretas da velocidade de veículos e permitem cobertura de várias faixas de rolamento com apenas uma unidade. Como desvantagens, há necessidade de ajustar a largura do feixe e a forma de onda de acordo com a aplicação. Há dois tipos de radar de microondas: radar de onda pulsada e de onda contínua. Este último compreende uma versão não-modulada e outra com frequência modulada, conforme descrito a seguir.

### Radar de microondas de onda contínua não-modulada (radar Doppler)

O radar de onda contínua não-modulada, também chamado de radar Doppler, é usado em aplicações de medição de velocidade. Seu funcionamento consiste na transmissão contínua, através de uma antena, de ondas eletromagnéticas em uma frequência constante. Quando um veículo é atingido pelas ondas, parte delas é refletida de volta para a antena. Um circuito receptor acoplado à antena faz a detecção das ondas refletidas. Se o veículo estiver em movimento, ocorrerá o efeito Doppler, ou seja, haverá diferença entre a frequência das ondas emitidas e a das ondas refletidas. Desta forma, a velocidade do veículo  $v$  pode ser calculada em função da diferença entre as frequências através das expressões

$$v = \frac{v_R}{\cos \theta \cos \varphi} \quad (2.1)$$

e

$$v_R = \frac{c}{2} \frac{f_R - f_E}{f_E}, \quad (2.2)$$

onde  $v_R$  é a componente da velocidade do veículo na direção da antena,  $c$  é a velocidade da luz,  $f_E$  é a frequência das ondas emitidas e  $f_R$  é a frequência das ondas refletidas (SKOLNIK, 1962). A variável  $\theta$  é o ângulo entre o chão e a direção das ondas emitidas e  $\varphi$  é o ângulo entre a direção de deslocamento do veículo e a linha que une o veículo à base do poste onde está instalado o radar. A expressão (2.1) foi determinada através de decomposição vetorial (ver Figura 2.5). Se  $v_R$  for positivo, significa que o veículo está se aproximando da antena; se for negativo, está se afastando. Desta forma, radares Doppler podem determinar a direção de deslocamento de veículos. Um exemplo de radar Doppler comercial é mostrado na Figura 2.6.

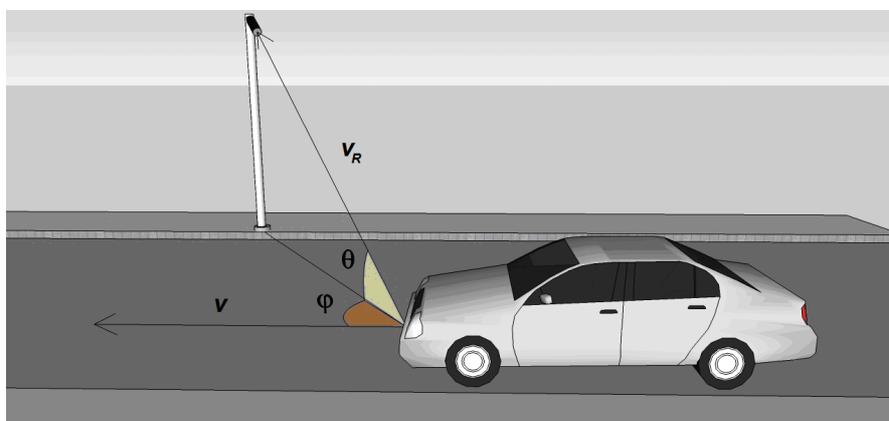


Figura 2.5. Ângulos para cálculo da velocidade do veículo quando o radar Doppler está instalado em um poste.



*Figura 2.6. Radar Doppler de 24 GHz da série MW 330, da empresa belgo-australiana Xtralis.  
Fonte: <http://xtralis.com>*

### **Radar de microondas de onda contínua modulada em frequência**

Aplicando-se modulação em frequência no radar de onda contínua, pode-se medir velocidade e realizar a detecção de presença de veículos. Um exemplo desse radar é mostrado na Figura 2.7.



*Figura 2.7. Detector de presença veicular modelo Accuwave 150LX, da empresa canadense Fortran Traffic Systems Limited. O aparelho contém um radar de microondas de onda contínua modulada em frequência, operando em 10,525 GHz (banda X).  
Fonte: <http://www.fortrantraffic.com>*

Sinais periódicos (senoidal, triangular, dente-de-serra e outros) fazem o papel do sinal modulante. Tomando como exemplo uma modulante triangular, as frequências dos sinais emitidos e refletidos têm o comportamento mostrado na Figura 2.8a. Observa-se um deslocamento da frequência central  $f_0$  devido à ocorrência do efeito Doppler. Observa-se, também, uma defasagem temporal provocada pelo tempo de propagação de ida e volta das ondas. Na Figura 2.8b, são mostradas as frequências de batimento ( $f_1$  e  $f_2$ ) entre os sinais mostrados na Figura 2.8a.

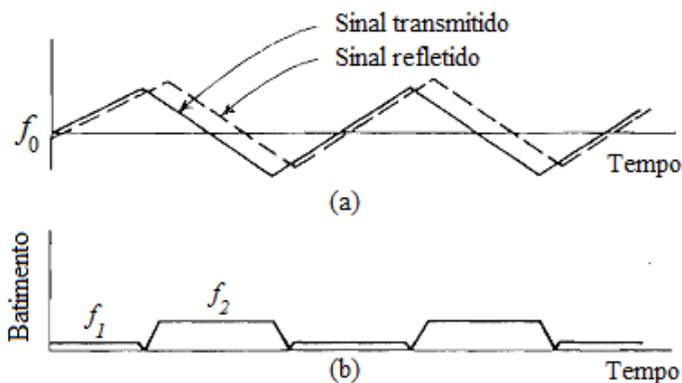


Figura 2.8. Relações frequência-tempo no radar de onda contínua modulada em frequência quando o sinal refletido é deslocado em frequência pelo efeito Doppler (veículo em movimento). (a) Frequências do sinal emitido (linha contínua) e do sinal refletido (linha tracejada). (b) Frequência de batimento referente aos sinais mostrados em (a).

Fonte: (SKOLNIK, 1962)

A velocidade radial do veículo em relação ao radar ( $v_R$ ), ou seja, a componente da velocidade do veículo na direção do radar, pode ser calculada em função dessa diferença (SKOLNIK, 1962), através da expressão

$$v_R = \frac{c}{2} \frac{f_2 - f_1}{f_0}. \quad (2.3)$$

No caso de um veículo parado, as relações frequência-tempo são mostradas na Figura 2.9. Neste caso, como a velocidade do veículo é nula, não há deslocamento de frequência devido ao efeito Doppler. Em outras palavras, a frequência de batimento é constante. Logo, a presença de um veículo pode ser detectada através da ocorrência de um valor constante (e não-nulo) da frequência de batimento.

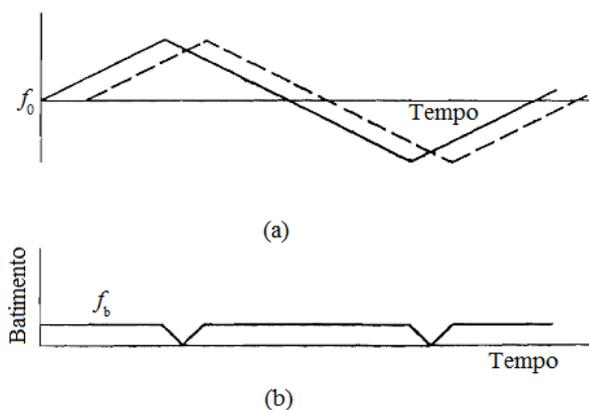


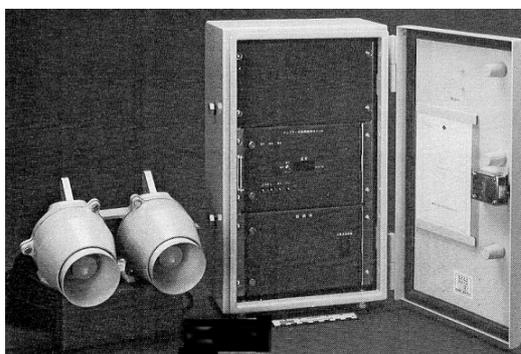
Figura 2.9. Relações frequência-tempo no radar de onda contínua modulada em frequência quando o sinal refletido não é deslocado em frequência pelo efeito Doppler (veículo parado). (a) Frequências do sinal emitido (linha contínua) e do sinal refletido (linha tracejada). (b) Frequência de batimento referente aos sinais mostrados em (a).

Fonte: (SKOLNIK, 1962)

### 2.2.2. *Ultra-som*

Os usos comuns dessa tecnologia incluem detecção de presença e contagem veicular; medição de velocidade é possível quando há emissão de, pelo menos, dois feixes de ondas ultra-sônicas na direção dos veículos. Uma desvantagem dessa tecnologia é a sensibilidade a turbulências e alterações de temperatura do ar. Porém, apresentam a vantagem da facilidade de instalação e modelos que cobrem mais de uma faixa de rolamento.

Nesta tecnologia, ondas de pressão (som) são transmitidas na direção dos veículos em frequências entre 25 kHz e 50 kHz, ou seja, em uma faixa de frequência acima da audível pelo ouvido humano. Assim como no caso de radares de microondas, sensores ultra-sônicos podem operar com onda contínua ou pulsada. O primeiro caso é usado em equipamentos que identificam as variações de frequência (efeito Doppler) entre as ondas emitidas e refletidas, com a finalidade de medir a velocidade de veículos (Figura 2.10). No segundo caso, as ondas são transmitidas em forma de pulsos na direção dos veículos, e, ao tocar a superfície dos mesmos, parte das ondas é refletida de volta para o equipamento emissor. Na ausência de um veículo, as ondas são refletidas pelo chão, o que provoca uma alteração no tempo de ida e volta das ondas. Através dessa diferença, o circuito eletrônico do sistema consegue identificar a presença ou não de um veículo na área de cobertura do equipamento.



*Figura 2.10. Sensor ultra-sônico de onda contínua, produzido pela empresa japonesa Sumitomo Electric. No lado esquerdo, os transdutores de transmissão e de recepção de ondas ultra-sônicas.*

*Fonte: (KLEIN, MILLS et al., 2006)*

### 2.2.3. *Processamento de imagens de vídeo*

Trata-se de uma das tecnologias mais abrangentes, pois possibilita a determinação de todos os parâmetros de tráfego; porém, é a tecnologia mais cara. Esta tecnologia se baseia no uso de câmeras de vídeo para determinação dos parâmetros de tráfego. As câmeras são acopladas a computadores, que realizam o processamento das imagens através de programas específicos. Esse

conjunto câmera-computador-programa é conhecido por processador de imagem de vídeo (PIV). Alguns modelos de PIV são capazes de monitorar até quatro faixas de rolamento simultaneamente. Em geral, a altura em que a câmera é instalada tem influência sobre o desempenho. Os melhores resultados são obtidos em alturas elevadas (MICHALOPOULOS *et al.*, 1993). Condições adversas tais como chuva, neblina, neve, granizo, fumaça e poeira podem prejudicar seu funcionamento. Vibração da câmera – seja pela ação do vento ou pela passagem dos veículos – é outro problema enfrentado. Um exemplo de PIV é mostrado na Figura 2.11.



Figura 2.11. PIV da empresa estadunidense Econolite. As imagens da câmera e os parâmetros de tráfego são obtidos através de uma interface Ethernet. (a) Câmera do sistema e a correspondente (b) unidade eletrônica de processamento.

Fonte: <http://www.econolite.com>

#### 2.2.4. Sensores infravermelhos

Sensores infravermelhos são usados em aplicações de gerenciamento de tráfego quando se deseja detectar a presença, medir velocidade e classificar veículos. São instalados no meio ou na extremidade do pavimento, em uma altura superior à dos veículos. Os sensores recebem a luz infravermelha oriunda dos veículos e a converte em sinais elétricos, que são processados a fim de se obter os dados de tráfego. Há duas formas de usar sensores infravermelhos: infravermelho ativo e infravermelho passivo.

##### **Infravermelho passivo**

Essa tecnologia consiste de sensores passivos operando na faixa do infravermelho. Sua operação baseia-se no princípio de que qualquer objeto com temperatura superior ao zero absoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) emite radiação infravermelha. Desta forma, um sensor passivo deve perceber a

passagem de um veículo em sua área de cobertura. Fogo, fumaça, poeira e condições meteorológicas, tais como neblina, chuva, granizo e neve, também podem afetar a operação dos sensores. Porém, esses efeitos podem ser desprezados quando a distância entre os sensores e os veículos é pequena.

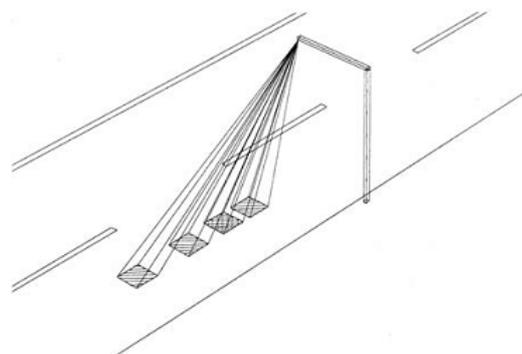
Sensores passivos são usados em aplicações de detecção de presença veicular, medição de velocidade e classificação veicular. Alguns modelos comerciais são mostrados nas Figuras 2.12a e 2.12b. A medição de velocidade é realizada em equipamentos que possuem mais de um sensor, cada qual cobrindo áreas distintas e distanciadas umas das outras (Figura 2.12c). Como as distâncias são fixas e previamente conhecidas, basta medir o tempo que o veículo leva para cruzar as áreas; a velocidade é obtida através da relação entre distância percorrida e o tempo decorrido.



(a)



(b)



(c)

*Figura 2.12. Sensores infravermelhos passivos: (a) Modelo 842, da empresa estadunidense Eltec Instruments, usado para detecção de presença veicular. (b) Modelo ASIM IR 250, da empresa belgo-australiana Xtralis. Contém vários sensores, que mapeiam diferentes áreas de cobertura. É usado para detecção de presença veicular, medição de velocidade e classificação veicular por comprimento. (c)*

*Distribuição das áreas de cobertura para equipamentos de vários sensores.*

*Fonte: <http://eltecinstruments.com>, <http://xtralis.com> e (KLEIN, MILLS et al., 2006)*

## Infravermelho ativo

Nessa tecnologia, são usados diodos laser que emitem luz na faixa do infravermelho. A luz é emitida na direção dos veículos e parte é refletida de volta, sendo detectada por sensores instalados no mesmo invólucro que os diodos. Os diodos laser podem operar acima ou ao lado do pavimento.

No caso em que os diodos são instalados acima do pavimento, a direção de propagação da luz emitida por um único conjunto de diodos laser é desviada, através de espelhos girantes, de tal maneira a formar feixes planos de luz, em um ângulo de abertura suficiente para cobrir a faixa de rolamento sob monitoramento (Figura 2.13a). Um exemplo de equipamento que usa espelhos girantes é mostrado na Figura 2.13b.

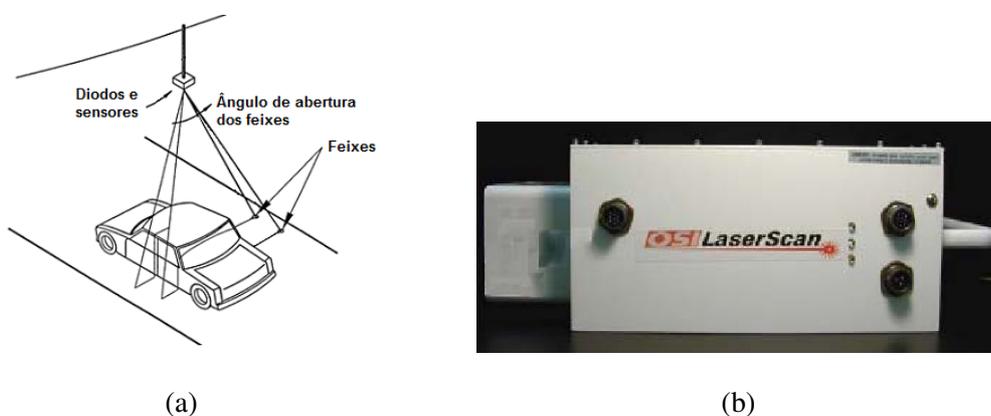


Figura 2.13. (a) Veículo atravessando dois feixes planos de luz infravermelha. A velocidade é calculada através da relação entre a distância entre os feixes e o tempo que o veículo leva para percorrer essa distância. (b) Equipamento com tecnologia infravermelho ativo, com espelho girante, modelo Autosense 600, da empresa estadunidense OSI LaserScan.

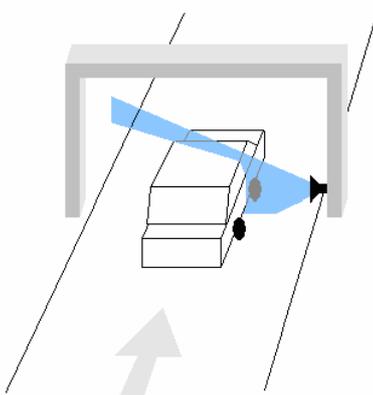
Fonte: (KLEIN, MILLS et al., 2006) e <http://www.osi-ls.com>

Há equipamentos que utilizam vários conjuntos de diodos laser para produzir feixes independentes, em vez de espelhos girantes. Para medição de velocidade, são necessários, no mínimo, dois feixes. A velocidade é calculada medindo-se o tempo necessário para o veículo percorrer a distância entre o primeiro e o segundo feixes. Como a distância entre os feixes é constante e conhecida, a velocidade do veículo no trecho é obtida a partir da relação entre distância e tempo decorrido. A detecção da passagem de um veículo pelos feixes de luz é realizada através de sensores infravermelhos que capturam a luz infravermelha refletida pelos veículos. Um exemplo de equipamento que utiliza esse princípio de funcionamento é mostrado na Figura 2.14. A principal desvantagem do infravermelho ativo é a sensibilidade às condições climáticas, ou seja, pode ser afetado por neblina, chuva, granizo e neve, além de fumaça e poeira.



*Figura 2.14. Equipamento com tecnologia infravermelho ativo, sem espelho girante, modelo AE TOM 3000, da empresa austríaca Efkon.  
Fonte: <http://www.efkon.com>*

No caso em que os diodos são instalados ao lado do pavimento e emitem luz perpendicularmente à direção de deslocamento dos veículos, é possível realizar classificação veicular por número de eixos (ver Figura 2.15).



*Figura 2.15. Diodos laser instalados perpendicularmente ao fluxo de veículos. Nessa posição, pode-se determinar o número de eixos dos veículos.  
Fonte: Tecsidel Detection and Classification Systems (<http://www.tecsidel.es>)*

O equipamento óptico usado neste trabalho está incluído no grupo das tecnologias que usam sensor infravermelho ativo. Porém, ao invés de diodos a laser, usa LEDs comuns na faixa do infravermelho. A descrição por partes de seu funcionamento é apresentada no próximo capítulo.

## **3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO ÓPTICO**

---

### **3.1. Introdução**

Neste capítulo, será descrito o equipamento óptico desenvolvido pela empresa recifense Claro Tecnologia Ltda. (Figura 3.1). Este equipamento foi desenvolvido originalmente para a detecção da presença de veículos. Porém, na prática, pode ser usado para detecção de quaisquer objetos. Será mostrado a seguir que, além de detectar a presença, também é possível capturar os perfis de veículos.



*Figura 3.1. Equipamento óptico da Claro Tecnologia Ltda.*

Em relação às tecnologias de gerenciamento de tráfego disponíveis, o equipamento é classificado como um sensor infravermelho ativo, tecnologia já apresentada no capítulo 2. Dessa forma, o equipamento emite luz infravermelha na direção dos veículos e detecta a luz refletida por eles em sua direção. Basicamente, o equipamento é composto de dois blocos operacionais, o emissor e o receptor de luz infravermelha, que devem operar no mesmo comprimento de onda. Ambos os blocos serão descritos nas seções seguintes.

### **3.2. Emissor**

O emissor contém diodos emissores de luz (LEDs), código BIR-BM13J7M, da empresa estadunidense American Bright Optoelectronics, operando na região do infravermelho próximo e com pico de emissão teórico em 940 nm (AMERICAN BRIGHT OPTOELECTRONICS

CORPORATION, 2000). Com o intuito de conhecer o valor prático do pico de emissão dos LEDs, foi usado o espectômetro USB2000 da empresa estadunidense Ocean Optics, que resultou em uma medida de 938,67 nm (Figura 3.2). Portanto, o comprimento de onda de emissão medido está bem próximo do comprimento informado pelo fabricante.

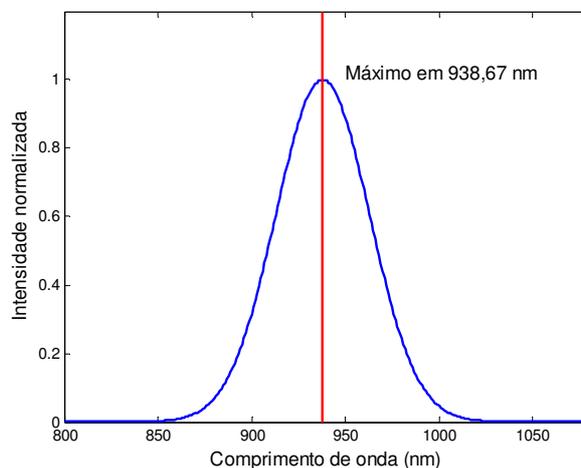


Figura 3.2. Medição experimental do pico de emissão do LED infravermelho BIR-BM13J7M.

Os LEDs estão dispostos em três conjuntos com seis, em um total de dezoito componentes (Figura 3.3). Quando instalado em uma posição fixa, o equipamento ilumina uma região que será chamada, nesse texto, de **zona de cobertura**. O método para determinação da zona de cobertura é descrito a seguir.

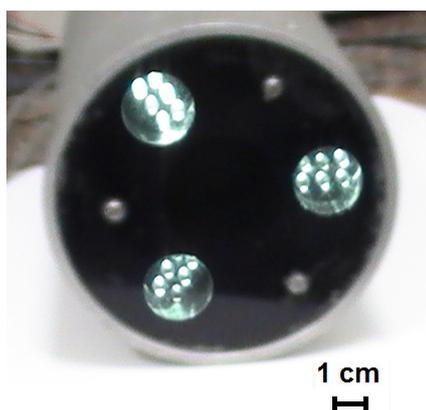


Figura 3.3. Arranjo dos LEDs em forma de triângulo equilátero.

### 3.2.1. Determinação da zona de cobertura

Para determinação da zona de cobertura, foi necessário ligar o equipamento em um local livre de radiações infravermelhas significativas, como as de lâmpadas e de raios solares. Desta forma, foi escolhido o corredor do DES/CTG/UFPE, à frente da porta de entrada do anfiteatro, no

período noturno. O equipamento foi posicionado horizontalmente e apontado para uma das paredes do corredor. Através de um visualizador infravermelho (DEL MAR PHOTONICS; 2006), foi observado que a radiação infravermelha projetou na parede um círculo de raio 0,7 metros. Como a distância do equipamento até a parede era de 3,2 metros, a medição do ângulo de abertura de emissão do sistema resultou em 25 graus.

### 3.2.2. Circuito eletrônico

O bloco emissor tem duas funções: gerar o sinal de ativação dos LEDs e fornecer a corrente necessária para o funcionamento deles. Um microcontrolador é o responsável pela geração do sinal, enquanto transistores MOSFET fazem o papel do *driver* de corrente. Um potenciômetro acoplado aos transistores regula a potência fornecida aos LEDs. O diagrama de blocos do emissor é mostrado na Figura 3.4.

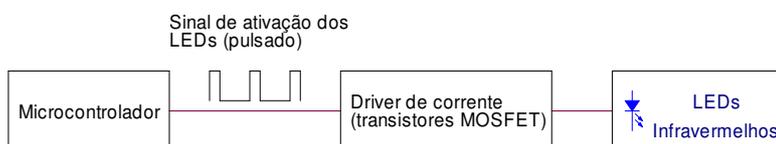


Figura 3.4. Diagrama de blocos do emissor.

O problema enfrentado para implantação do sistema é o de emitir luz infravermelha de uma forma que o receptor poderá diferenciar entre a luz infravermelha refletida pelos veículos e a luz oriunda das mais diversas fontes (sol, lâmpadas, objetos quentes etc.). Para resolver esse problema, foi usada uma modulação (operação pulsada) na geração do sinal de ativação dos LEDs. Através da modulação pode-se detectar os reflexos da luz infravermelha emitida, sem confundi-la com a luz de outras fontes. A frequência de modulação é 10 kHz, com um ciclo de trabalho de 25% (Figura 3.5).



Figura 3.5. Sinal de ativação (modulação) dos LEDs, gerado pelo microcontrolador.

### 3.3. Receptor

O circuito receptor tem a tarefa de detectar a luz infravermelha refletida pelos veículos e extrair dela a informação relativa aos perfis veiculares. Para tanto, o receptor contém três blocos: fotodiodo, seguido por uma etapa de amplificação, filtro passa-faixa e circuito detector de envoltória, além de uma chave (Figura 3.6). Cada bloco será descrito em detalhes a seguir.

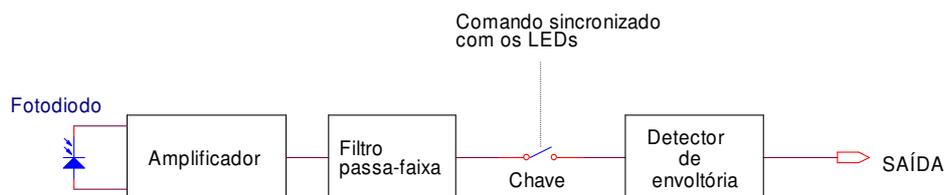


Figura 3.6. Diagrama de blocos do receptor.

#### 3.3.1. Fotodiodo e amplificador

Para garantir operação casada com os LEDs, foi usado o fotodiodo BPW34F (SIEMENS, 1998), que possui máxima sensibilidade no comprimento de onda de 950 nm (Figura 3.7), ou seja, bem próximo do comprimento de onda de operação dos LEDs (940 nm). O fotodiodo é usado para detectar a luz refletida pelos veículos que estejam dentro da zona de cobertura do equipamento. O sinal de tensão nos terminais do fotodiodo varia proporcionalmente à intensidade da luz que incide sobre o mesmo. Dessa maneira, durante a passagem de um veículo pela zona de cobertura do equipamento, a parte mais alta do veículo corresponderá à máxima intensidade de luz percebida pelo fotodiodo, pois trata-se do menor caminho percorrido tanto pela luz emitida como também pela refletida. Por outro lado, quando não há um veículo na zona de cobertura, ou seja, quando a luz infravermelha é refletida pelo chão, o nível de sinal nos terminais do fotodiodo é mínimo.

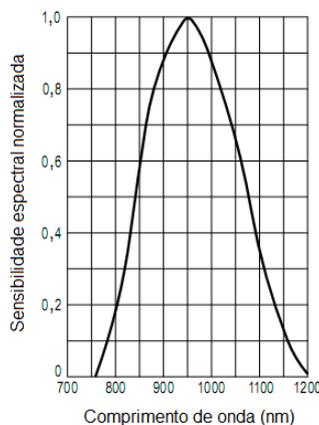


Figura 3.7. Sensibilidade espectral normalizada do fotodiodo BPW34F.  
Fonte: (SIEMENS, 1998)

### 3.3.2. Filtro passa-faixa

O sinal gerado no fotodiodo é amplificado e encaminhado para o filtro passa-faixa. Este filtro é obtido de uma das saídas de um filtro de estado variável (BOGART JR., 2001) e tem frequência central de 10 kHz. Portanto, frequências fora da faixa em torno de 10 kHz são atenuadas. Porém, a presença do filtro passa-faixa não é suficiente para evitar a interferência da luz do sol, que é a fonte primária de luz infravermelha. Então, com o objetivo de tornar o sistema mais robusto à influência prejudicial da luz solar, há sincronismo entre emissão e recepção.

A sincronização consiste em fechar a chave de forma sincronizada com a ativação dos LEDs do emissor, mas não simultaneamente. Como o conjunto fotodiodo, amplificador e filtro passa-faixa possui um tempo de resposta não-nulo, o fechamento da chave ocorre em um intervalo de tempo após a ativação dos LEDs. Na Figura 3.8, são mostrados os sinais de ativação dos LEDs e de fechamento da chave. O intervalo é de 43  $\mu$ s.

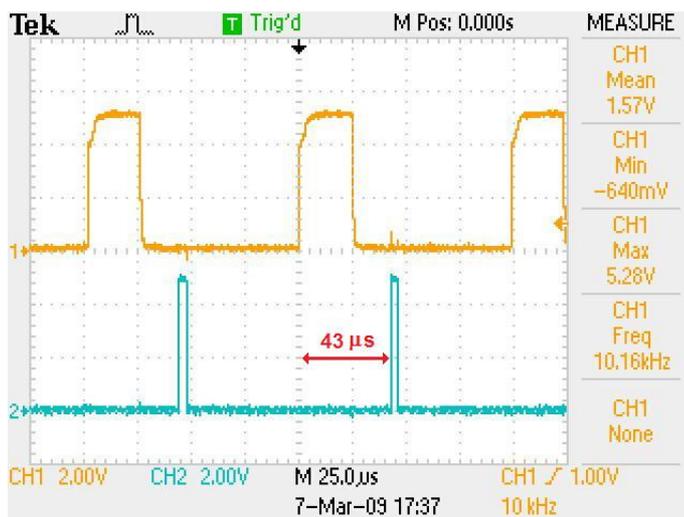


Figura 3.8. Sinais de ativação dos LEDs (sinal 1) e de fechamento da chave (sinal 2).

O uso conjunto da modulação e da sincronização reduz o problema da influência da luz solar. Em outras palavras, quando o equipamento é apontado na direção do sol, o sinal de saída sofre pouca variação.

### 3.3.3. Detector de envoltória

As variações de intensidade de luz percebidas pelo fotodiodo – desde que estejam pulsando dentro da faixa em torno de 10 kHz – geram variações correspondentes na saída do filtro passa-faixa que representam a distância do objeto iluminado pela luz infravermelha em relação ao

equipamento. Desta forma, o perfil de um veículo corresponde à envoltória dessas variações. Portanto, para capturar os perfis dos veículos, foi incluído um circuito detector de envoltória conectado à saída do filtro passa-faixa. O sinal de saída do detector de envoltória corresponde ao perfil veicular.

Uma vez que os perfis veiculares estejam disponíveis, pode-se proceder com comparações a fim de determinar o grau de similaridade entre os mesmos. Uma forma de realizar essas comparações é através da técnica Alinhamento Temporal Dinâmico, descrita no próximo capítulo.

## 4. ALINHAMENTO TEMPORAL DINÂMICO

---

Neste capítulo é apresentada a técnica de casamento de padrões Alinhamento Temporal Dinâmico (ATD), também conhecida pela sigla em inglês DTW (*Dynamic Time Warping*). Inicialmente, serão mostradas algumas definições de expressões que serão usadas ao longo do texto. Em seguida, a técnica ATD é descrita em detalhes. Por fim, o algoritmo que implanta a técnica supracitada é apresentado.

### 4.1. Definições

Antes de iniciar as explicações sobre ATD, algumas definições devem ser apresentadas.

**Definição 1.** *Séries temporais.* Uma série temporal corresponde a uma seqüência de dados distribuídos discretamente no domínio do tempo. Usualmente, os dados são distribuídos em intervalos uniformemente espaçados. Por exemplo: um sinal de áudio amostrado em 48 kHz (amostras distribuídas discreta e uniformemente ao longo do domínio do tempo).

**Definição 2.** *Regiões equivalentes.* A comparação entre duas séries temporais consiste, entre outras coisas, na identificação das regiões de ambas as séries que apresentam maior semelhança entre si. Tais regiões serão chamadas, neste texto, de regiões equivalentes (ver Figura 4.1).

**Definição 3.** *Alinhamento temporal.* Diz-se que ocorre alinhamento temporal quando as regiões equivalentes de duas séries são determinadas. Como exemplo, na Figura 4.1 os segmentos unem as regiões equivalentes entre as séries, determinando o alinhamento temporal entre essas séries.

**Definição 4.** *Warp path.* Corresponde ao conjunto de segmentos que unem as regiões equivalentes entre duas séries.

**Definição 5.** *Distância de alinhamento.* Trata-se do tamanho de um *warp path*.

**Definição 6.** *Matriz de custo.* Matriz que armazena as distâncias de alinhamento mínimas que são obtidas a partir de duas séries temporais.

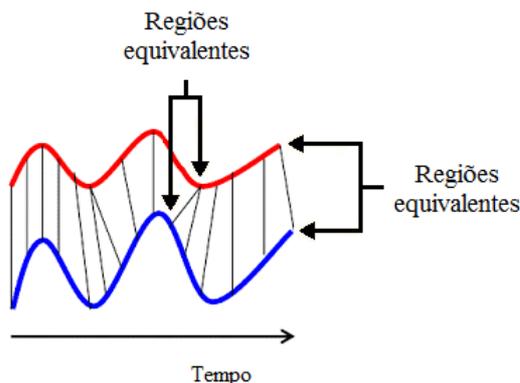


Figura 4.1. Alinhamento temporal entre duas séries temporais. Cada segmento de reta faz parte do warp path correspondente a essas séries.

Fonte: (LI, 2008)

## 4.2. Informações gerais

Alinhamento Temporal Dinâmico (ATD) é uma técnica de alinhamento não-linear entre duas séries temporais que serve para dois propósitos: determinar o grau de semelhança entre séries temporais e encontrar as regiões equivalentes entre elas (SALVADOR, 2004). O objetivo da técnica é encontrar o alinhamento temporal que minimize a distância entre as séries, onde a distância é uma medida da similaridade entre as séries.

Para que as regiões equivalentes das séries temporais sejam alinhadas umas com as outras, as séries são deformadas, isto é, esticadas ou comprimidas no domínio do tempo. Na Figura 4.2 é mostrado o alinhamento entre duas seqüências com formatos semelhantes. Uma grande vantagem proporcionada por essas deformações é a possibilidade de se usar séries de comprimentos diferentes.

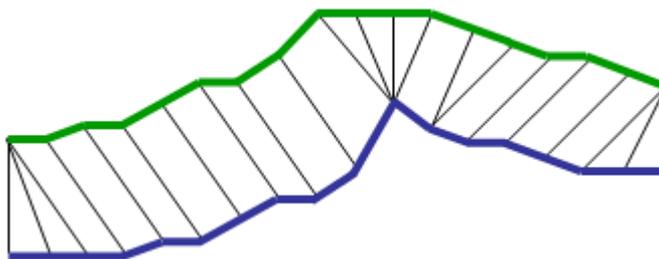


Figura 4.2. Alinhamento entre duas seqüências usando a técnica ATD.

Fonte: <http://www.psb.ugent.be/cbd/papers/gentxwarper/DTWalgorithm.htm>

Com relação à avaliação da medida de similaridade entre séries temporais, tal medida é representada quantitativamente pelo parâmetro distância. Com o intuito de evitar ambigüidades, tal parâmetro será chamado de distância ATD. Quanto menor o valor da distância ATD, tanto maior o

grau de similaridade entre as séries e vice-versa. No caso específico de a distância ATD apresentar valor nulo, ocorre similaridade máxima, ou seja, as séries são idênticas.

A técnica ATD tem encontrado aplicações em problemas que necessitam de reconhecimento de padrões, como reconhecimento de voz (JÚNIOR, 2007), classificação de atividades motoras (MUSCILLO, CONFORTO *et al.*, 2007), reconhecimento de cédulas monetárias em serviços financeiros (SUN e LI, 2008) e reconhecimento de padrões de alteração em sinais de eletrocardiograma (TUZCU e NAS, 2005). Este último demonstra a utilidade da técnica ATD quando aplicada ao reconhecimento de sinais unidimensionais. Assim, torna-se natural usar a técnica ATD no reconhecimento de perfis veiculares, pois esses também possuem uma característica unidimensional. Outras técnicas de reconhecimento de padrões são *wavelets* (TANG, 2008), cadeias ocultas de Markov (ANDREÃO, DORIZZI *et al.*, 2006) e redes neurais (HUANG, XING *et al.*, 2006).

### 4.3. Cálculo da distância ATD

#### 4.3.1. Formulação do problema do alinhamento temporal

Sejam duas séries temporais  $X$  e  $Y$  de dimensões  $M$  e  $N$ , respectivamente,

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_M\}, \quad (4.1)$$

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\}. \quad (4.2)$$

Deve-se construir o *warp path*  $W$

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_K\}, \quad (4.3)$$

onde  $K$  é a quantidade de elementos que compõem  $W$ , devendo-se respeitar o critério

$$\max(M, N) \leq K < M + N, \quad (4.4)$$

onde  $\max(M, N)$  é igual ao maior valor entre as duas opções  $M$  e  $N$ . O valor  $K$  somente é conhecido após a construção de  $W$ .

O  $k$ -ésimo elemento de  $W$  é

$$w_k = (i, j), \quad (4.5)$$

onde  $i$  e  $j$  são os índices das séries temporais  $X$  e  $Y$ , respectivamente. Em outras palavras, cada elemento  $w_k$  corresponde ao segmento que conecta o ponto  $x_i$  (série temporal  $X$ ) até o ponto  $y_j$  (série temporal  $Y$ ).

Existem duas restrições para a construção do *warp path*  $W$ :

- **Coincidência dos pontos terminais.** O *warp path*  $W$  deve partir do começo de cada série temporal em  $w_1 = (1,1)$  e terminar no final de cada série em  $w_K = (M, N)$ . Isso garante que todos os índices de ambas as séries são usados na construção de  $W$ .
- **Monotonicidade.** Os índices contidos em  $w_k$  devem ser monotonicamente crescentes, ou seja,

$$w_k = (i, j), \quad (4.6)$$

$$w_{k+1} = (i', j'), \quad (4.7)$$

$$i \leq i' \leq i + 1, j \leq j' \leq j + 1. \quad (4.8)$$

Respeitando-se o critério 4.4 e as restrições de coincidência e monotonicidade, obtém-se o *warp path* ótimo. Como resultado, produz-se o valor mínimo da distância de alinhamento, que corresponde à distância ATD referente às séries  $X$  e  $Y$ . Distância de alinhamento é o termo usado para se referir ao tamanho de um *warp path*. O cálculo da distância de alinhamento, indicada por  $Dist(W)$ , é feito através da expressão

$$Dist(W) = \sum_{k=1}^K Dist(w_{k,i}, w_{k,j}), \quad (4.9)$$

onde  $Dist(w_{k,i}, w_{k,j})$  é a distância euclidiana entre os pontos  $w_{k,i}$  e  $w_{k,j}$ , pertencentes, respectivamente, às séries temporais  $X$  e  $Y$ , no  $k$ -ésimo elemento do *warp path*  $W$  (SALVADOR, 2004).

A distância euclidiana  $d$  entre dois pontos  $\mathbf{p}$  e  $\mathbf{q}$ , em um espaço euclidiano de dimensão  $T$ , é definida como

$$d = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_T - q_T)^2}, \quad (4.10)$$

onde  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_T)$  e  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_T)$ . No caso específico de pontos unidimensionais, ou seja,  $T = 1$ , a distância euclidiana é

$$d = \sqrt{(p_1 - q_1)^2} = |p_1 - q_1|, \quad (4.11)$$

ou seja, o módulo da diferença entre os pontos.

### 4.3.2. Programação dinâmica

O problema do alinhamento temporal já foi apresentado, ou seja, o cálculo da distância ATD a partir da construção do *warp path* ótimo. Resta agora construí-lo. Existem várias técnicas para se fazer isso, sendo que a mais usada é o método da programação dinâmica. Daí a razão de se chamar Alinhamento Temporal Dinâmico (LI, 2007).

Para encontrar o *warp path* ótimo, inicialmente é construída uma matriz com as distâncias ponto a ponto  $Dist(i, j)$  entre todos os pontos das séries  $X$  e  $Y$ , chamada *matriz das distâncias* (AGUIAR, 2008). De posse desta, é construída uma nova matriz, chamada *matriz de custo* (ver Figura 4.3), que armazena as *distâncias de alinhamento mínimas* que podem ser construídas para duas séries de dimensões  $i$  e  $j$ . As distâncias de alinhamento mínimas são indicadas por  $D(i, j)$ .

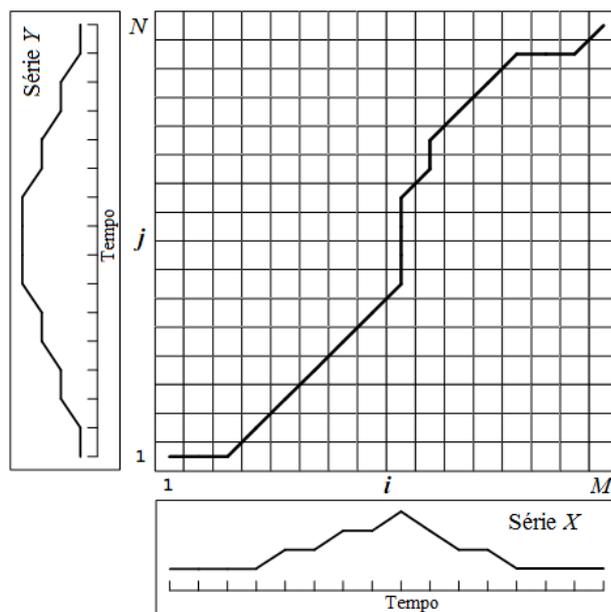


Figura 4.3. Matriz de custo  $M \times N$  referente às séries temporais  $X$  e  $Y$ , de dimensões  $M$  e  $N$ , respectivamente. Fonte: (SALVADOR, 2004)

O preenchimento da matriz de custo obedece às regras da programação dinâmica. Desta forma, como o valor de  $D(i, j)$  é a distância de alinhamento mínima para duas séries de dimensões  $i$  e  $j$ , se as distâncias de alinhamento mínimas forem previamente conhecidas para os elementos que ficam afastados de  $i$  e  $j$  por um único ponto, então o valor de  $D(i, j)$  é a soma da distância entre os pontos  $x_i$  e  $y_j$  com a menor entre todas as possíveis distâncias de alinhamento mínimas que estão a um ponto inferior de  $i$  e  $j$ . Como o *warp path* deve ser incrementado por um ou permanecer o mesmo ao longo dos eixos  $i$  e  $j$  (devido à restrição da monotonicidade), as possíveis distâncias de alinhamento mínimas são  $D(i-1, j)$ ,  $D(i, j-1)$  e  $D(i-1, j-1)$  (SALVADOR, 2004).

Expressando matematicamente, tem-se que a distância de alinhamento mínima referente ao elemento  $(i, j)$  da matriz de custo é

$$D(i, j) = Dist(i, j) + \min \begin{cases} D(i-1, j) \\ D(i, j-1) \\ D(i-1, j-1) \end{cases} \quad (4.12)$$

O cálculo de  $D(i, j)$  requer o conhecimento de valores referentes a pontos inferiores, isto é,  $D(i-1, j)$ ,  $D(i, j-1)$  e  $D(i-1, j-1)$ , o que significa que o preenchimento da matriz de custo deve seguir uma ordem específica. Assim, inicia-se em  $(1,1)$  e varre-se para cima até  $(1, N)$ . Depois inicia-se a segunda coluna em  $(2,1)$  e varre-se para cima até  $(2, N)$ . O procedimento continua, varrendo-se de baixo para cima e da esquerda para direita, terminando em  $(M, N)$ . O valor de  $D(M, N)$  é a distância de alinhamento mínima entre as séries  $X$  e  $Y$ , ou seja, é a distância ATD.

A título de exemplo, duas séries temporais,  $S$  e  $Q$ , e os respectivos alinhamentos temporais, são mostrados na Figura 4.4a. A matriz de custo (Figura 4.4b) tem dimensão  $8 \times 9$  e os quadrados preenchidos com  $w_1, w_2, \dots, w_{10}$  são os elementos do *warp path* ótimo. Como  $M = 8, N = 9, K = 10$ , o critério (4.4) é obedecido.

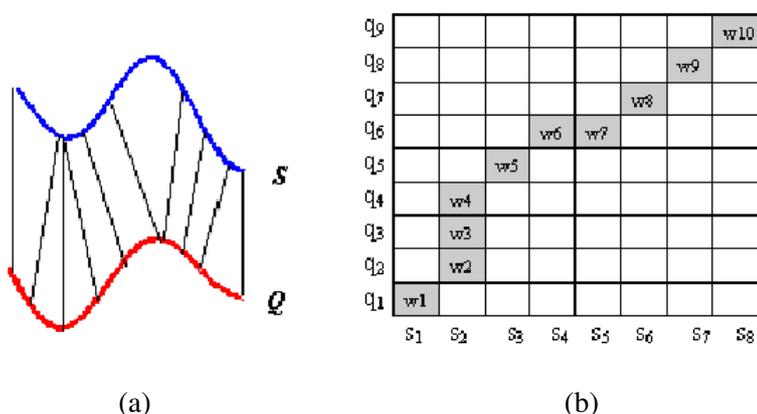


Figura 4.4. (a) Alinhamentos temporais realizados nas séries temporais  $S$  e  $Q$ . (b) Warp path ótimo para as séries  $S$  e  $Q$ , representado pelos elementos  $w_1, w_2, \dots, w_{10}$ .  
Fonte: (LI, WANG et al., 2008)

#### 4.4. Algoritmo de implantação da técnica ATD

A complexidade computacional de algoritmos que implementam a técnica ATD é da ordem  $O(M \times N)$ , onde  $M$  e  $N$  são os comprimentos de duas séries que são comparadas. Por esse motivo, o uso dessa técnica não é apropriado quando se utilizam séries muito longas, o que restringe sua utilidade a seqüências com não mais que alguns milhares de pontos. No entanto, para seqüências menores, o algoritmo é eficiente (SALVADOR, 2004).

O algoritmo ATD elaborado foi escrito em MATLAB e baseado em um código disponível no sítio oficial do MATLAB (FELTY, 2005). O pseudocódigo do algoritmo é mostrado na Tabela 4.1. Esse algoritmo realiza a comparação entre duas séries de cada vez. Para comparações entre três ou mais séries, basta aplicar o algoritmo tantas vezes quantas forem necessárias.

O algoritmo considera duas séries de entrada,  $X$  e  $Y$ , de dimensões  $M$  e  $N$ , respectivamente. Em seguida, são calculadas duas variáveis,  $Dist(i, j)$  e  $D(i, j)$ . A variável  $Dist(i, j)$  é a distância entre

o  $i$ -ésimo ponto de  $X$  e o  $j$ -ésimo ponto de  $Y$ , armazena  $M \times N$  valores e é calculada através da expressão (4.11). A outra variável,  $D(i, j)$ , é a distância de alinhamento mínima relativa a duas séries de dimensões  $i$  e  $j$ , sendo calculada através da expressão (4.12). A distância ATD é obtida através do cálculo de  $D(i, j)$  referente ao último elemento da matriz de custo, isto é,

$$\text{distância ATD} = D(M, N). \quad (4.13)$$

Tabela 4.1. Pseudocódigo do algoritmo ATD.

<p><b>Algoritmo:</b> Alinhamento Temporal Dinâmico entre as séries <math>X</math> e <math>Y</math></p>
<p><b>Entrada:</b>  <math>X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_M\}</math>  <math>Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\}</math></p> <p><b>Variáveis:</b>  <math>Dist(i, j)</math>: distância entre os pontos <math>x_i</math> e <math>y_i</math>.  <math>D(i, j)</math>: distância de alinhamento mínima no elemento <math>(i, j)</math></p> <p><b>Saída:</b>  <math>ATD</math>: distância ATD entre as séries temporais <math>X</math> e <math>Y</math>.</p>
<pre> for <math>i \leftarrow 1</math> to <math>M</math>   for <math>j \leftarrow 1</math> to <math>N</math>     <math>Dist(i, j) \leftarrow  x_i - y_j </math>   end end  <math>D(1,1) \leftarrow Dist(1,1)</math> <math>D(0,0) \leftarrow 0</math> <math>D(0,1) \leftarrow 0</math> <math>D(1,0) \leftarrow 0</math>  for <math>i \leftarrow 1</math> to <math>M</math>   for <math>j \leftarrow 1</math> to <math>N</math>     <math>D(i, j) \leftarrow Dist(i, j) + \min[D(i-1, j), D(i, j-1), D(i-1, j-1)]</math>   end end  <math>ATD \leftarrow D(M, N)</math> </pre>

Uma vez que a técnica ATD foi descrita e o algoritmo ATD foi mostrado, o próximo capítulo apresentará os dados experimentais obtidos e os resultados da aplicação do algoritmo ATD sobre esses dados.

## 5. RESULTADOS

---

O sistema de classificação de veículos descrito neste trabalho se baseia na comparação entre todos os perfis de veículos - armazenados em um banco de dados pré-construído – e o perfil do veículo que passar na área de cobertura do equipamento óptico. A decisão sobre a classificação do veículo é tomada em função do perfil contido no banco de dados que apresentar maior similaridade com o perfil do veículo.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos testes de campo, isto é, os perfis adquiridos experimentalmente e que formam o banco de dados. Também são mostradas as comparações realizadas entre os perfis usando a técnica ATD.

### 5.1. Montagem experimental

Os perfis de veículos foram obtidos através de testes de campo, realizados no próprio campus da UFPE. O equipamento óptico foi instalado em um poste de iluminação pública, na Avenida dos Arquitetos, em frente ao Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), conforme pode ser visto na Figura 5.1.



*Figura 5.1. Equipamento óptico (detalhe circular) instalado em um poste de iluminação pública.*

Como o equipamento está instalado a uma altura de 5 metros em relação ao chão e o ângulo de abertura é 25 graus (com o assinalado no capítulo 3), a área iluminada no pavimento tem o formato de um círculo com diâmetro de aproximadamente 2,8 metros (Figura 5.2). Este valor é

suficiente para cobrir a maior parte de uma faixa de rolamento, que apresenta largura de até 3,6 metros (LIMA, 2009).

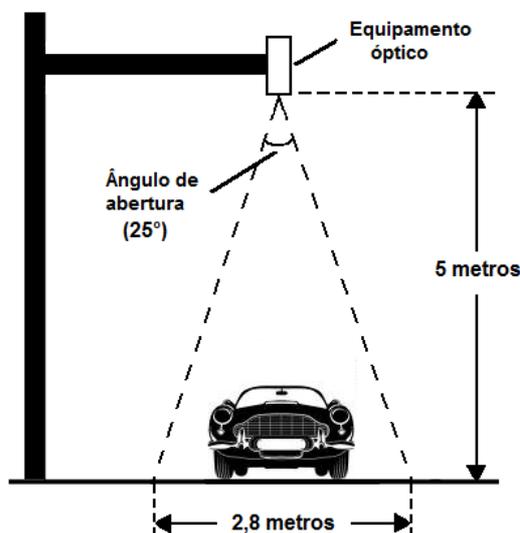


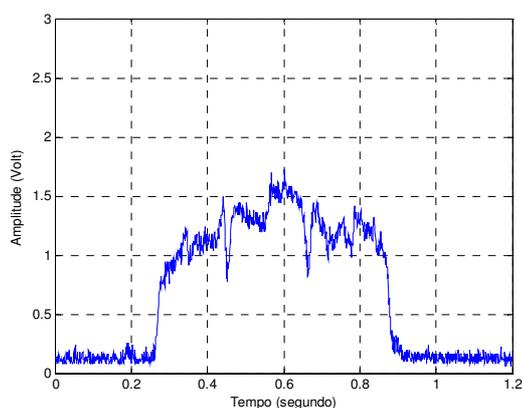
Figura 5.2. Dimensões da zona de cobertura do equipamento óptico.

Uma vez que o equipamento foi instalado em um poste de iluminação pública, um sistema de aquisição e armazenamento de dados (osciloscópio digital Agilent DSO3152A) foi posicionado na base desse poste (Figura 5.3). Um cabo coaxial transmite o sinal de saída do equipamento até a ponta de prova do osciloscópio. Todos os sinais obtidos experimentalmente, isto é, os perfis veiculares, foram armazenados em um *pen drive* conectado ao osciloscópio para posterior processamento. Os perfis foram armazenados no formato de planilha (CSV) e de imagem (JPEG).



Figura 5.3. Sistema de aquisição e armazenamento posicionado em campo de teste.

O procedimento de aquisição do perfil é manual, ou seja, um operador pressiona o botão de ativação/desativação da varredura do osciloscópio de forma sincronizada com a passagem dos veículos. Assim, a varredura é ativada quando o veículo se aproxima da zona de cobertura, e desativada quando se afasta. Um exemplo de tela obtido pelo osciloscópio e o respectivo veículo são mostrados nas Figuras 5.4a e 5.4b, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.4. (a) Tela obtida pelo osciloscópio representando o perfil de um microônibus. (b) O microônibus usado no experimento.

## 5.2. Perfis veiculares obtidos experimentalmente

Vários veículos, de fabricantes e modelos diferentes, foram usados nos experimentos para aquisição dos perfis. Os seguintes tipos de veículos foram submetidos aos experimentos:

- Veículo de passeio (Fiat Uno, Toyota Corolla, Fiat Siena, Ford Fiesta);
- Camionete;
- Microônibus;
- Ônibus.
- Van;
- Caminhão baú.

Cada um dos veículos foi submetido a diferentes velocidades (20 km/h, 40 km/h e 60 km/h) com o objetivo de entender o comportamento do perfil com a mudança de velocidade. Alguns veículos não alcançaram 60 km/h; neste caso, foram submetidos à velocidade máxima de 50 km/h. As velocidades foram determinadas pelos velocímetros dos próprios veículos usados nos testes, o que introduz uma grande incerteza na quantificação dessa grandeza

A expectativa antes dos experimentos era conseguir perfis bastante diferenciados entre os diferentes tipos de veículos, bem como obter perfis bastante semelhantes para um mesmo veículo em diferentes velocidades. Alguns dos perfis obtidos são mostrados nas Figuras 5.5 a 5.14.

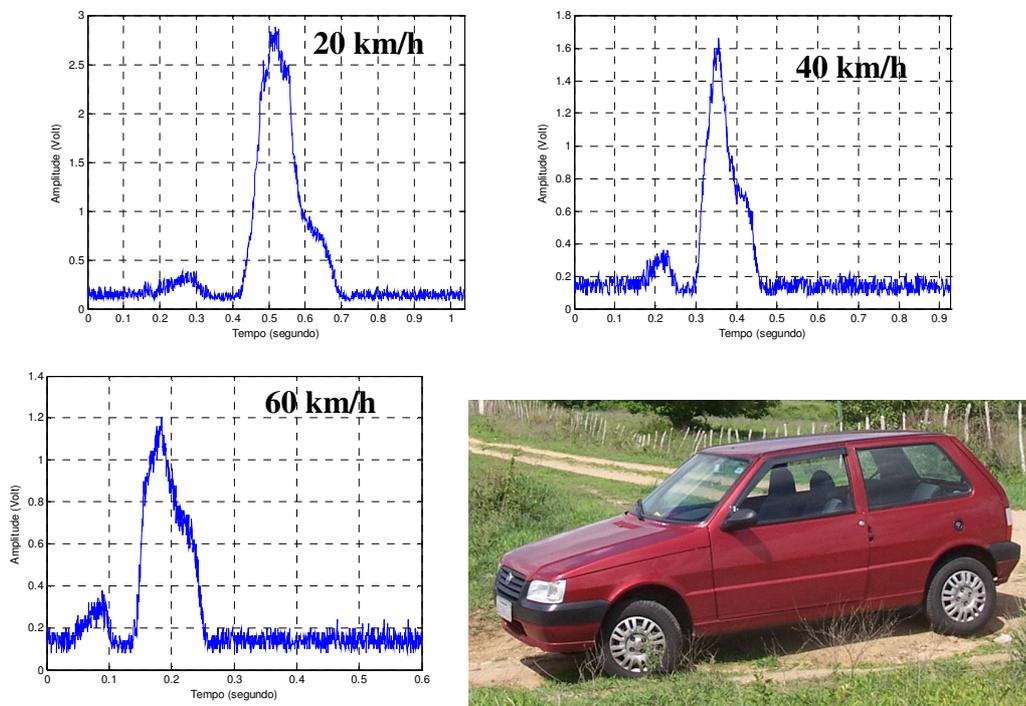


Figura 5.5. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Uno).

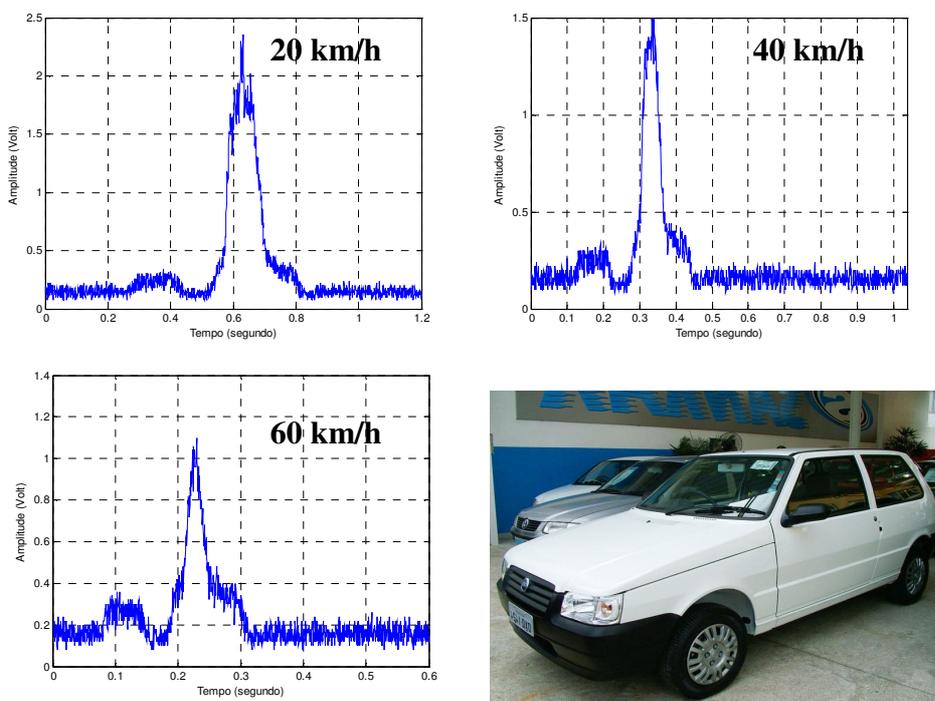


Figura 5.6. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Uno).

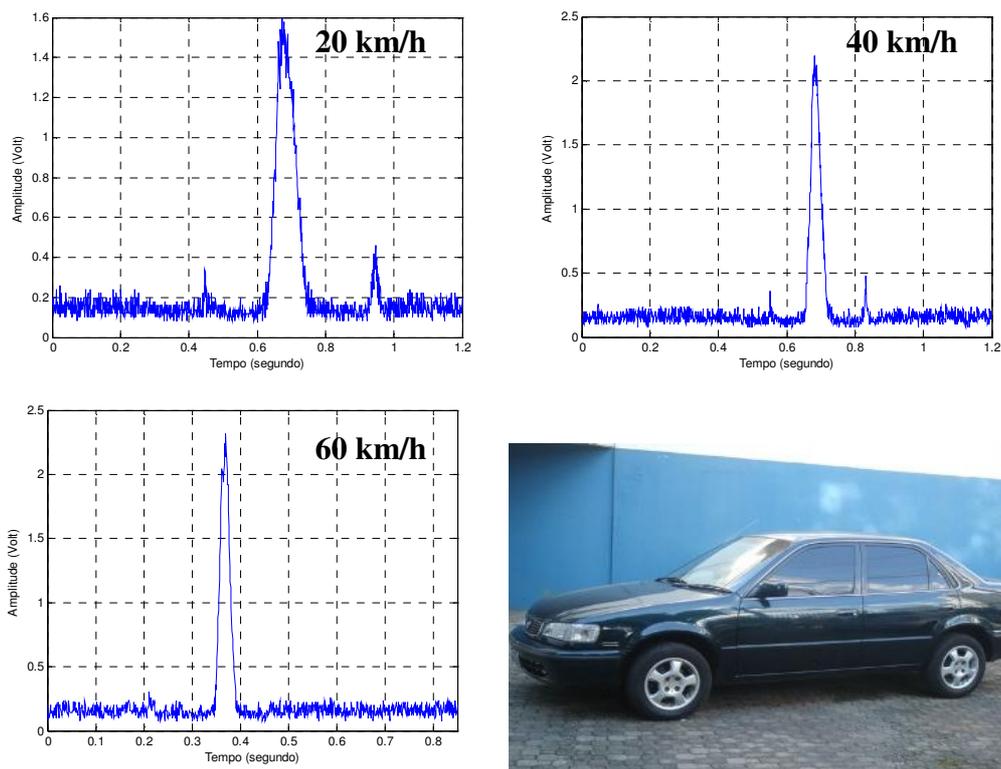


Figura 5.7. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Toyota Corolla).

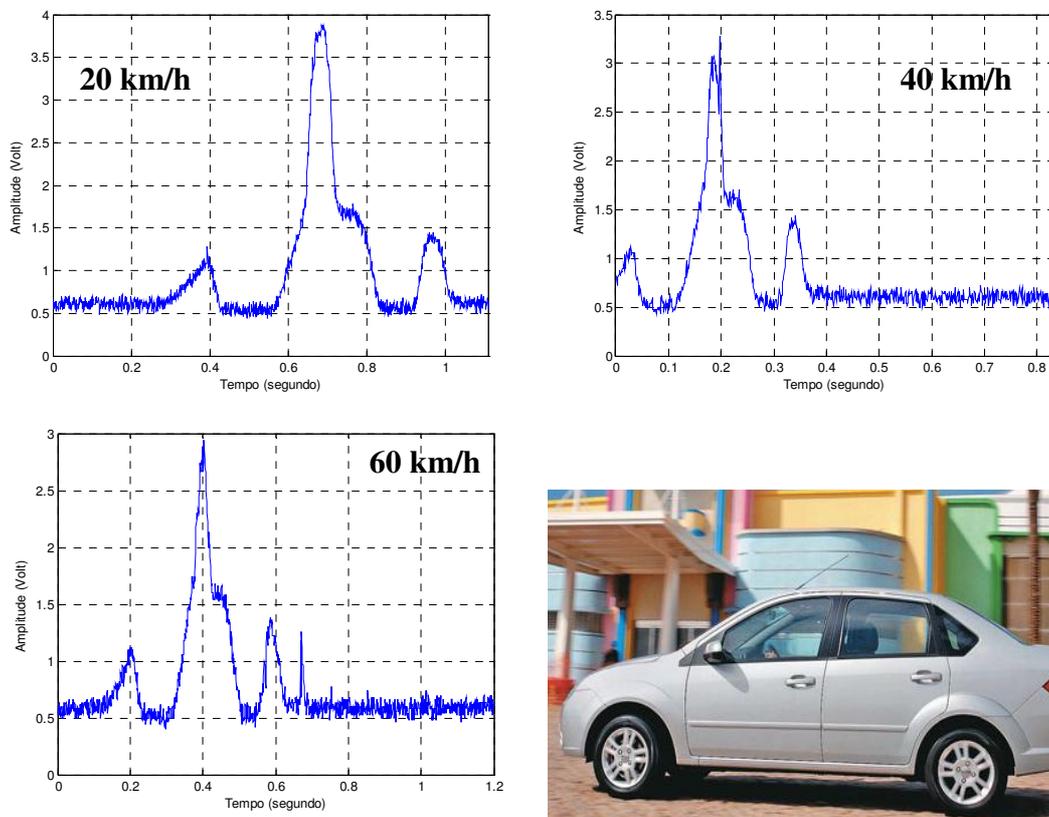


Figura 5.8. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Ford Fiesta).

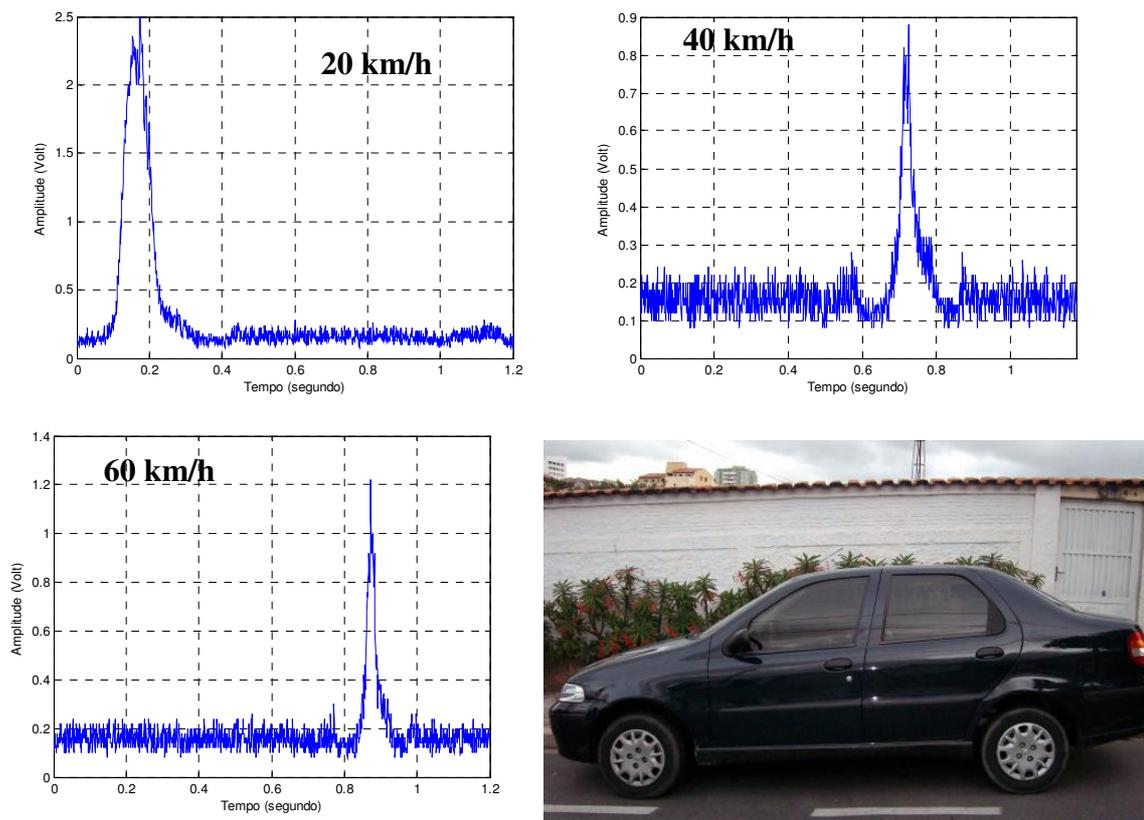


Figura 5.9. Perfis de veículo de passeio nas velocidades 20, 40 e 60 km/h (Fiat Siena).

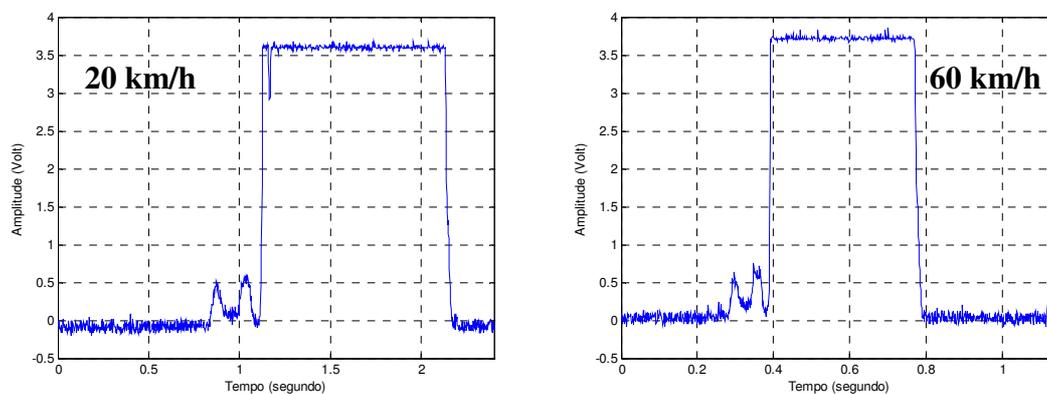


Figura 5.10. Perfis de caminhão baú nas velocidades 20 e 60 km/h.

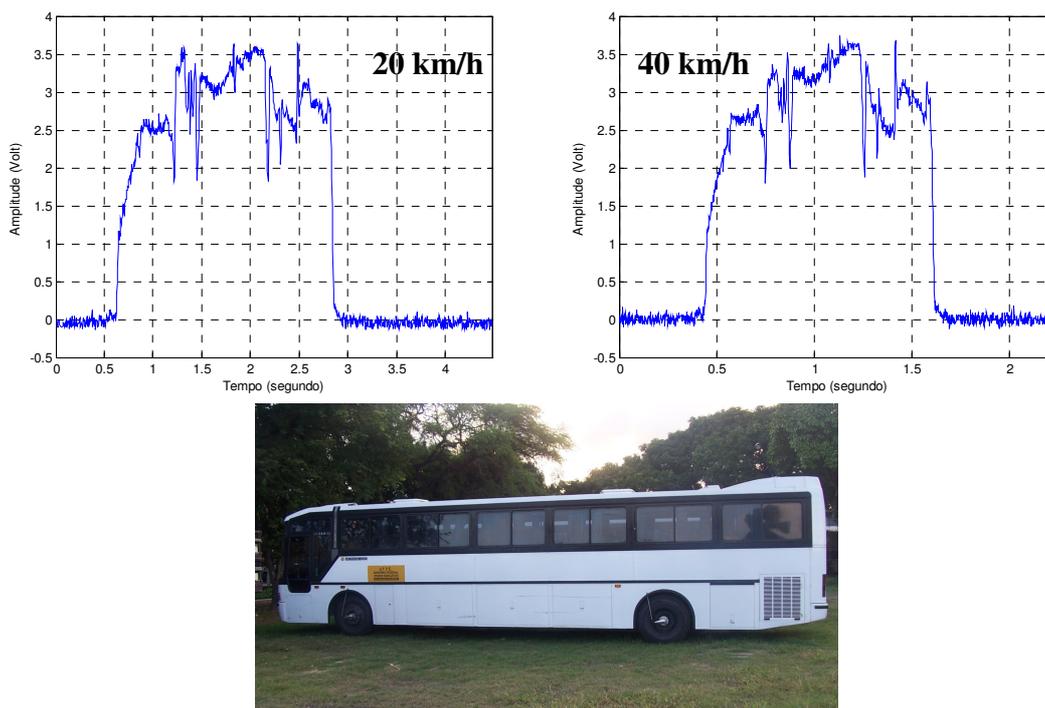


Figura 5.11. Perfis de ônibus nas velocidades 20 e 40 km/h.

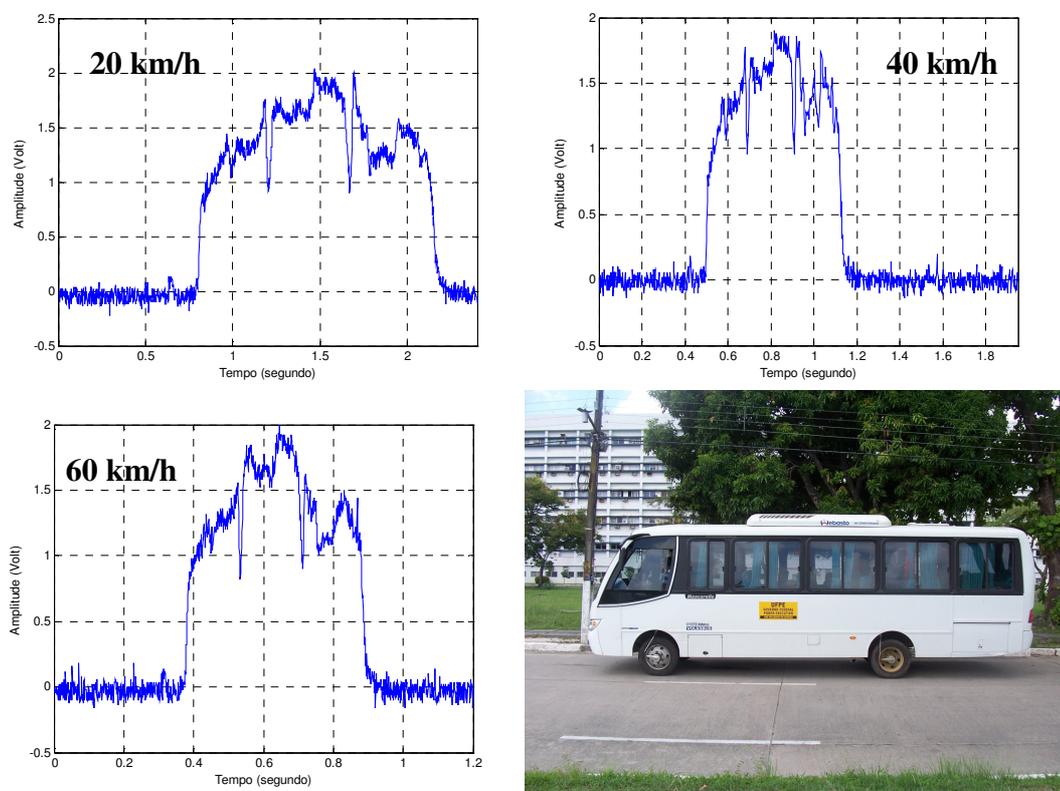


Figura 5.12. Perfis de microônibus nas velocidades 20, 40 e 60 km/h.

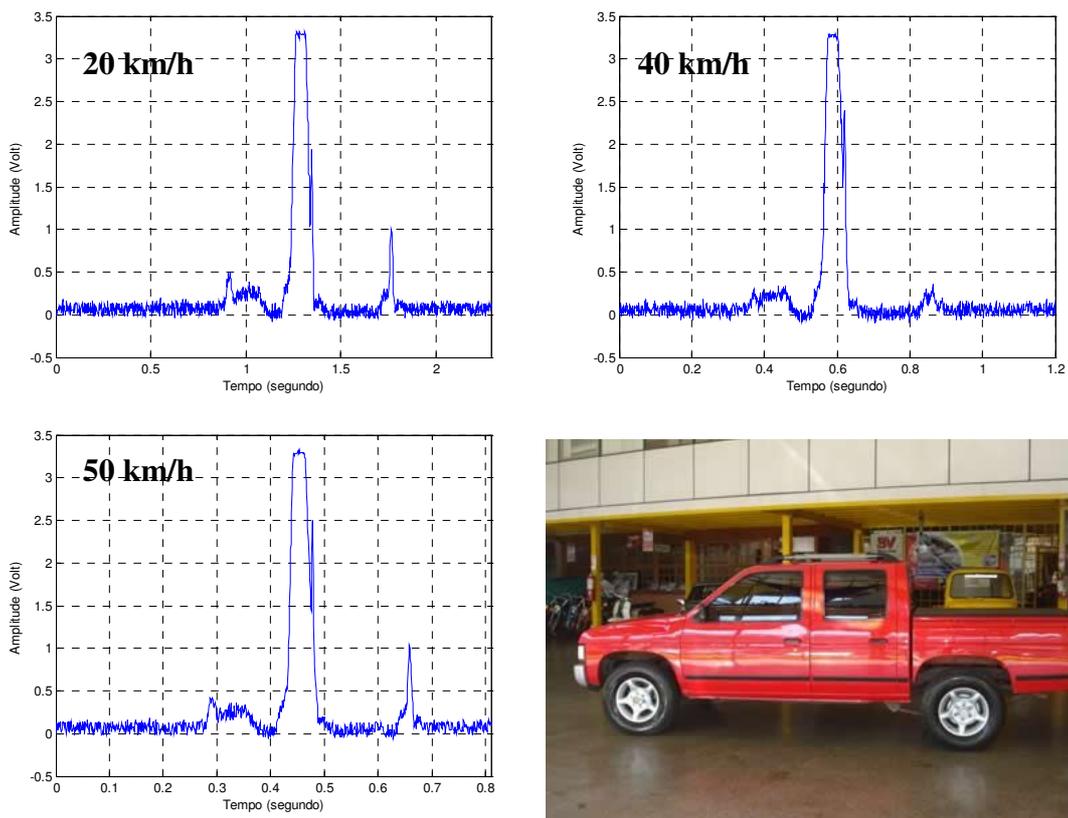


Figura 5.13. Perfis de camionete nas velocidades 20, 40 e 50 km/h.

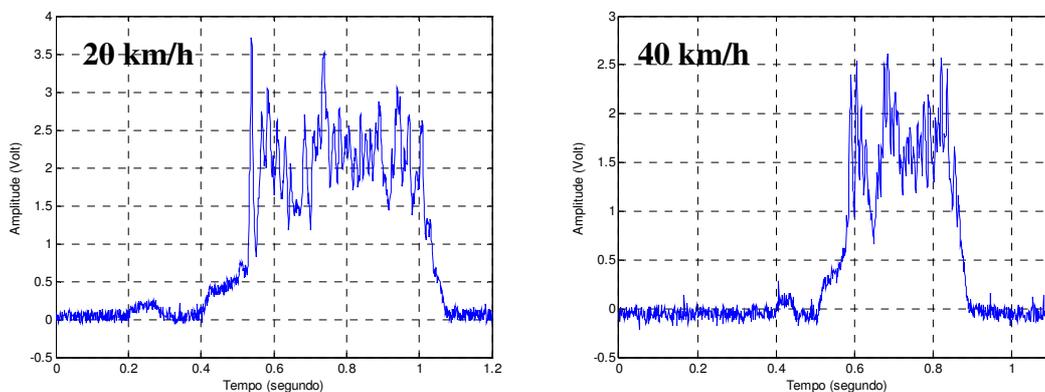


Figura 5.14. Perfis de van nas velocidades 20 e 40 km/h.

### 5.3. Resultados da aplicação do algoritmo ATD sobre os perfis

Uma vez que os perfis estão disponíveis, deve-se determinar o grau de similaridade entre os perfis através do algoritmo que implanta a técnica ATD.

Os perfis obtidos apresentaram níveis de zero<sup>†</sup> não-nulos por causa do ajuste do potenciômetro do emissor. Esse ajuste foi necessário para garantir que os veículos correspondentes a estes perfis fossem iluminados por uma quantidade de luz infravermelha suficiente. No entanto, diferentes níveis de zero podem comprometer a aplicação do algoritmo ATD. Assim, visando à uniformização dos níveis de zero, todos os perfis foram deslocados verticalmente de uma quantidade suficiente para tornar nulos os níveis de zero (ver Figuras 5.15a e 5.15b).

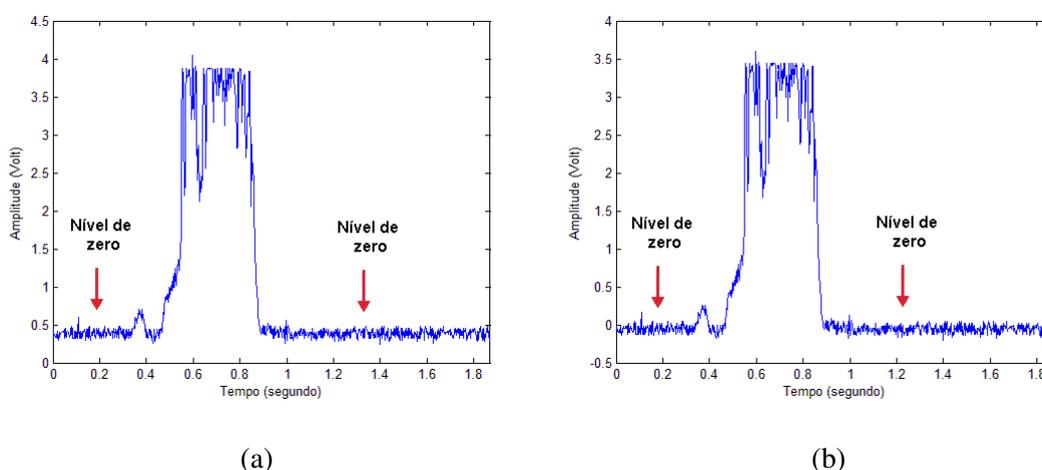


Figura 5.15. (a) Perfil com nível de zero não-nulo (aproximadamente 0,4 volt). (b) O mesmo perfil mostrado em (a), porém com o nível de zero nulo.

Variações da intensidade da luz infravermelha refletida pelos veículos produzem variações de amplitude nos perfis. Como o algoritmo ATD é sensível a variações de amplitude, a aplicação do algoritmo diretamente sobre os perfis obtidos pode gerar resultados não-conclusivos. Com o intuito de resolver este problema, foi incluída no algoritmo uma operação de normalização dos perfis (normalização em relação ao valor máximo de cada perfil). A normalização não modifica o formato original dos perfis (ver Figuras 5.16a e 5.16b) e os coloca numa mesma escala (valor máximo unitário). As distâncias ATD calculadas com os perfis normalizados são mostradas na Tabela 5.1.

<sup>†</sup> **Nível de zero:** trecho do perfil em que o veículo ainda não entrou na zona de cobertura do dispositivo.

Tabela 5.1. Distâncias ATD para perfis normalizados.

	UNOA2	UNOA4	UNOA6	UNOB2	UNOB4	UNOB6	COR2	COR4	COR6	FIE2	FIE4	FIE6
UNOA2	0,00	0,20	0,60	0,32	0,54	0,96	0,59	0,26	0,21	1,66	2,20	2,31
UNOA4	0,20	0,00	0,38	0,33	0,40	0,69	0,52	0,30	0,29	1,48	1,57	1,76
UNOA6	0,60	0,38	0,00	0,60	0,72	0,79	0,67	0,65	0,80	1,58	1,55	1,86
UNOB2	0,32	0,33	0,60	0,00	0,49	0,95	0,59	0,45	0,41	1,24	2,18	1,82
UNOB4	0,54	0,40	0,72	0,49	0,00	0,63	0,64	0,33	0,79	1,55	2,54	1,64
UNOB6	0,96	0,69	0,79	0,95	0,63	0,00	0,96	0,86	1,32	1,05	1,39	1,16
COR2	0,59	0,52	0,67	0,59	0,64	0,96	0,00	0,31	0,48	0,37	0,89	0,76
COR4	0,26	0,30	0,65	0,45	0,33	0,86	0,31	0,00	0,26	0,38	1,60	1,01
COR6	0,21	0,29	0,80	0,41	0,79	1,32	0,48	0,26	0,00	2,56	1,66	3,09
FIE2	1,66	1,48	1,58	1,24	1,55	1,05	0,37	0,38	2,56	0,00	1,06	0,45
FIE4	2,20	1,57	1,55	2,18	2,54	1,39	0,89	1,60	1,66	1,06	0,00	1,07
FIE6	2,31	1,76	1,86	1,82	1,64	1,16	0,76	1,01	3,09	0,45	1,07	0,00
SIE2	0,22	0,32	0,87	0,29	0,46	1,15	0,50	0,22	0,23	1,65	2,25	2,33
SIE4	1,49	1,15	1,12	1,56	2,00	1,28	1,05	1,65	1,02	1,74	1,06	1,71
SIE6	0,65	0,49	0,80	0,48	0,54	0,87	0,51	0,34	0,42	0,88	1,25	1,15
CAM2	0,81	0,80	1,04	0,72	0,72	1,09	0,52	0,25	0,98	0,37	1,73	0,58
CAM4	0,36	0,41	0,70	0,43	0,39	1,00	0,42	0,23	0,43	0,95	1,74	1,63
CAM6	0,85	0,78	1,15	0,71	0,68	1,14	0,50	0,31	1,03	0,48	1,91	0,74
MIC2a	2,65	2,46	1,92	1,61	2,66	2,58	2,57	2,66	2,81	4,28	3,66	4,76
MIC2b	2,43	2,39	1,88	1,46	2,54	2,73	2,23	2,51	2,55	3,61	3,50	4,27
MIC2c	2,31	2,17	1,90	1,45	2,45	2,85	2,27	2,36	2,44	4,17	3,14	4,68
MIC4a	1,30	1,42	1,46	0,88	1,73	1,94	1,30	1,59	1,55	2,73	2,45	3,48
MIC4b	2,50	2,45	1,98	1,30	2,48	2,66	2,32	2,51	2,94	3,77	3,55	4,35
MIC4c	2,54	2,68	2,23	1,35	2,84	2,61	2,49	3,24	3,22	4,20	4,16	4,43
MIC6a	1,51	1,47	1,43	1,18	1,83	2,23	1,61	1,71	1,64	2,81	2,64	3,36
MIC6b	1,92	1,83	1,76	1,31	2,11	2,59	1,82	2,13	1,90	4,30	3,15	4,77
ONI2	1,54	1,86	1,83	1,18	1,93	2,72	1,61	1,87	1,94	4,26	3,44	4,88
ONI4a	1,75	1,77	1,65	0,93	1,90	2,30	1,73	2,10	2,15	3,83	3,65	4,70
ONI4b	1,85	2,12	1,76	0,94	2,13	2,43	1,94	2,56	2,46	4,32	4,19	4,84
ONI5a	1,69	2,21	1,92	1,12	2,24	2,83	1,93	2,47	2,14	4,78	3,51	5,19
ONI5b	1,37	1,83	1,94	1,16	1,83	2,39	1,60	1,82	1,91	3,89	3,92	4,81
VAN2	5,69	5,38	5,04	4,77	6,31	6,29	5,96	5,69	6,12	7,81	8,52	8,00
VAN4a	3,96	3,95	3,85	2,96	4,52	4,73	4,04	3,94	4,10	6,37	5,48	6,82
VAN4b	3,92	3,76	3,83	3,15	4,18	4,51	4,04	3,88	4,06	5,61	5,97	6,24
VAN4c	5,13	4,87	4,82	4,22	5,38	5,06	5,01	4,82	5,40	6,83	7,78	6,79
VAN6a	2,43	2,13	2,63	1,81	2,36	2,90	2,53	2,27	2,24	4,64	4,40	5,11
VAN6b	2,40	2,28	2,27	1,72	2,31	2,99	2,52	2,36	2,34	4,62	4,26	5,12
VAN6c	2,86	2,75	3,15	2,02	2,93	3,61	3,39	2,62	3,22	4,93	5,83	5,54
BAU2	0,79	0,70	1,45	1,44	0,71	1,26	0,84	0,59	0,71	2,48	2,57	2,96
BAU6a	1,20	0,67	1,35	0,85	0,56	1,44	1,13	0,52	0,67	2,57	3,98	3,14
BAU6b	1,07	1,13	1,94	2,19	0,81	1,80	1,36	0,57	0,88	2,76	4,21	3,17
BAU6c	1,26	0,94	1,42	0,98	0,61	1,62	1,29	0,62	0,88	2,48	3,72	2,93

Legenda: consultar Tabela de Abreviaturas na página xii.

Tabela 5.1. (continuação)

	SIE2	SIE4	SIE6	NIS2	NIS4	NIS6	MIC2a	MIC2b	MIC2c	MIC4a	MIC4b	MIC4c
<b>UNOA2</b>	0,22	1,49	0,65	0,81	0,36	0,85	2,65	2,43	2,31	1,30	2,50	2,54
<b>UNOA4</b>	0,32	1,15	0,49	0,80	0,41	0,78	2,46	2,39	2,17	1,42	2,45	2,68
<b>UNOA6</b>	0,87	1,12	0,80	1,04	0,70	1,15	1,92	1,88	1,90	1,46	1,98	2,23
<b>UNOB2</b>	0,29	1,56	0,48	0,72	0,43	0,71	1,61	1,46	1,45	0,88	1,30	1,35
<b>UNOB4</b>	0,46	2,00	0,54	0,72	0,39	0,68	2,66	2,54	2,45	1,73	2,48	2,84
<b>UNOB6</b>	1,15	1,28	0,87	1,09	1,00	1,14	2,58	2,73	2,85	1,94	2,66	2,61
<b>COR2</b>	0,50	1,05	0,51	0,52	0,42	0,50	2,57	2,23	2,27	1,30	2,32	2,49
<b>COR4</b>	0,22	1,65	0,34	0,25	0,23	0,31	2,66	2,51	2,36	1,59	2,51	3,24
<b>COR6</b>	0,23	1,02	0,42	0,98	0,43	1,03	2,81	2,55	2,44	1,55	2,94	3,22
<b>FIE2</b>	1,65	1,74	0,88	0,37	0,95	0,48	4,28	3,61	4,17	2,73	3,77	4,20
<b>FIE4</b>	2,25	1,06	1,25	1,73	1,74	1,91	3,66	3,50	3,14	2,45	3,55	4,16
<b>FIE6</b>	2,33	1,71	1,15	0,58	1,63	0,74	4,76	4,27	4,68	3,48	4,35	4,43
<b>SIE2</b>	0,00	1,47	0,47	0,64	0,30	0,54	1,75	1,72	1,53	1,03	2,00	2,15
<b>SIE4</b>	1,47	0,00	0,93	1,90	1,62	1,99	2,62	2,62	2,40	2,18	2,96	3,56
<b>SIE6</b>	0,47	0,93	0,00	0,57	0,35	0,54	2,57	2,32	2,33	1,78	2,61	2,82
<b>CAM2</b>	0,64	1,90	0,57	0,00	0,36	0,16	3,42	3,33	3,25	2,13	3,20	3,61
<b>CAM4</b>	0,30	1,62	0,35	0,36	0,00	0,28	2,25	2,24	2,15	1,59	2,31	2,70
<b>CAM6</b>	0,54	1,99	0,54	0,16	0,28	0,00	2,92	2,86	2,84	1,85	2,74	3,14
<b>MIC2a</b>	1,75	2,62	2,57	3,42	2,25	2,92	0,00	0,28	0,25	0,57	0,36	0,75
<b>MIC2b</b>	1,72	2,62	2,32	3,33	2,24	2,86	0,28	0,00	0,31	0,49	0,37	0,64
<b>MIC2c</b>	1,53	2,40	2,33	3,25	2,15	2,84	0,25	0,31	0,00	0,53	0,39	0,69
<b>MIC4a</b>	1,03	2,18	1,78	2,13	1,59	1,85	0,57	0,49	0,53	0,00	0,40	0,49
<b>MIC4b</b>	2,00	2,96	2,61	3,20	2,31	2,74	0,36	0,37	0,39	0,40	0,00	0,50
<b>MIC4c</b>	2,15	3,56	2,82	3,61	2,70	3,14	0,75	0,64	0,69	0,49	0,50	0,00
<b>MIC6a</b>	0,99	2,07	1,94	2,36	1,52	1,97	0,49	0,52	0,51	0,86	0,67	1,13
<b>MIC6b</b>	1,25	2,07	1,72	2,72	1,61	2,62	0,52	0,55	0,41	0,68	0,60	0,70
<b>ONI2</b>	1,35	2,50	2,49	2,70	2,21	2,38	1,10	0,82	0,97	0,52	0,88	0,92
<b>ONI4a</b>	1,44	2,92	2,63	2,89	2,14	2,31	0,94	0,81	0,90	0,45	0,74	0,67
<b>ONI4b</b>	1,80	3,45	3,01	2,85	2,44	2,90	1,35	1,02	1,07	0,41	0,81	0,67
<b>ONI5a</b>	1,84	2,95	2,95	3,07	2,43	3,17	1,45	1,15	1,17	0,55	0,95	0,90
<b>ONI5b</b>	1,39	3,21	2,28	2,52	2,19	2,45	1,32	1,05	1,23	0,54	1,03	0,95
<b>VAN2</b>	5,28	6,39	5,79	6,01	5,07	5,73	3,38	3,17	3,10	4,35	3,74	4,04
<b>VAN4a</b>	3,69	3,79	3,81	4,87	3,56	4,19	2,25	2,00	1,97	2,18	2,19	2,22
<b>VAN4b</b>	3,49	4,27	3,81	4,56	3,64	4,20	2,68	2,43	2,41	2,74	2,84	2,90
<b>VAN4c</b>	4,28	5,29	4,99	4,19	3,21	3,68	2,78	2,66	2,31	3,46	2,76	3,08
<b>VAN6a</b>	2,08	3,04	2,11	2,78	2,10	2,71	2,61	2,28	2,27	1,87	2,56	2,62
<b>VAN6b</b>	1,88	2,83	2,07	2,98	2,04	2,68	1,85	1,63	1,74	1,56	1,84	1,82
<b>VAN6c</b>	2,30	4,33	2,62	3,20	1,93	2,48	2,14	2,08	1,94	1,99	2,12	2,42
<b>BAU2</b>	0,91	1,84	0,97	1,00	0,58	1,04	6,71	6,23	5,66	3,56	6,76	6,68
<b>BAU6a</b>	0,91	2,84	0,99	0,85	0,53	0,84	7,18	6,40	6,11	3,30	6,57	5,69
<b>BAU6b</b>	1,10	3,39	1,60	1,00	0,67	0,96	12,93	11,84	11,40	5,73	12,07	13,23
<b>BAU6c</b>	1,01	2,67	0,94	0,83	0,58	0,87	8,07	7,82	7,25	3,40	6,89	6,28

Tabela 5.1. (continuação)

	MIC6a	MIC6b	ROD2	ROD4a	ROD4b	ROD5a	ROD5b	VAN2
<b>UNOA2</b>	1,51	1,92	1,54	1,75	1,85	1,69	1,37	5,69
<b>UNOA4</b>	1,47	1,83	1,86	1,77	2,12	2,21	1,83	5,38
<b>UNOA6</b>	1,43	1,76	1,83	1,65	1,76	1,92	1,94	5,04
<b>UNOB2</b>	1,18	1,31	1,18	0,93	0,94	1,12	1,16	4,77
<b>UNOB4</b>	1,83	2,11	1,93	1,90	2,13	2,24	1,83	6,31
<b>UNOB6</b>	2,23	2,59	2,72	2,30	2,43	2,83	2,39	6,29
<b>COR2</b>	1,61	1,82	1,61	1,73	1,94	1,93	1,60	5,96
<b>COR4</b>	1,71	2,13	1,87	2,10	2,56	2,47	1,82	5,69
<b>COR6</b>	1,64	1,90	1,94	2,15	2,46	2,14	1,91	6,12
<b>FIE2</b>	2,81	4,30	4,26	3,83	4,32	4,78	3,89	7,81
<b>FIE4</b>	2,64	3,15	3,44	3,65	4,19	3,51	3,92	8,52
<b>FIE6</b>	3,36	4,77	4,88	4,70	4,84	5,19	4,81	8,00
<b>SIE2</b>	0,99	1,25	1,35	1,44	1,80	1,84	1,39	5,28
<b>SIE4</b>	2,07	2,07	2,50	2,92	3,45	2,95	3,21	6,39
<b>SIE6</b>	1,94	1,72	2,49	2,63	3,01	2,95	2,28	5,79
<b>CAM2</b>	2,36	2,72	2,70	2,89	2,85	3,07	2,52	6,01
<b>CAM4</b>	1,52	1,61	2,21	2,14	2,44	2,43	2,19	5,07
<b>CAM6</b>	1,97	2,62	2,38	2,31	2,90	3,17	2,45	5,73
<b>MIC2a</b>	0,49	0,52	1,10	0,94	1,35	1,45	1,32	3,38
<b>MIC2b</b>	0,52	0,55	0,82	0,81	1,02	1,15	1,05	3,17
<b>MIC2c</b>	0,51	0,41	0,97	0,90	1,07	1,17	1,23	3,10
<b>MIC4a</b>	0,86	0,68	0,52	0,45	0,41	0,55	0,54	4,35
<b>MIC4b</b>	0,67	0,60	0,88	0,74	0,81	0,95	1,03	3,74
<b>MIC4c</b>	1,13	0,70	0,92	0,67	0,67	0,90	0,95	4,04
<b>MIC6a</b>	0,00	0,58	1,16	1,00	1,52	1,66	1,43	3,11
<b>MIC6b</b>	0,58	0,00	1,09	0,97	1,21	1,32	1,32	2,84
<b>ONI2</b>	1,16	1,09	0,00	0,20	0,47	0,58	0,24	4,63
<b>ONI4a</b>	1,00	0,97	0,20	0,00	0,37	0,56	0,34	4,28
<b>ONI4b</b>	1,52	1,21	0,47	0,37	0,00	0,24	0,50	4,68
<b>ONI5a</b>	1,66	1,32	0,58	0,56	0,24	0,00	0,67	5,44
<b>ONI5b</b>	1,43	1,32	0,24	0,34	0,50	0,67	0,00	5,15
<b>VAN2</b>	3,11	2,84	4,63	4,28	4,68	5,44	5,15	0,00
<b>VAN4a</b>	1,97	2,10	2,43	2,50	2,69	2,95	2,51	1,37
<b>VAN4b</b>	2,20	2,00	2,93	3,06	3,30	3,83	3,24	0,57
<b>VAN4c</b>	2,16	2,32	3,85	3,40	4,06	4,72	4,23	1,13
<b>VAN6a</b>	2,12	1,61	2,43	2,43	3,08	3,43	2,84	0,81
<b>VAN6b</b>	1,74	1,37	1,91	1,86	2,33	2,17	1,88	1,37
<b>VAN6c</b>	1,99	1,70	2,23	2,32	2,89	2,84	2,37	1,48
<b>BAU2</b>	4,40	5,15	4,53	4,65	4,61	4,03	4,77	7,53
<b>BAU6a</b>	4,64	5,06	3,29	4,74	4,89	4,61	3,40	7,51
<b>BAU6b</b>	9,50	10,41	7,07	9,04	9,52	7,62	6,79	7,48
<b>BAU6c</b>	6,62	6,56	4,10	4,63	4,97	3,96	4,47	7,51

Tabela 5.1. (continuação)

	VAN4a	VAN4b	VAN4c	VAN6a	VAN6b	VAN6c	BAU2	BAU6a	BAU6b	BAU6c
<b>UNOA2</b>	3,96	3,92	5,13	2,43	2,40	2,86	0,79	1,20	1,07	1,26
<b>UNOA4</b>	3,95	3,76	4,87	2,13	2,28	2,75	0,70	0,67	1,13	0,94
<b>UNOA6</b>	3,85	3,83	4,82	2,63	2,27	3,15	1,45	1,35	1,94	1,42
<b>UNOB2</b>	2,96	3,15	4,22	1,81	1,72	2,02	1,44	0,85	2,19	0,98
<b>UNOB4</b>	4,52	4,18	5,38	2,36	2,31	2,93	0,71	0,56	0,81	0,61
<b>UNOB6</b>	4,73	4,51	5,06	2,90	2,99	3,61	1,26	1,44	1,80	1,62
<b>COR2</b>	4,04	4,04	5,01	2,53	2,52	3,39	0,84	1,13	1,36	1,29
<b>COR4</b>	3,94	3,88	4,82	2,27	2,36	2,62	0,59	0,52	0,57	0,62
<b>COR6</b>	4,10	4,06	5,40	2,24	2,34	3,22	0,71	0,67	0,88	0,88
<b>FIE2</b>	6,37	5,61	6,83	4,64	4,62	4,93	2,48	2,57	2,76	2,48
<b>FIE4</b>	5,48	5,97	7,78	4,40	4,26	5,83	2,57	3,98	4,21	3,72
<b>FIE6</b>	6,82	6,24	6,79	5,11	5,12	5,54	2,96	3,14	3,17	2,93
<b>SIE2</b>	3,69	3,49	4,28	2,08	1,88	2,30	0,91	0,91	1,10	1,01
<b>SIE4</b>	3,79	4,27	5,29	3,04	2,83	4,33	1,84	2,84	3,39	2,67
<b>SIE6</b>	3,81	3,81	4,99	2,11	2,07	2,62	0,97	0,99	1,60	0,94
<b>CAM2</b>	4,87	4,56	4,19	2,78	2,98	3,20	1,00	0,85	1,00	0,83
<b>CAM4</b>	3,56	3,64	3,21	2,10	2,04	1,93	0,58	0,53	0,67	0,58
<b>CAM6</b>	4,19	4,20	3,68	2,71	2,68	2,48	1,04	0,84	0,96	0,87
<b>MIC2a</b>	2,25	2,68	2,78	2,61	1,85	2,14	6,71	7,18	12,93	8,07
<b>MIC2b</b>	2,00	2,43	2,66	2,28	1,63	2,08	6,23	6,40	11,84	7,82
<b>MIC2c</b>	1,97	2,41	2,31	2,27	1,74	1,94	5,66	6,11	11,40	7,25
<b>MIC4a</b>	2,18	2,74	3,46	1,87	1,56	1,99	3,56	3,30	5,73	3,40
<b>MIC4b</b>	2,19	2,84	2,76	2,56	1,84	2,12	6,76	6,57	12,07	6,89
<b>MIC4c</b>	2,22	2,90	3,08	2,62	1,82	2,42	6,68	5,69	13,23	6,28
<b>MIC6a</b>	1,97	2,20	2,16	2,12	1,74	1,99	4,40	4,64	9,50	6,62
<b>MIC6b</b>	2,10	2,00	2,32	1,61	1,37	1,70	5,15	5,06	10,41	6,56
<b>ONI2</b>	2,43	2,93	3,85	2,43	1,91	2,23	4,53	3,29	7,07	4,10
<b>ONI4a</b>	2,50	3,06	3,40	2,43	1,86	2,32	4,65	4,74	9,04	4,63
<b>ONI4b</b>	2,69	3,30	4,06	3,08	2,33	2,89	4,61	4,89	9,52	4,97
<b>ONI5a</b>	2,95	3,83	4,72	3,43	2,17	2,84	4,03	4,61	7,62	3,96
<b>ONI5b</b>	2,51	3,24	4,23	2,84	1,88	2,37	4,77	3,40	6,79	4,47
<b>VAN2</b>	1,37	0,57	1,13	0,81	1,37	1,48	7,53	7,51	7,48	7,51
<b>VAN4a</b>	0,00	0,96	0,71	1,09	1,00	1,22	5,01	5,96	6,76	7,26
<b>VAN4b</b>	0,96	0,00	0,76	0,38	0,67	0,62	5,26	5,80	7,10	7,56
<b>VAN4c</b>	0,71	0,76	0,00	0,94	0,86	0,89	7,46	7,13	7,49	7,19
<b>VAN6a</b>	1,09	0,38	0,94	0,00	0,65	0,56	3,19	2,89	5,78	5,20
<b>VAN6b</b>	1,00	0,67	0,86	0,65	0,00	0,94	3,44	3,50	2,58	3,75
<b>VAN6c</b>	1,22	0,62	0,89	0,56	0,94	0,00	3,90	3,88	4,06	4,49
<b>BAU2</b>	5,01	5,26	7,46	3,19	3,44	3,90	0,00	0,22	0,26	0,28
<b>BAU6a</b>	5,96	5,80	7,13	2,89	3,50	3,88	0,22	0,00	0,12	0,05
<b>BAU6b</b>	6,76	7,10	7,49	5,78	2,58	4,06	0,26	0,12	0,00	0,09
<b>BAU6c</b>	7,26	7,56	7,19	5,20	3,75	4,49	0,28	0,05	0,09	0,00

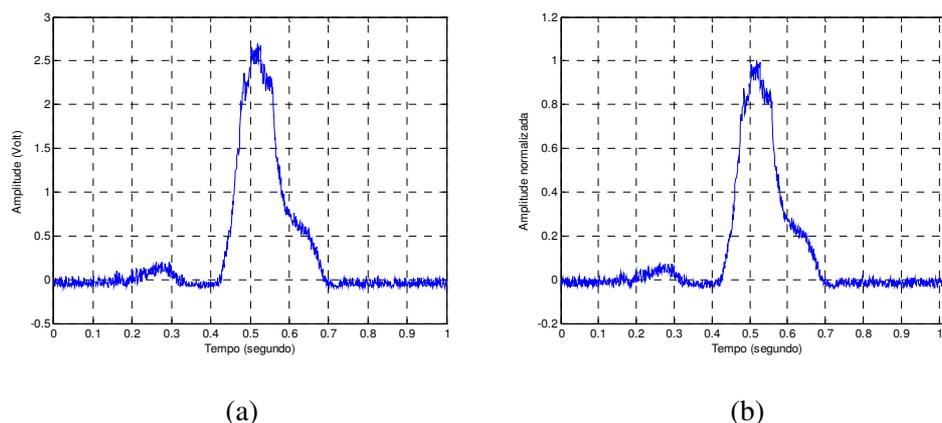


Figura 5.16. (a) Perfil não-normalizado do veículo Fiat Uno. (b) Perfil normalizado, que tem o mesmo formato do perfil não-normalizado.

Com o intuito de entender o significado dos dados da Tabela 5.1, foram elaboradas duas tabelas: uma que informa as taxas de acerto nas comparações dos perfis de um determinado tipo com os perfis de todos os demais tipos (Tabela 5.2), e outra (Tabela 5.3) que mostra as taxas de acerto entre pares de tipos – por exemplo, microônibus e van, ou microônibus e veículo de passeio. Um acerto acontece quando, na comparação entre dois perfis (de tipos veiculares diferentes), o algoritmo confirma que os perfis são de tipos diferentes. Logo, uma taxa de acerto alta significa que o algoritmo diferencia corretamente os diferentes tipos veiculares.

Para elaborar as Tabelas 5.2 e 5.3, foi preciso inicialmente estabelecer um limiar de distância ATD para cada tipo de veículo. O valor do limiar foi definido como sendo a maior distância ATD resultante das comparações entre todos os perfis de um mesmo tipo. Por exemplo, no caso do caminhão baú, o limiar é 0,28 (ver Tabela 5.4). A escolha da maior distância ATD como limiar justifica-se pelo fato de ela representar o pior caso de similaridade, isto é, se uma comparação produz uma distância ATD maior que o limiar, certamente tratar-se-á de perfis pertencentes a tipos veiculares diferentes. Em outras palavras, o limiar corresponde à fronteira entre o que pertence ou não a um determinado tipo veicular. Os limiares usados neste trabalho foram os seguintes: 1,56 (passeio), 0,36 (camionete), 0,86 (microônibus), 0,67 (ônibus), 1,47 (van) e 0,28 (baú).

A utilidade da Tabela 5.2 é mostrar o desempenho do algoritmo ATD sobre os perfis disponíveis, sem especificar quais pares de tipos apresentam uma maior ou menor taxa de acerto. A elaboração dessa tabela é explicada através do exemplo do microônibus: existem 42 perfis no total, sendo que 8 deles são de microônibus e 34 dos demais tipos veiculares. Cada um dos perfis de microônibus foi submetido à comparação com todos os perfis dos demais tipos veiculares, o que gerou  $42 - 8 = 34$  comparações. No total, os 8 perfis geraram  $8 \times 34 = 272$  comparações. Como o limiar de microônibus é 0,86, houve 261 acertos, o que resulta em uma taxa de acerto de 95,9%.

Esse resultado indica que o algoritmo ATD consegue diferenciar um microônibus de qualquer outro tipo veicular em 95,9% dos casos.

*Tabela 5.2. Taxas de acerto para cada tipo de veículo.*

<b>TIPO</b>	<b>Número de comparações (C)</b>	<b>Número de acertos (A)</b>	<b>Taxa de acerto (%) (100 * A/C)</b>
<b>Passeio</b>	15*27 = 405	299	73,8
<b>Camionete</b>	3*39 = 117	111	94,8
<b>Microônibus</b>	8*34 = 272	261	95,9
<b>Ônibus</b>	5*37 = 185	180	97,2
<b>Van</b>	7*35 = 245	244	99,5
<b>Caminhão baú</b>	4*38 = 152	152	100
<b>TOTAL</b>	<b>1376</b>	<b>1247</b>	<b>90,6</b>

O objetivo da Tabela 5.3 é apresentar o desempenho do algoritmo ATD em comparações tipo a tipo, ou seja, em pares. A elaboração desta tabela é explicada através da comparação entre ônibus e microônibus: na coluna referente a ônibus, usa-se o limiar deste tipo (0,67). De acordo com a Tabela 5.1, há 5 perfis de ônibus e 8 perfis de microônibus, resultando em um total de  $5 \times 8 = 40$  valores de distância ATD. Como 35 destes valores são maiores que o limiar (0,67), a taxa de acerto é  $35/40$  ou 87,5%. Nas comparações de ônibus com outros tipos veiculares, as taxas de acerto foram 100%, ou seja, se o sistema for instalado de forma permanente em uma via pública, será possível saber se algum veículo analisado é ou não um ônibus.

*Tabela 5.3. Taxas de acerto referentes às comparações entre os diversos tipos de veículos.*

<b>Passeio</b>	<b>Camionete</b>	<b>Microônibus</b>	<b>Ônibus</b>	<b>Van</b>	<b>Baú</b>	<b>%</b>
100	39/45 = 86,7	100	100	100	100	<b>Passeio</b>
	100	100	100	100	100	<b>Camionete</b>
		100	35/40 = 87,5	100	100	<b>Microônibus</b>
			100	100	100	<b>Ônibus</b>
				100	100	<b>Van</b>
					100	<b>Baú</b>

Tabela 5.4. Distâncias ATD entre os perfis do tipo caminhão baú (reprodução parcial da Tabela 5.1).

	<b>BAU2</b>	<b>BAU6a</b>	<b>BAU6b</b>	<b>BAU6c</b>
<b>BAU2</b>	0	0,22	0,26	<b>0,28</b>
<b>BAU6a</b>	0,22	0	0,12	0,05
<b>BAU6b</b>	0,26	0,12	0	0,09
<b>BAU6c</b>	<b>0,28</b>	0,05	0,09	0

#### 5.4. Considerações sobre os resultados obtidos

Analisando-se os dados da Tabela 5.2, percebe-se que a maior parte das taxas de acerto é próxima de 100% e a taxa de acerto total é de 90,6%. Esses dados tornam viável a utilização do sistema para classificação veicular. No entanto, o tipo veículo de passeio apresentou uma taxa de acerto relativamente baixa (73,8%, enquanto os demais tipos ficaram acima de 90%). Isso se deve a um valor elevado de limiar, o que dificulta a ocorrência de acertos. Esse problema é consequência dos diferentes formatos dos veículos de passeio (*hatch* e *sedan*), o que dificulta a obtenção de um limiar que represente de forma satisfatória esse grupo de veículos. Uma possível solução é transformar o tipo veículo de passeio em dois: *hatch* e *sedan*.

A taxa de acertos total do sistema foi de 90,6%, um valor que pode ser aumentado se houver uma maior quantidade de perfis à disposição. Idealmente, toda a frota nacional de veículos deve compor o banco de dados de perfis, de maneira que sejam obtidos os valores de limiar ótimos para classificação veicular.

## 6. CONCLUSÃO

---

Nesta dissertação, foi apresentado um sistema de classificação veicular baseado em tecnologia óptica. A classificação se restringiu a diferenciar os tipos veiculares mais comuns – veículo de passeio, camionete, microônibus, ônibus, van e caminhão – e se tornou possível graças à criação de um banco de dados de perfis veiculares a partir do equipamento óptico da Claro Tecnologia Ltda..

Cada perfil funcionou como uma “impressão digital” veicular, de maneira que a identificação do tipo de um veículo pôde ser realizada através da comparação de seu perfil com os perfis do banco de dados. A técnica escolhida para efetuar as comparações foi Alinhamento Temporal Dinâmico (ATD), pois a mesma se aplica a sinais unidimensionais e apresenta pouca variabilidade quanto a alongamentos ou encolhimentos no domínio do tempo, fato este que ocorre com os perfis em função da velocidade dos veículos. O uso da técnica ATD é uma novidade, pois as técnicas usuais de comparação de sinais unidimensionais são *wavelets*, cadeias ocultas de Markov e redes neurais.

Nas comparações realizadas foram obtidas taxas de acerto próximas a 100%, o que demonstra a utilidade da técnica ATD nas comparações de perfis veiculares. No entanto, verificou-se que o banco de dados do sistema deve ser ampliado, uma vez que o banco de dados atual (42 perfis) não é suficiente para cobrir toda a frota nacional.

### 6.1. Trabalhos futuros

Visando à melhoria do sistema, um trabalho futuro consiste na anulação do nível de zero que surge no sinal de saída do equipamento óptico devido aos ajustes do potenciômetro do emissor. A proposta é adicionar ao equipamento óptico um amplificador operacional na configuração somador com duas entradas. Uma das entradas seria o sinal de saída do equipamento óptico, enquanto a outra seria um sinal constante (+Vcc) conectado a um segundo potenciômetro. O nível de zero na saída do amplificador operacional poderia, então, ser anulado através do segundo potenciômetro.

Da forma como foi concebido, o sistema de classificação funciona de modo *off-line*, ou seja, os dados são transportados manualmente do local de aquisição de dados para um computador situado remotamente. Dessa forma não é possível avaliar, em tempo real, o tipo de um veículo. Um possível trabalho a ser feito é construir um sistema embarcado que armazene o banco de dados de

perfis, digitalize o sinal do equipamento óptico e execute o algoritmo ATD em tempo real. Este sistema poderia ser instalado em um gabinete e fixado num poste de iluminação próximo ao local onde fosse instalado o equipamento óptico.

O sistema embarcado poderia ser usado no controle de circulação de veículos em faixa exclusiva para ônibus, como por exemplo, na Avenida Caxangá, na cidade do Recife-PE. O sistema reconheceria qualquer veículo diferente de um ônibus e acionaria um sistema fotográfico auxiliar para capturar a placa do veículo infrator. Neste trabalho, cada comparação levou em média 0,4 s em uma plataforma PC equipada com processador Intel Core 2 Duo, 2GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP SP3 Professional. Este tempo de comparação é elevado e não permite operação em tempo real. Portanto, o uso do sistema de classificação veicular nessa aplicação fica condicionado à utilização de uma plataforma mais rápida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AGUIAR, Rogério Oliveira de; 2008. *Classificador Automático e Não-Supervisionado de Batimentos Cardíacos Baseado no Algoritmo Dynamic Time Warping*. Vitória-ES. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.
- AMERICAN BRIGHT OPTOELECTRONICS CORPORATION; 2000. *Infrared Emitting Diodes: BIR-B and BIR-N Series Datasheet*. Chino, California, United States of America.
- ANDREÃO, R. V.; DORIZZI, B.; BOUDY, J.; 2006. ECG signals analysis through hidden Markov models. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, New York, vol. 53 (Aug.), no. 8, p. 1541-1549.
- BOGART JR., T. F.; 2001. *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. 3. ed. Makron Books.
- CONTRAN; 2006. Resolução n. 210, de 13 de novembro de 2006. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. *Conselho Nacional de Trânsito*, Brasília.
- DEL MAR PHOTONICS; 2006. *Infrared Viewer ABRIS-M*. San Diego, California, USA. Disponível em [http://www.dmp Photonics.com/Infrared\\_Viewers/IR%20devices.pdf](http://www.dmp Photonics.com/Infrared_Viewers/IR%20devices.pdf). Acesso em 22 de jan. 2010.
- FELTY, T., 2005. Dynamic Time Warping. Disponível em <http://www.mathworks.se/matlabcentral/fileexchange/6516-dynamic-time-warping>. Acesso em 22 de jan. 2010.
- HUANG, Q.; XING, T.; LIU, H. T.; 2006. Vehicle Classification in Wireless Sensor Networks Based on Rough Neural Network. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3973 (May.), p. 58-65.
- JÚNIOR, Sylvio Barbon; 2007. *Dynamic Time Warping baseado na transformada wavelet*. São Carlos-SP. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física Aplicada) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- KLEIN, L. A.; MILLS, M. K.; GIBSON, D. R. P.; 2006. *Traffic Detector Handbook: Third Edition – Volume I*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Admin., McLean, VA,

- October 2006. Disponível em <http://www.tfhrcc.gov/its/pubs/06108/06108.pdf>. Acesso em 12 out. 2009.
- LI, G.; WANG, Y.; LI, M. *et al.*; 2008. Similarity match in time series streams under Dynamic Time Warping distance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND SOFTWARE ENGINEERING – CSSE 2008 (Dec. 2008: Wuhan, China). *Proceedings*. Wuhan. Vol. 4, p. 399-402.
- LI, J.; WANG, Y.; 2007. EA\_DTW: Early abandon to accelerate exactly warping matching of time series. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND KNOWLEDGE ENGINEERING – ISKE 2007 (Oct. 2007: Chengdu, China). *Proceedings*. Chengdu.
- LIMA, M. L. P.; 2009. Apostila da disciplina 04085 – Projetos de Estradas. Curso de Engenharia Civil. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2009.
- MICHALOPOULOS, P. G.; JACOBSON, R. D. *et al.*; 1993. “Integration of Machine Vision and Adaptive Control in the Fast-Trac IVHS Program,” 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., Jan. 1993.
- MIMBELA, L. E. Y.; KLEIN, L. A.; 2007. A summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems. The Vehicle Detector Clearinghouse, 2007. Disponível em <http://www.nmsu.edu/~traffic/Publications/Trafficmonitor/vdst.pdf>. Acesso em 12 out. 2009.
- MUSCILLO, R.; CONFORTO, S.; SCHMID, M. *et al.*; 2007. Classification of motor activities through Derivative Dynamic Time Warping applied on accelerometer data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY – EMBC 2007 (Aug. 2007: Lyon, France). *Proceedings*. Lyon. P. 4930-4933.
- REIJMERS, J.J.; 2006. Traffic Guidance Systems. Course ET4-024 – November, 2006.
- SALVADOR, S.; CHAN, P.; 2004. Fast-DTW: Toward accurate Dynamic Time Warping in linear time and space. In: KDD 2004 - 3<sup>rd</sup> WORKSHOP ON MINING TEMPORAL AND SEQUENTIAL DATA (Aug. 2004: Seattle, WA, USA). p. 70-80.
- SIEMENS; 1998. *BPW34F Datasheet: Silicon PIN Photodiode with Daylight Filter*.
- SKOLNIK, M. I.; 1962. *Introduction to radar systems*. 1. ed. McGraw-Hill.
- SMITH, D.; 2002. Handbook of simplified practice for traffic studies. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2002.

- SUN, B.; LI, J.; 2008. The recognition of new and old banknotes based on SVM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGY APPLICATION – IITA 2008 (Dec. 2008: Shanghai, China). *Proceedings*. Shanghai. Vol. 2, p. 95-98.
- TANG, Y.; 2008. Status of pattern recognition with wavelet analysis. *Frontiers of Computer Science in China*, vol. 2 (Sep.), no. 3, p. 268-294.
- TUZCU, V.; NAS, S.; 2005. Dynamic Time Warping as a novel tool in pattern recognition of ECG changes in heart rhythm disturbances. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS – SMC 2005 (Oct. 2005: Hawaii, USA). *Proceedings*. Hawaii. Vol. 1, p. 182-186.
- URAZGHILDIIEV, I.; RAGNARSSON, R.; RIDDERSTRÖM, P. *et al.*; 2007. Vehicle classification based on the radar measurement of height profiles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, New York, vol. 8 (Jun.), no. 2, p. 245-253.