

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica
Sergio Ferreira de Oliveira

**SENSOR DE PRESENÇA PARA SEMÁFORO
INTELIGENTE DE BAIXO CUSTO**

Taubaté – SP
2012

Sergio Ferreira de Oliveira

**SENSOR DE PRESENÇA PARA SEMÁFORO
INTELIGENTE DE BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso de Mestrado
Profissional em Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.
Área de Concentração em Automação.
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino.

**Taubaté – SP
2012**

SERGIO FERREIRA DE OLIVEIRA

SENSOR DE PRESENÇA PARA SEMÁFORO INTELIGENTE DE BAIXO CUSTO

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Área de Concentração: Automação.

Data:_____

Resultado:_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

UNITAU/UNESP

Assinatura _____

Prof. Dr. Pedro Paulo Leite do Prado

UNITAU

Assinatura _____

Prof. Dr. José Feliciano Adami

UNESP

Assinatura _____

Dedico este trabalho à minha família, em especial a minha esposa Elisangela e as meus filhos Bruna e Leonardo, pelo carinho e compreensão constantes.

Aos meus pais, José e Concheta.

AGRADECIMENTOS

A minha família fonte de minha inspiração e de minha dedicação.

Ao Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino pela atenção e dedicação na instrução das etapas necessárias para a conclusão deste trabalho, transmitindo confiança e segurança para a realização do mesmo.

Aos meus colegas de mestrado, pelo tempo que compartilhamos juntos.

Ao Instituto Federal de São Paulo, que viabilizou a parceria com a UNITAU.

Aos meus amigos de trabalho Marcelo, Rafael, Vitor, Sergio Araki e José Carlos pelo incentivo.

Ao Diretor Geral do Campus São Paulo Prof. Carlos Alberto Vieira.

Ao amigo Osmar da Rocha Simões pelo apoio.

“As Almas de todos os Homens são imortais, mas as Almas dos Homens justos são imortais e divinas.”

Sócrates.

RESUMO

Este trabalho destina-se a especificar, analisar e ensaiar um sensor de presença para um semáforo inteligente de baixo custo. O sensor tem por finalidade a redução dos custos de implantação e manutenção nos sistemas de controles dos semáforos inteligentes, quando comparado a outros sensores, tais como, por imagem, ultrassom, laser, infravermelho, pneumático ou indutivo. O princípio de funcionamento tem por base a detecção de veículos na região de aproximação das vias de uma interseção por meio de um sensor que gera um sinal elétrico para o sistema de controle de tráfego. Utilizando sensores de micro-ondas de efeito Doppler e um circuito detecção o sistema torna-se de fácil implantação nos cruzamentos das vias públicas, por possuir tamanho reduzido, facilidade de programação e baixo consumo de energia, atendendo, portanto a necessidade de sistemas sustentáveis. Por motivo de segurança, ao ser iniciado ou reiniciado devido a falta de energia elétrica, o sistema funciona de forma temporizada por dois ciclos completos, tempo suficiente para que seja possível a detecção de veículos pelos sensores.

Palavras Chave: Semáforo inteligente. Sensor de micro-ondas. Efeito Doppler. Controle de Tráfego.

ABSTRACT

This work aims to specify, analyze and test a presence sensor for an intelligent traffic light at low cost. The sensor is intended to reduce the costs of deployment and maintenance of control systems in intelligent traffic lights, when compared to other sensors such as imaging, ultrasound, laser, infrared, pneumatic or inductive. The operating principle is based on the detection of approaching vehicles in the region of an intersection roads by means of a sensor which generates an electrical signal to the control system traffic. Using sensors microwave Doppler Effect and a loop detection system becomes easy to deploy in the crossings of public roads, for having reduced size, ease of programming and low power consumption, light, therefore the need for sustainable systems. For security reasons, to be started or restarted due to power outages, the system works timed by two complete cycles, enough time to be able to detect vehicles by sensors.

Keywords: Intelligent traffic light. Microwave sensor. Doppler Effect. Traffic Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração dos tubos pneumáticos na via	24
Figura 2 – Anomalia no campo magnético induzido por dipolo magnético	25
Figura 3 – Perturbação do sinal causado pela massa metálica de um veículo	25
Figura 4 – Magnetômetro de fluxo bi-axial: Sistema SPVD	26
Figura 5 – Magnetômetro de indução	26
Figura 6 - Representação de um detector de laços indutivos	27
Figura 7 - Comunicação dos detectores de laços indutivos com o controlador central	28
Figura 8 - Diferentes saídas de dados para os detectores de laços indutivos	29
Figura 9 – Estrutura de um cabo piezoelétrico	30
Figura 10 – Sensor piezoelétricos instalado na via	31
Figura 11 - Sensor piezoelétricos instalado na via	31
Figura 12 – Sistema sensor por fibra óptica	33
Figura 13 - Detector ultrassônico	34
Figura 14 - Detector de infravermelho passivo	35
Figura 15 - Detector infravermelho ativo	36
Figura 16 - Processador de Imagens de Vídeo	37
Figura 17 - Radar micro-ondas em operação	38
Figura 18 – Projeção da área de cobertura na via	39
Figura 19 – Amostragem e quantização	47
Figura 20– Imagem em diferentes resoluções	48
Figura 21 – Leitura dos pixels do sensor <i>CCD</i>	50
Figura 22 – Leitura dos pixels do sensor <i>CMOS</i>	51
Figura 23 – Entrelaçamento das linhas de vídeo ímpares e pares	53
Figura 24 - Sinal de linha horizontal	53
Figura 25 - Sinal de pulso <i>Vsync</i>	54
Figura 26 – Circuito para captura da imagem	56
Figura 27 – Diagrama de captura de laço virtual do quadro	57
Figura 28 – Diagrama dos algoritmos de captura, limiarização e comparação	58
Figura 29 – Limiar (<i>T</i>) de uma imagem monocromática	59
Figura 30 – Imagem original 640 <i>pixels</i> por 480 linhas de 8 bit e 300 kbytes	60
Figura 31 – Imagem com as linhas ímpares 640 <i>pixels</i> por 240 linhas de 8 bits e 150 kbytes	60
Figura 32 – Detecção por laço virtual	61
Figura 33 – Fluxograma do algoritmo de limiarização	61
Figura 34 - Sensor fixado no semáforo	64
Figura 35 - semáforo e sensor na via	64
Figura 36 - Área de cobertura do sensor na via	65
Figura 37 - Diagrama de fluxo do sistema de controle	70
Figura 38 – Campo elétrico e campo eletromagnético de uma onda	72
Figura 39 - Frequência emitida (f_0) e frequência recebida (f_d)	74
Figura 40 – Placa de circuito impresso do Sensor de micro-ondas	75
Figura 41 – Diagrama de blocos do circuito de detecção do sensor	76
Figura 42 – Filtro Passa Baixas	77
Figura 43 – Simulação do circuito de detecção	78
Figura 44 – Propriedades do gerador de sinal	79

Figura 45 – Propriedades do gerador de sinal	79
Figura 46 – Propriedades do gerador de sinal	80
Figura 47– Sinal de detecção de veículo na saída (<i>OUT</i>)	81
Figura 48 – Circuito de detecção	82
Figura 49 – Sinal de saída do circuito de detecção sem a presença de veículos.....	83
Figura 50 – Detecção de uma motocicleta na via	84
Figura 51 – Detecção de um veículo na via.....	84

TABELA

Tabela 1 – Av. Pompéia entre Marginal do rio Tietê/Av. Heitor Penteado (Adaptado de Bittencourt, 2001).....	19
Tabela 2 - Semáforos de Tempos Fixos (DENATRAN, 1984)	21
Tabela 3 - Semáforos por demanda de tráfego (Homburger <i>et al.</i> , 1992)	22
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)	40
Tabela 5 - Tipos de dados fornecidos por diferentes tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006).....	45
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens dos sensores de imagem	51
Tabela 7 – Quantidade e tipos de veículos detectados	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

PIC - Programmable Interface Controller (Controlador de Interface Programável)

LISTA DE SÍMBOLOS

V – tensão

MHz – megaHertz

c – Velocidade da Luz

Hz – Hertz

λ – Comprimento de Onda

f – frequência

km/s – kilometro por segundo

cm – centímetro

dBm – Decibel milliwatt

m – metro

m/s – metro por segundo

dBi – Decibel isotropic

EIRP – Equivalent isotropically radiated power

dB – Decibel

SNR – Signal-to-noise ratio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	19
2. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO	20
2.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE TRÁFEGO	20
2.2 TIPOS DE CONTROLADORES DE SEMÁFORO	21
2.2.1 CONTROLADOR DE TEMPO FIXO.....	21
2.2.2 CONTROLADOR POR DEMANDA DE TRÁFEGO	22
3. DETECTORES DE PRESENÇA	23
3.1 DETECTORES NA VIA	23
3.1.1 TUBOS PNEUMÁTICOS	23
3.1.2 SENSORES MAGNÉTICOS	25
3.1.3 DETECTORES DE LAÇOS INDUTIVOS	27
3.1.4 DETECTORES PIEZOELÉTRICOS.....	30
3.1.5 DETECTORES DE FIBRA ÓPTICA	32
3.2 DETECTORES ACIMA DA VIA	33
3.2.1 DETECTORES PASSIVOS ACÚSTICOS.....	33
3.2.2 DETECTORES ULTRASSÔNICOS.....	34
3.2.3 DETECTORES INFRAVERMELHOS	35
3.2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE VÍDEO	37
3.2.5 RADAR MICRO-ONDAS	38
3.3 COMPARAÇÕES ENTRE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO	39
3.4 SENSORES DE IMAGEM.....	46
3.4.1 IMAGEM DIGITAL.....	46
3.4.1.1 SENSORES EM ESTADO SÓLIDO.....	49
3.4.1.1.1 SENSORES <i>CCD</i>	49
3.4.1.1.2 SENSORES <i>CMOS</i>	50
3.4.1.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS SENSORES <i>CCD</i> E <i>CMOS</i>	51
3.4.2 IMAGEM ANALÓGICA.....	52
4. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE PRESENÇA	63

4.1 FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE MICRO-ONDAS	63
4.2 DIAGRAMA DE FLUXO	68
4.3 RECURSOS DO SISTEMA.....	71
4.4 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE PRESENÇA	71
4.5 SELEÇÃO DO SENSOR DE PRESENÇA.....	71
4.5.1 SENSOR DE MICRO-ONDAS.....	72
4.6 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO	78
5. RESULTADOS	82
6. CONCLUSÃO.....	86
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE A - Sensor de micro-ondas MDU 1720	91

1. INTRODUÇÃO

O trânsito nas grandes cidades torna-se cada vez mais intenso devido ao aumento do número de veículos e da dificuldade de readequação das vias urbanas exigindo altos investimentos financeiros, além dos transtornos causados durante a sua execução, passando pelo remanejamento do trânsito por vias secundárias, aumento do número de acidentes, uma maior emissão de gases poluentes, aumento no tempo de viagem e de combustível devido ao novo trajeto, mais longo (CAMPOS, 1982).

A utilização de sistemas de controle inteligente de tráfego, semáforos inteligentes, em uma ou mais intersecções, mesmo restritos a uma determinada área, produzem de uma maneira geral um aumento da velocidade média, reduzindo o tempo de locomoção e melhorando as condições do tráfego na região (MING e POWLER, 1998).

O uso dos sensores de presença é primordial nos sistemas de controle inteligente de tráfego, fornecendo informação em tempo real das vias monitoradas, permitindo ao sistema acompanhar as flutuações aleatórias do tráfego, melhorando o desempenho e mantendo o fluxo do trânsito constante. Este trabalho discute a utilização de um sensor de micro-ondas de efeito Doppler na detecção de veículos em uma intersecção, como parte primordial de um sistema de controle de tráfego, semáforo inteligente.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo propor um sensor de presença para um sistema de controle de semáforo inteligente de baixo custo, já estudado anteriormente por Arantes (2010).

O sensor trabalha em ambiente externo, estando sujeito às intempéries e em período ininterrupto. Essas características implicam a necessidade de robustez e de capacidade de adaptação às mais diversas situações ambientais, tais como, noite, dia, chuva, neblina, entre outras, sob as quais o sensor tem que operar.

Sua calibração no local de instalação deve ser mínima, restringindo-se a parâmetros que são peculiares da interseção em que será instalado.

1.2 JUSTIFICATIVA

É muito comum a busca por alternativas de baixo custo e sustentáveis como solução para a melhoria das infraestruturas já existentes e a introdução de novas tecnologias de controle e manutenção dos sistemas de tráfego nas interseções para a redução de conflitos, dos níveis de congestionamento e o do aumento da segurança.

Um aspecto importante neste caso refere-se à segurança das interseções no período da madrugada. Na cidade de São Paulo entrou em vigor a Lei Municipal 13.332 de 2002 que regulamenta a utilização do amarelo intermitente em todos os cruzamentos que não acarretem periculosidade ao trânsito de veículos, visando à segurança e a redução do tempo de espera nos semáforos. Esse recurso seria desnecessário com a implantação de semáforos inteligentes.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As cidades enfrentam uma nova realidade, com uma diversidade de novas expectativas e necessidades, demandando de todos os setores da economia uma elevada flexibilidade e capacidade de adaptação. Na cidade de São Paulo as principais vias mostram-se saturadas em grande parte do dia e os congestionamentos têm início cada vez mais cedo.

Segundo Christianini e Hagiwara (2008), o crescimento da frota de veículos nos grandes centros urbanos foi mais rápido do que as medidas de adequação da malha viária. Essa readequação exige altos investimentos financeiros, além dos transtornos causados durante a sua execução, passando pelo remanejamento do trânsito por vias secundárias, aumento do número de acidentes, uma maior emissão

de gases poluentes, aumento no tempo de viagem e de combustível devido ao novo trajeto, mais longo.

O IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) estimou em 1998 que, nas 10 grandes cidades brasileiras, os prejuízos gerados pelos congestionamentos atingiam o valor de R\$ 474 milhões por ano (BRASIL, 1997).

O controle semaforizado de tráfego surgiu devido à necessidade de melhorar a fluidez e as condições de segurança em locais onde o volume de veículos e pedestres tornou-se significativamente grandes.

As tecnologias de controle de tráfego têm como finalidade, coletar e processar dados reduzindo assim os níveis de congestionamento (SÁ, 1999). Esse tipo de controle propicia uma série de benefícios como, redução dos tempos de viagem, redução de poluição atmosférica, economia de combustível e outros benefícios que, conseqüentemente, resultam na melhoria da qualidade de vida nas áreas urbanas.

Webster e Cobbe (1996) indicam três motivos como os principais para a implantação de semáforos: diminuir conflitos, reduzir acidentes e economizar tempo.

A literatura técnica dispõe de vários métodos que orientam sobre a necessidade da implantação da sinalização por meio de semáforos. Em sua maioria esses métodos são definidos pelo órgão gestores de tráfego (VILANOVA, 2007).

Segundo Roess, Mc Shane e Prassas (1998), os primeiros sistemas de controle de tráfego computadorizado foram implantados na década de 60, na Europa, Estados Unidos e Canadá. Esse sistema teve início em 1963 em Toronto, no Canadá envolvendo 864 interseções.

No Brasil o controle de tráfego desenvolveu-se na década de 70, por iniciativas da Companhia de Engenharia de Tráfego do Município de São Paulo (CET/SP), inspirada na experiência de outros países. No início utilizaram-se equipamentos eletromecânicos de tempo fixo. Posteriormente incluiu-se a implantação de equipamentos centralizados importados, com programações há tempos fixos.

Segundo Ming e Powler (1998) a implantação de semáforos inteligentes nas vias urbanas permite uma melhora significativa nos tempos de percurso, e há um aumento na velocidade média dos veículos.

Bittencourt (2001) realizou uma pesquisa “antes/depois” da implantação de um semáforo inteligente na Av. Pompéia na cidade de São Paulo no percurso ente a Marginal do rio Tietê e a Av. Heitor Penteado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Av. Pompéia entre Marginal do rio Tietê/Av. Heitor Penteado (Adaptado de Bittencourt, 2001)

	Tempo de Percurso (minuto)			Velocidade Média (km/h)			Fluxo Veicular (Veículos por hora)		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Manhã	9,37	5,96	-36%	12,07	18,95		2177		10
Entre pico ¹	5,17	4,42	-15%	21,86	25,57		-	-	-
Tarde	4,75	3,80	-20%	23,79	29,70		1664	1613	-3

1 – Intervalo de tempo entre o período da manhã e da tarde.

A capacidade de adaptação e de controle de um semáforo inteligente na variação da demanda de tráfego da via pode ser observado. Como uma melhoria sensível nas condições do tráfego na intersecção. Essa melhoria é observada na diminuição do tempo de percurso, no aumento da velocidade média e do fluxo de veículos.

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esse trabalho está organizado em 6 capítulos.

Capítulo 1 – Neste capítulo é feita a introdução e a apresentação do objetivo, a justificativa, a revisão bibliográfica e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – São apresentados os dispositivos empregados no controle de tráfego: semáforo de tempos fixos e inteligentes sua finalidade e funcionamento.

Capítulo 3 – Apresenta os tipos, funcionamento e aplicações dos detectores de presença.

Capítulo 4 – Descreve o funcionamento do circuito.

Capítulo 5 – Apresenta os resultados.

Capítulo 6 – São apresentadas a conclusão final da pesquisa e as sugestões para trabalhos posteriores.

2. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO

O sistema de controle de tráfego surgiu devido à necessidade de melhorar as condições de circulação e fluidez em uma interseção de vias urbanas por meio dos semáforos.

A finalidade da sinalização semafórica é transmitir aos usuários a informação sobre o direito de passagem em interseções e seções da via, garantido sua segurança, e advertindo sobre movimentos conflitantes que possam ocorrer (MUNHOZ, 1978).

2.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE TRÁFEGO

De acordo com Roess, Mc Shane e Prassas (1998), o sistema de tráfego é composto por:

- Motorista;
- Veículo;
- Via;
- Meio ambiente;
- Dispositivos de controle.

Cada um desses componentes interage e influencia o tráfego.

O motorista devido as suas características de tempo de reação, limites de visão e percepção, além do nível de atenção. Essas características sofrem variações e são identificáveis como exemplo: a idade. Outras são aleatórias como stress, sono e cansaço.

Os veículos também possuem características próprias, tais como, raio de giro, aceleração e desaceleração, além das condições gerais de manutenção. Como exemplo pode-se citar os caminhões e ônibus que possuem uma retomada de aceleração mais lenta devido ao seu tamanho e peso. O sistema viário pode apresentar inclinações, curvas, etc. O meio ambiente, por sua vez, agrega ao sistema características a via, tais como, pavimento molhado dificultando a frenagem, baixa visibilidade (neblina, noite, etc.) dificultando a visão. Os dispositivos de

controle (semáforos, sinais no solo e placas de regulamentação) devem estar bem localizados e serem devidamente dimensionados para atender assim os mais diversos tipos de motorista.

O conhecimento dos componentes do tráfego, de suas características e como interagem entre si, permite determinar o melhor método de controle de uma intersecção. Nesse caso, utilizando-se semáforos, o fluxo de veículos torna-se mais eficiente. A utilização dos detectores de presença mantém a programação do sistema de controle sempre próxima da ideal, acompanhando a flutuação aleatória do tráfego, de forma instantânea (SZASZ, 1997).

2.2 TIPOS DE CONTROLADORES DE SEMÁFORO

Basicamente existem dois tipos de controladores de tráfego: o controlador de tempo fixo e o controlador por demanda de tráfego (DENATRAN, 1984).

2.2.1 CONTROLADOR DE TEMPO FIXO

Os controladores de tempo fixo possuem seus ciclos programados de forma rígida, com dados coletados feitos em levantamento de campo, mantendo, indiferentemente do volume de tráfego, sempre os mesmos tempos de verde, amarelo e vermelho, sendo normalmente instalados em interseções com o volume de tráfego previsível. Os semáforos de tempos fixos possuem vantagens e desvantagens, conforme apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Semáforos de Tempos Fixos (DENATRAN, 1984)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Sua programação é simples. - Baixo custo de implantação e operação. - Quando programado de forma eficiente, possui desempenho satisfatório. 	<ul style="list-style-type: none"> - Seus planos se elaborados de forma incorreta podem gerar atrasos excessivos. - Requer coleta de dados periódicos para assegurar seu desempenho, acarretando

Tabela 2 - Semáforos de Tempos Fixos (DENATRAN, 1984)

Continuação

	em custos elevados. - Ineficaz para locais que sofrem grandes variações de volume.
--	---

2.2.2 CONTROLADOR POR DEMANDA DE TRÁFEGO

O controle por demanda de tráfego, ou semáforo inteligente é utilizado em interseções onde as variações do volume de veículos não são cíclicas, sofrendo mudanças significativas e aleatórias em seu volume no decorrer do dia. Por meio de sensor instalado no trecho de aproximação da via, o controlador é capaz de mensurar o volume do tráfego e assim definir a estratégia de controle do trânsito mais apropriada para aquele momento (SZASZ, 1997).

Segundo Homburger *et al.* (1992), os semáforos atuados pelo tráfego ou inteligentes, agregam no meio onde se encontram uma série de benefícios conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Semáforos por demanda de tráfego (Homburger *et al.*, 1992)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Normalmente reduz o atraso. - Adapta-se às flutuações do tráfego e à capacidade do escoamento de filas. - Aumento de capacidade (acréscimo de verde). - Opera em condições de baixo fluxo. - Eficiente em intersecções de múltiplos estágios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo de instalação maior em relação ao semáforo de tempo fixo. - Os detectores possuem um custo maior de instalação e manutenção.

Segundo Clowes (1986), os sistemas com detectores de presença serão a solução adotada no futuro, por trabalharem em malha fechada, necessitando de poucas intervenções manuais de operadores especializados, reduzindo os custos de manutenção e de análise técnica para a reconfiguração do sistema.

3. DETECTORES DE PRESENÇA

Os detectores de presença ou sensores podem ser definidos como dispositivos eletrônicos, mecânicos ou eletromecânicos, utilizados para detectar, medir ou gravar fenômenos físicos tais como calor, radiação etc. (SANTOS, 2006).

Passos (2002) define sensores como dispositivos capazes de detectar movimentos e ações que ocorrem em um determinado processo. Pode-se dizer que são elementos encarregados de gerar informações para sistemas de automação e que diferem entre si, em formato e segundo sua aplicação, sendo, portanto específico para cada tipo de atividade.

De acordo com a *Federal Highway Administration* (FHWA, 2006) e Henry e Recker (2003) a tecnologia mais comum para a detecção de veículos são os detectores por laços indutivos. Porém, eles possuem algumas desvantagens que motivaram a busca por tecnologias alternativas.

Os detectores de veículos podem ser classificados em dois grupos: detectores na via e detectores acima da via.

3.1 DETECTORES NA VIA

Um detector situado na via está embutido no pavimento ou está preso na superfície da via (FHWA, 2006). Entre os detectores na via estão o tubo pneumático, sensor magnético, laços indutivos, detectores piezelétricos e sensores de fibra óptica.

3.1.1 TUBOS PNEUMÁTICOS

A detecção de veículos por tubos pneumáticos foi introduzida na década de 20. Devido ao baixo custo e facilidade de instalação. Os sensores de tubos pneumáticos enviam um pulso de pressão de ar ao longo de um tubo de borracha quando os pneus dos veículos passam sobre esse tubo. O pulso aciona o contato de

uma chave, produzindo um sinal elétrico que é transmitido a um contador ou a um *software* de análise.

Estes detectores são instalados perpendicularmente ao fluxo de tráfego e são comumente usados para contagens de tráfego de curto período, e para classificação de veículos por contagem de eixos, conforme ilustra a Figura 1.

Alguns modelos coletam dados para o cálculo de *gaps*, atrasos, taxa de fluxo de saturação, velocidade pontual em função da classe do veículo ou tempo de viagem (FHWA, 2006).

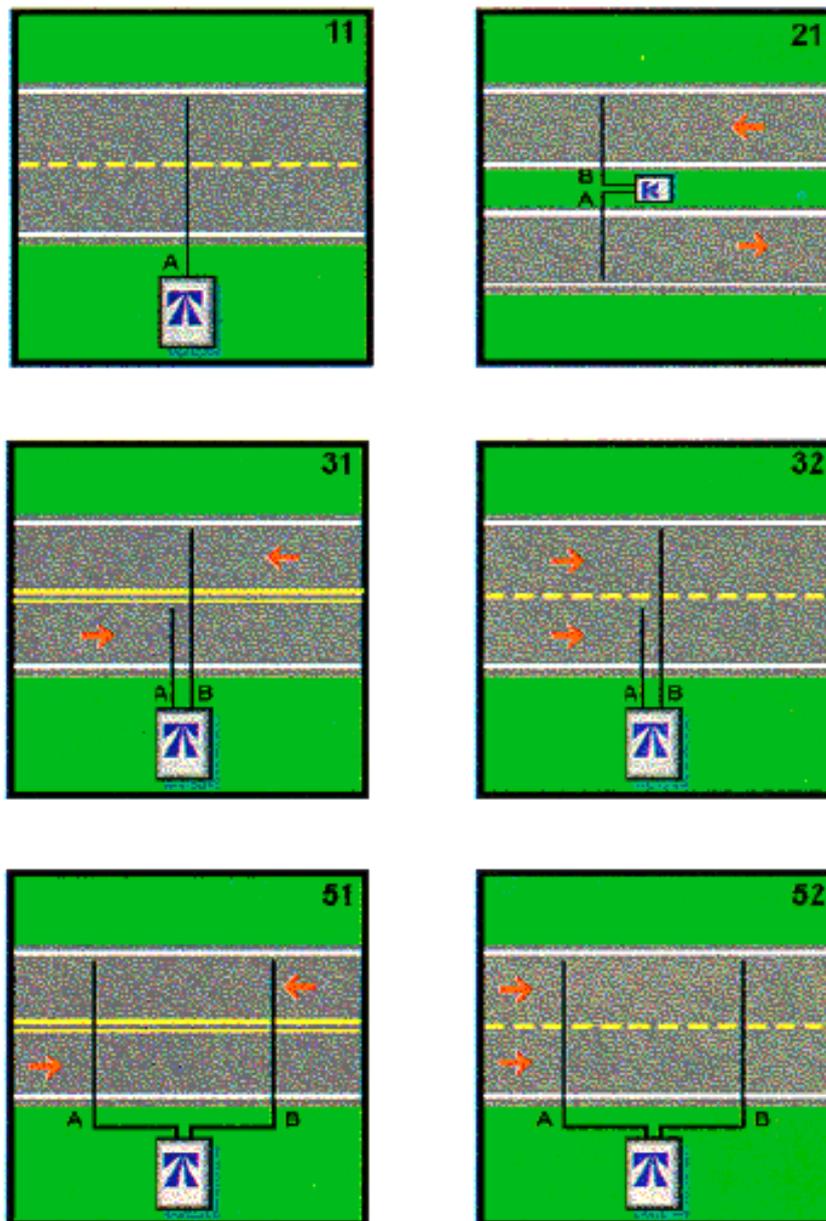


Figura 1 - Configuração dos tubos pneumáticos na via

Fonte: DNIT (2007)

3.1.2 SENSORES MAGNÉTICOS

Os sensores magnéticos operam pelo princípio da perturbação que um grande objeto de metal causa em um campo magnético. Eles indicam a presença de objetos metálicos pela detecção de perturbações no campo magnético da Terra, criadas pelo objeto, conforme Figura 2 e Figura 3.

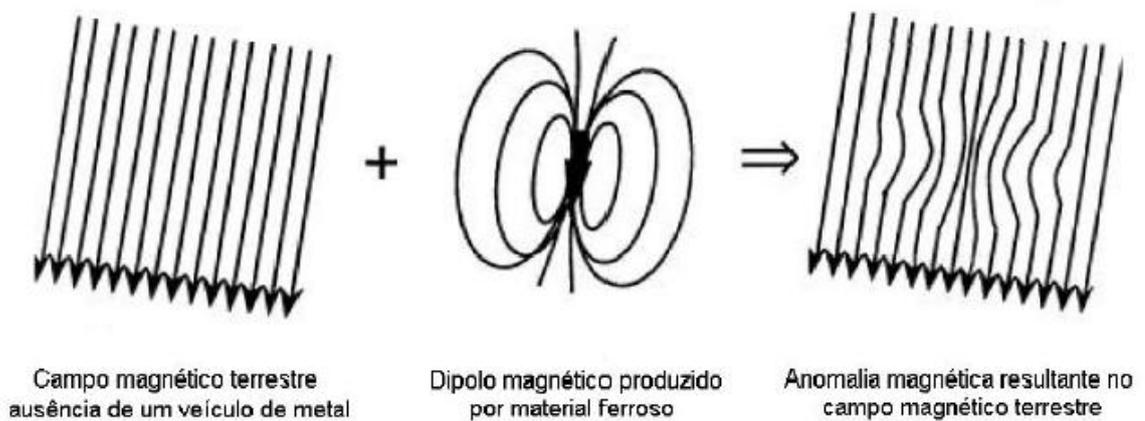


Figura 2 – Anomalia no campo magnético induzido por dipolo magnético

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

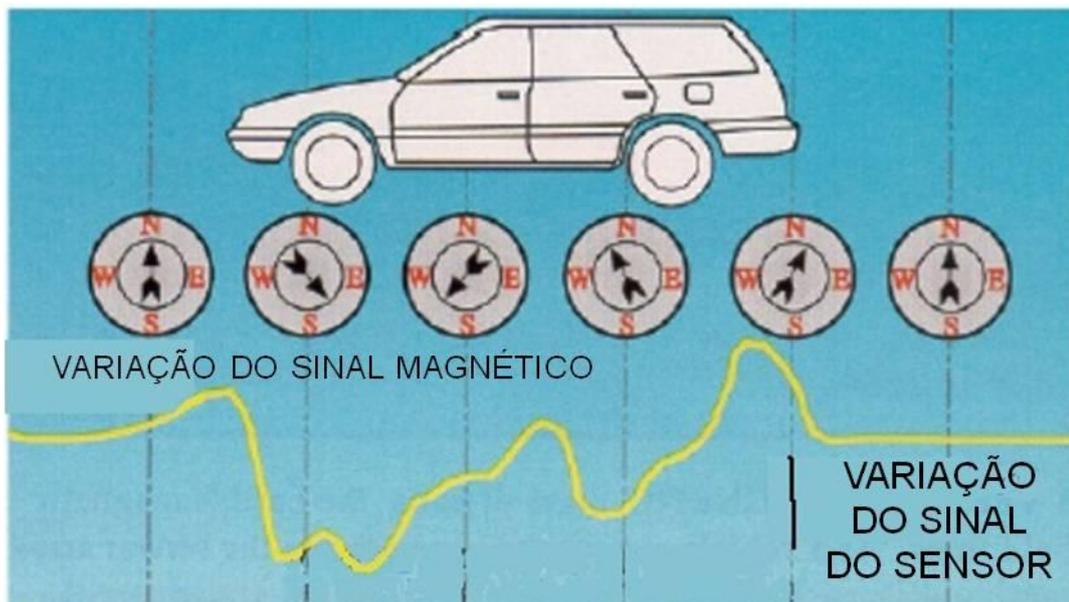


Figura 3 – Perturbação do sinal causado pela massa metálica de um veículo

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

Dois tipos de sensores magnéticos são usados para a medição de parâmetros do tráfego, os sensores ativos e os passivos (FHWA, 2006). Os sensores, mostrados na Figura 4, ativos (também chamados de *Two-axis fluxgate magnetometers*) são capazes de detectar presença e passagem de veículos.



Figura 4 – Magnetômetro de fluxo bi-axial: Sistema SPVD

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

Já os sensores passivos, mostrados na Figura 5, são usualmente conhecidos como magnetômetros de indução e só podem detectar veículos em movimento, sendo assim eles não podem ser usados como detectores de presença.



Figura 5 – Magnetômetro de indução

Fonte: FHWA (2006)

3.1.3 DETECTORES DE LAÇOS INDUTIVOS

O detector de laço indutivo consiste em uma ou mais voltas de um fio isolado inserido dentro do pavimento da via e ligado a uma caixa de controle, conforme mostrado na Figura 6. Quando um veículo para ou passa sobre o laço, a indutância do laço diminui, o que ocasiona um aumento na frequência de oscilação, indicando a presença ou a passagem de um veículo e gerando um pulso para a unidade eletrônica de controle (FHWA, 2006).

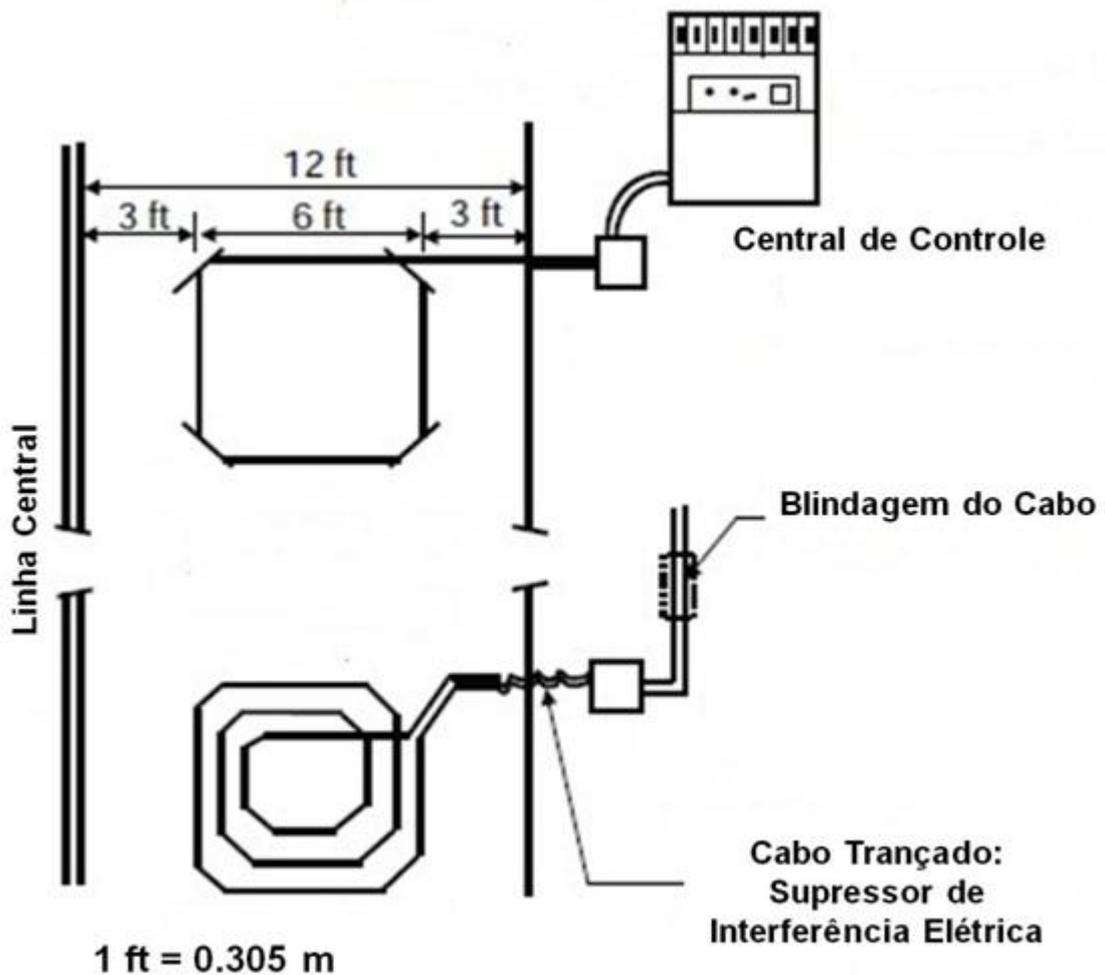


Figura 6 - Representação de um detector de laços indutivos

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

Quando instalados em interseções semaforizadas, os detectores de veículos são interligados aos controladores semaforicos para que os dados coletados por esses detectores possam ser armazenados e transmitidos a um controlador central

que efetua o controle do tráfego. A Figura 7 mostra os detectores de laços indutivos ligados ao controlador central de uma interseção.

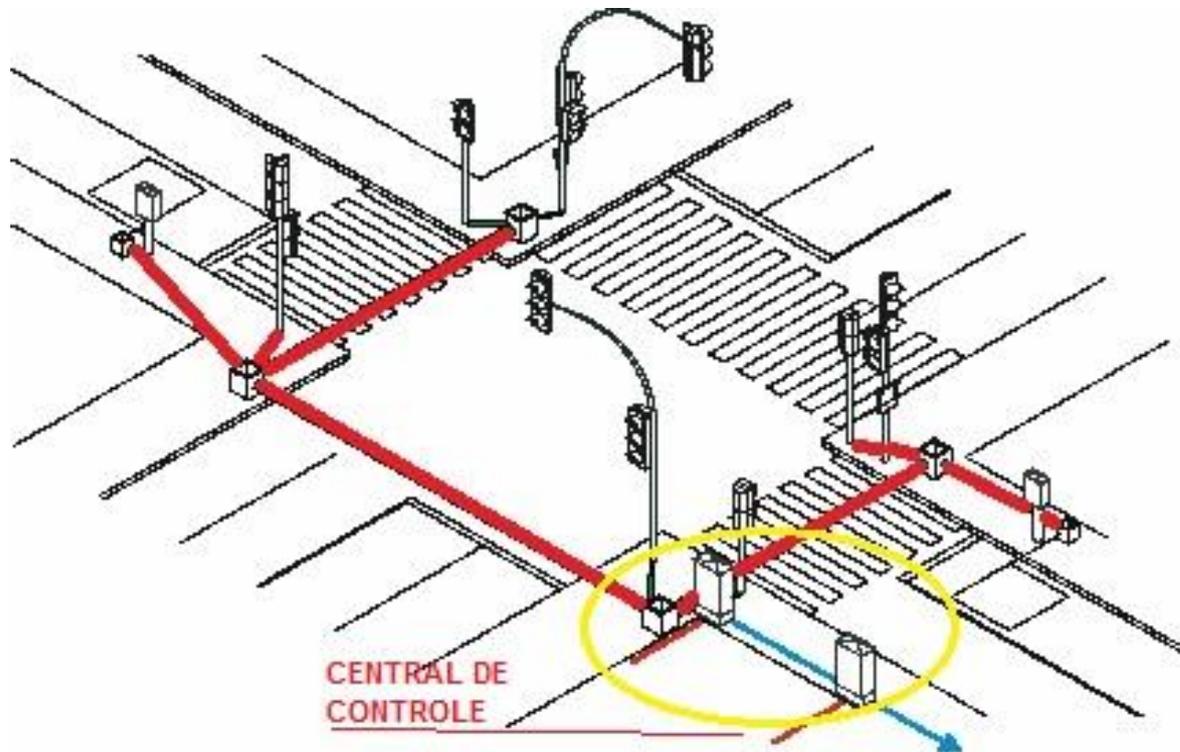


Figura 7 - Comunicação dos detectores de laços indutivos com o controlador central

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

Os dados de tráfego em tempo real são essenciais para o controle do tráfego e de gerenciamento de sistemas e os detectores de laço indutivo são fontes valiosas desses dados. Já foi a forma mais popular de dispositivos de detecção de veículos. Em muitas redes de vias expressas, são empregados laços indutivos para coletar dados de volume (número de veículos passando por unidade de tempo) e taxa de ocupação (a fração do intervalo de tempo total no qual o laço está ocupado por veículos). Esses dados têm sido fontes valiosas para o planejamento de transportes e para o controle de tráfego (WANG e NIHAN, 2003).

Os atuais desenvolvimentos em *Advanced Traffic Management Systems* (ATMS) exigem dados precisos de velocidade e de classificação dos veículos, os quais não podem ser obtidos por um único detector de laço indutivo. O meio encontrado para se obter os dados de velocidade e classificação de veículos, foi o emprego de detectores de laço indutivos instalados aos pares.

Apesar de os detectores duplos fornecerem dados de velocidade e dados de classificação de veículos, há poucos deles nos atuais sistemas de vias expressas para atender as necessidades dos ATMS, e o custo de substituição de um detector simples por um duplo é alto. Portanto, os detectores duplos são muito menos empregados para fornecer dados para o controle de tráfego do que os detectores simples. Por estas razões vários pesquisadores têm buscado obter dados de velocidade e de classificação de veículos a partir de detectores simples, por meio da melhoria dos algoritmos de detecção (WANG e NIHAN, 2003).

A Figura 8 ilustra diferentes formas de obtenção dos dados dos detectores de laços indutivos.

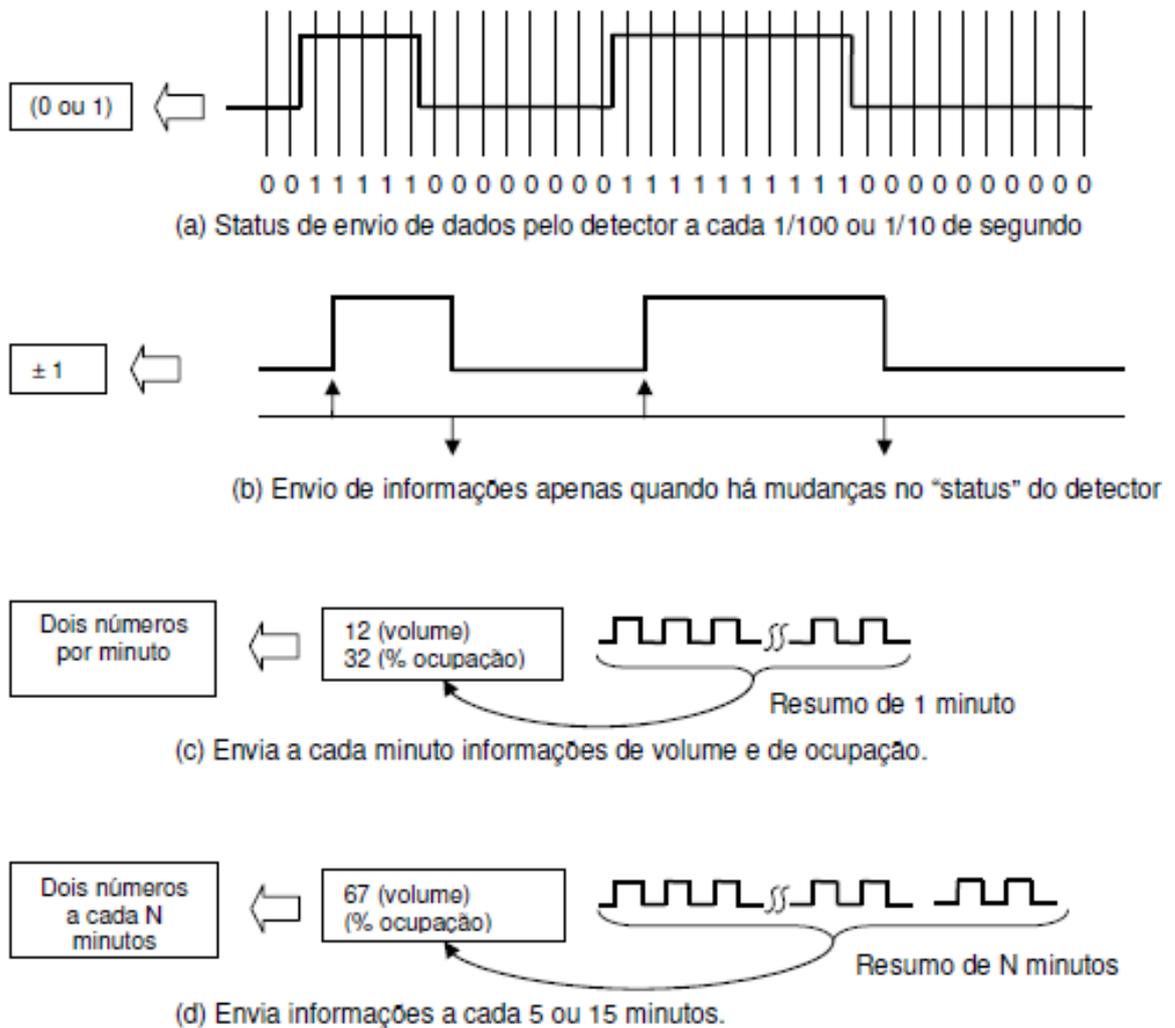


Figura 8 - Diferentes saídas de dados para os detectores de laços indutivos

Fonte: Roess, Mc Shane e Prassas (1998)

Conforme ilustrado na Figura 8, o intervalo de agregação dos dados enviados pelo detector pode variar de centésimos de segundos a 15 minutos, dependendo do tipo de utilização será a contagem de veículos ou somente sua detecção.

3.1.4 DETECTORES PIEZOELÉTRICOS

Materiais piezoelétricos convertem energia cinética em energia elétrica e geram uma tensão quando sujeitos ao impacto mecânico da vibração. Cargas elétricas de polaridades opostas aparecem no exterior das faces do material e induzem uma tensão. A tensão medida é proporcional à força ou ao peso dos veículos. A magnitude do efeito piezoelétrico depende da direção da força em relação aos eixos do cristal. Uma vez que o efeito piezoelétrico é dinâmico a carga é gerada apenas quando as forças estão mudando. A carga inicial irá decair se a força permanecer constante (FHWA, 2006). Um cabo piezoelétrico é composto por um cabo coaxial com um núcleo de metal, seguido pelo material piezoelétrico e uma camada externa de metal (HALVORSEN, 1999) conforme mostra a Figura 9.

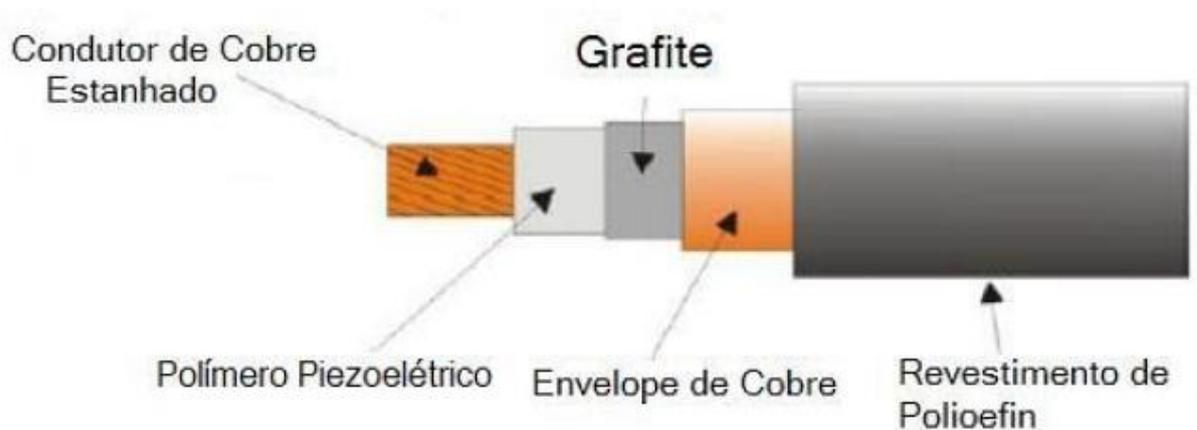


Figura 9 – Estrutura de um cabo piezoelétrico

Fonte: Halvorsen (1999)

Os sensores piezoelétricos são utilizados para classificar veículos por contagem de eixos e espaçamento para medir o seu peso e velocidade. Eles são

frequentemente usados como uma parte dos sistemas de pesagem em movimento (*weigh-in-motion*) e instalados sob a via, conforme Figura 10 e Figura 11.

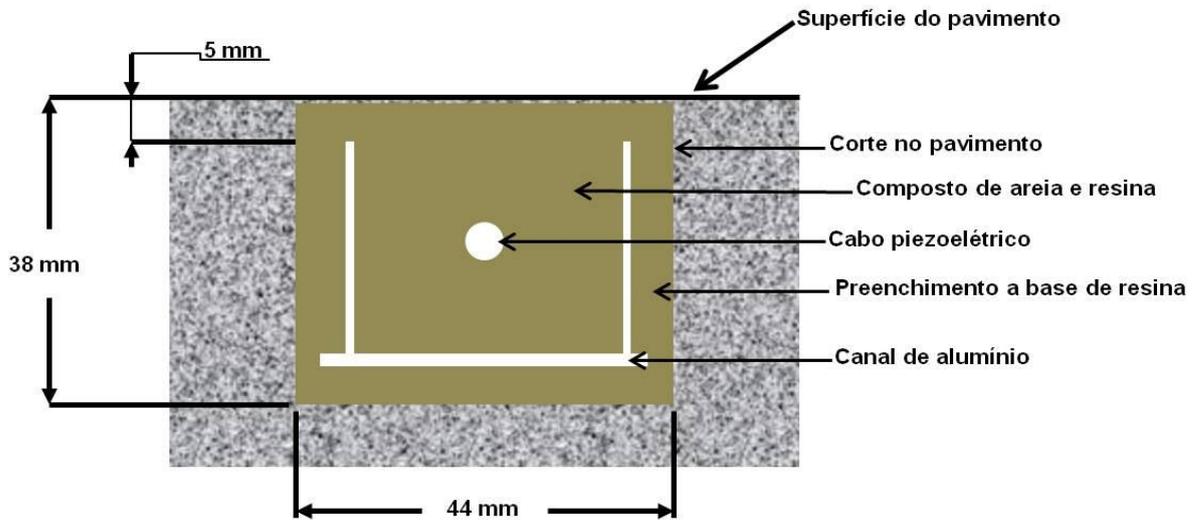


Figura 10 – Sensor piezoelétricos instalado na via
Fonte: Adaptado DNIT (2007)

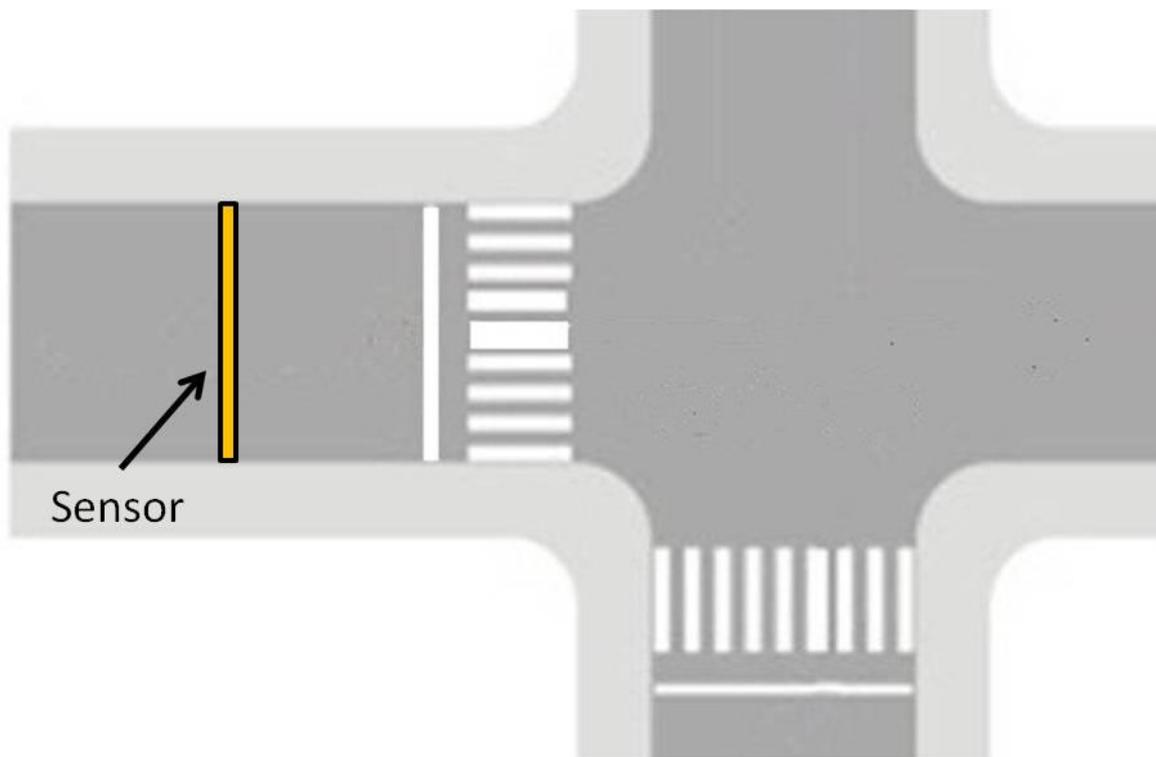


Figura 11 - Sensor piezoelétricos instalado na via

Os sensores piezoelétricos de classe I detectam e pesam eixos, enquanto os de classe II apenas detectam o eixo. Há tipicamente uma vantagem de preço comparando-se os sensores de classe II para aplicações que não sejam *weigh-in-*

motion, embora o custo total de instalação de alguns sensores de classe I seja apenas parcialmente maior do que o custo dos sensores de classe II de mesmo comprimento (FHWA, 2006).

3.1.5 DETECTORES DE FIBRA ÓPTICA

Os detectores de fibra óptica usam algumas propriedades mensuráveis da luz, como sua intensidade, fase e polarização das ondas de luz para medir os parâmetros desejados como temperatura, pressão, tensão, etc. Usualmente, a potência pode ser medida em função de outros parâmetros, como o tempo, posição e comprimento de onda.

Os principais componentes de um sensor de fibra óptica são: fibra óptica, fonte de luz e detector óptico.

Segundo Safaal-Jazi, Ardekani e Mehdikhani (1990) distúrbios externos como pressão, variações de temperatura, presença de campos elétricos, etc., perturbam o meio de transmissão de alguma maneira, modificando as propriedades da luz. Os parâmetros ambientais de importância para o monitoramento do tráfego são tensão e pressão, uma vez que estes parâmetros podem ser usados para detecção de presença e peso individual de eixos e, em alguns casos, o peso dos veículos e dos eixos das suas rodas. Essas duas informações podem ser usadas para determinar informações de velocidade e classificação.

Uma das formas utilizada para a detecção de veículos é a sensibilização por amplitude. Dois pratos ondulados, conhecido como deformadores pressionam a fibra óptica, conforme a Figura 12.

A deformação causará novos modos de propagação por onde a luz será redistribuída. Ao mesmo tempo, parte da potência luminosa será transferida dos modos guiados para modos não confinados, modos que trafegam pelo revestimento da fibra e se dissipam. A luz que trafega pelos modos não confinados causa perda de intensidade, que indica a pressão das rodas do veículo sobre o sensor (SAFAAI-JAZI, ARDEKANI e MEHDIKHANI, 1990).

Outros tipos de sensores de fibra óptica podem fornecer classificação dos veículos e podem ser usados para aplicações *weigh-in-motion* (FHWA, 2006).

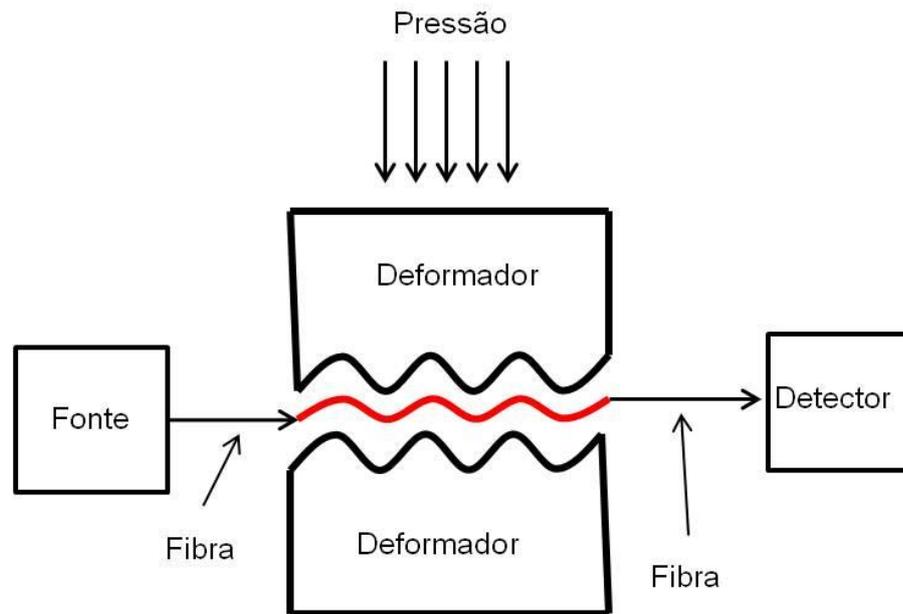


Figura 12 – Sistema sensor por fibra óptica

Fonte: Adaptado FHWA (2006)

3.2 DETECTORES ACIMA DA VIA

Os detectores acima da via são instalados em postes ou estão instalados às margens da faixa de tráfego. A instalação de detectores acima da via não necessita do fechamento da via durante sua instalação ou manutenção, minimizando interrupções no tráfego. Entre os detectores acima da via estão os acústicos, ultrassônicos, infravermelhos, processamento de imagens de vídeo e micro-ondas.

3.2.1 DETECTORES PASSIVOS ACÚSTICOS

O tráfego de veículos produz energia acústica por uma variedade de fontes, pelos veículos e pela interação de suas rodas com a superfície da via.

Quando um veículo passa pela zona de detecção, o sistema de processamento de sinal detecta, por meio de microfones especiais, um aumento na energia sonora e um sinal de presença de veículo é gerado. Quando o veículo deixa

a zona de detecção, a energia sonora diminui abaixo do limiar de detecção e o sinal de presença é finalizado (MORAIS, 1999).

3.2.2 DETECTORES ULTRASSÔNICOS

Um detector de presença ultrassônico transmite energia ultrassônica na forma de pulsos. As medidas de tempo que levam para que o pulso deixe o detector, atinja a superfície e retorne ao detector são proporcionais à distância entre o detector e a superfície. Uma porta de detecção é configurada para identificar a distância à superfície da via e inibir a detecção do sinal da própria via. Quando um veículo entra na área de cobertura, a distância do detector ao alto do veículo diminui, fazendo com que o detector produza um sinal de detecção do veículo (MORAIS, 1999).

Estes detectores podem ser projetados para receber dados de distância e velocidade (pelo princípio Doppler). Contudo, os mais destacados e baratos detectores ultrassônicos são aqueles que medem distâncias para fornecer dados de passagem e presença de veículos (Figura 13).

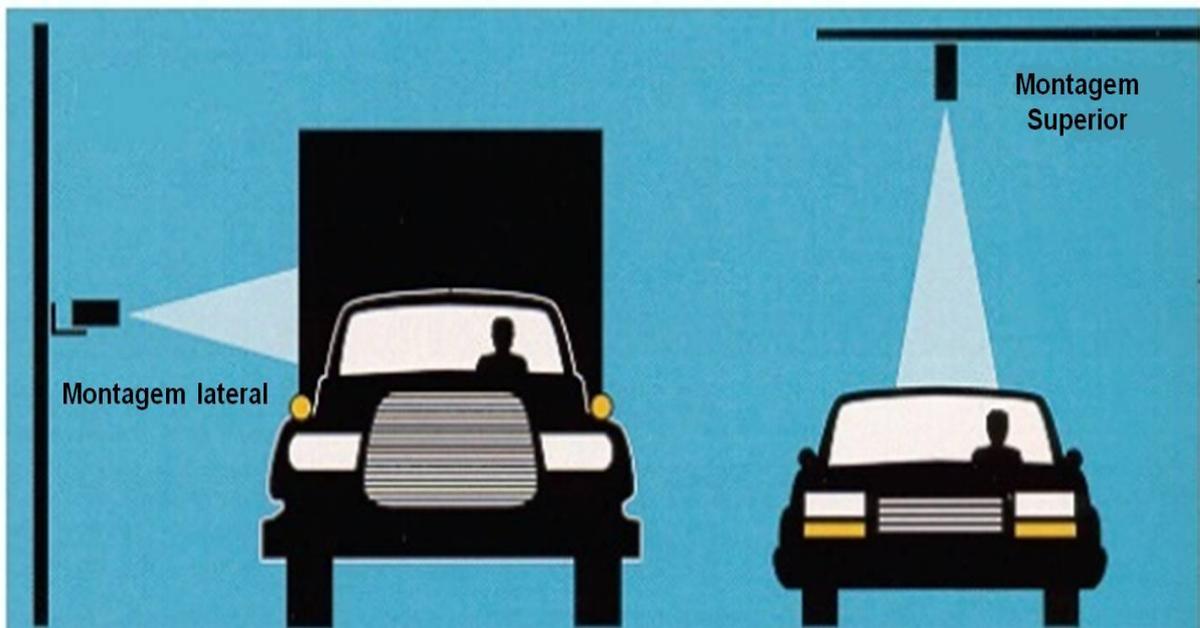


Figura 13 - Detector ultrassônico
Fonte: Adaptado FHWA (2006)

Os sensores ultrassônicos transmitem ondas de pressão de energia sonora em frequências entre 25 e 50 kHz, as quais estão acima da faixa audível pelo ser humano. A maioria dos sensores ultrassônicos fornece contagem de veículos, presença e informações de ocupação (FHWA, 2006).

3.2.3 DETECTORES INFRAVERMELHOS

Os detectores de infravermelho podem ser passivos ou ativos.

Os detectores passivos não transmitem energia, apenas recebem. Quando um veículo entra na zona de detecção, ele produz uma mudança na energia medida normalmente na superfície da estrada na ausência de veículo, podendo fornecer dados referentes à presença e passagem de veículos, conforme Figura 14.

A diferença de energia que chega ao receptor é reduzida quando há vapor de água, chuva, neve ou neblina na atmosfera. Para distâncias típicas de aproximadamente 6,1m, estas intempéries atmosféricas não produzem significativa degradação no desempenho (MORAIS, 1999).

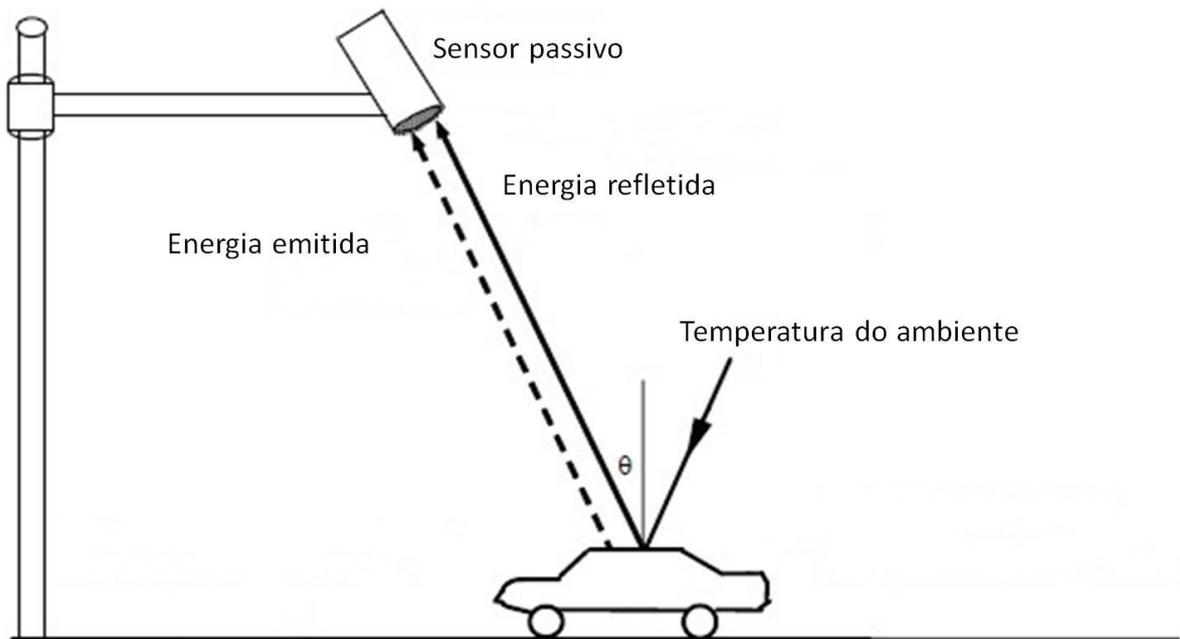


Figura 14 - Detector de infravermelho passivo

Fonte: FHWA (2006)

Os detectores Infravermelhos ativos funcionam de maneira similar aos radares de micro-ondas. Os tipos mais destacados utilizam um diodo laser para transmitir nas proximidades do espectro infravermelho. Uma porção da energia transmitida é refletida de volta ao receptor quando um veículo entra em seu campo de visão.

Os radares Laser podem fornecer informações de passagem de veículos, presença e velocidade. A velocidade é medida através do tempo que um veículo leva para atravessar dois raios que estão localizados na superfície da via, a distâncias conhecidas.

Alguns modelos de radar Laser também têm a habilidade de classificar veículos medindo e identificando seus perfis. Outros tipos de detectores infravermelhos ativos utilizam diodos de emissão de luz (LED) como fonte de sinal (MORAIS, 1999). A Figura 15 ilustra o esquema de detecção infravermelho ativo.

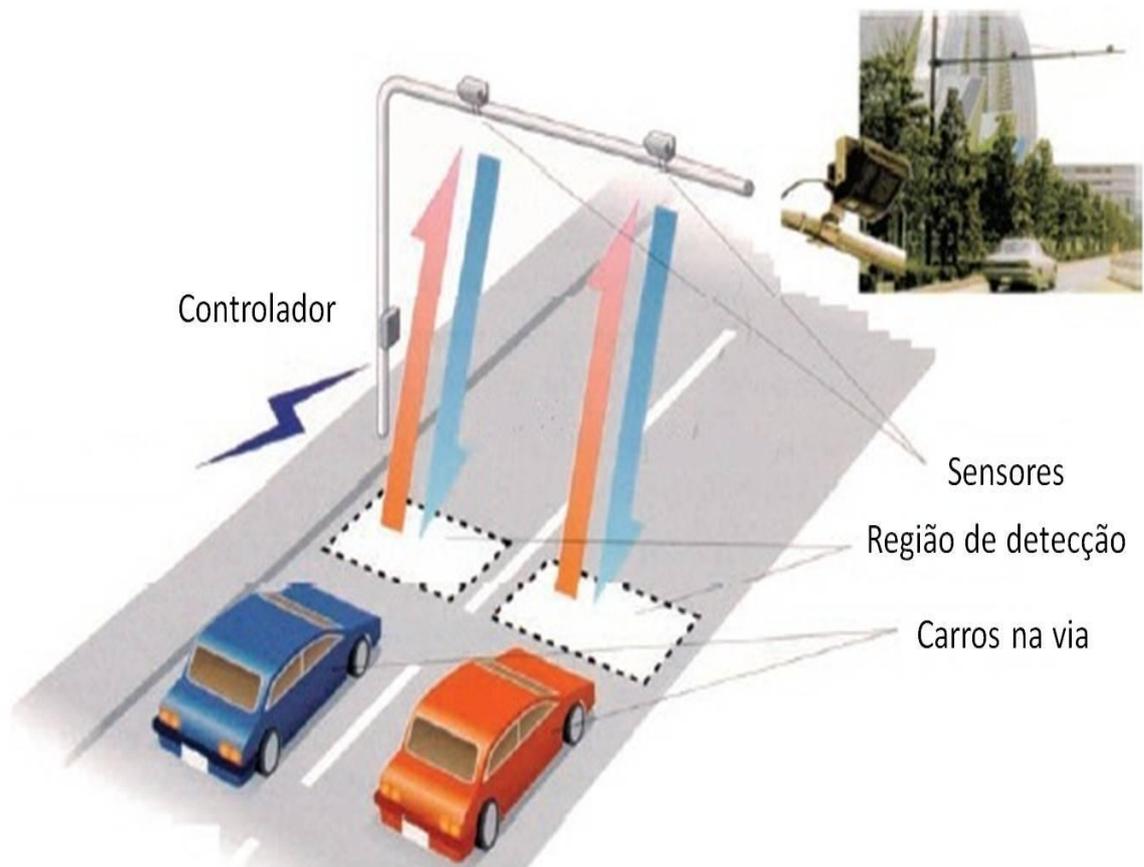


Figura 15 - Detector infravermelho ativo

Fonte: FHWA (2006)

3.2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE VÍDEO

O emprego do processamento de imagens de vídeo teve início na metade da década de 70, principalmente nos Estados Unidos, Japão, França, Austrália, Inglaterra e Bélgica (MICHALOPOULOS *et al.*, 1993). As câmeras de vídeo foram introduzidas primeiramente para fiscalização das vias; elas apenas transmitiam imagens em circuitos fechados de televisão (CFTV) para operadores humanos as interpretarem. Com o avanço tecnológico e a redução dos custos de equipamentos, as câmeras de vídeo atualmente são empregadas para fins de gerenciamento e coleta de dados de tráfego na detecção de acidentes, densidade, comprimento de filas e perfis de velocidades, etc.

Um sistema de processamento de imagens de vídeo tipicamente consiste em uma ou mais câmeras, um computador com capacidade para elevado processamento de imagens em um curto período de tempo e um *software* para interpretação das imagens e para convertê-las em dados do fluxo de tráfego (FHWA, 2006).

Os processadores de imagens de vídeo analisam as imagens a partir de uma cena do tráfego determinando as mudanças entre *frames* (quadros) sucessivos para obter os dados sobre o tráfego (FHWA, 2006). Na Figura 16 é apresentado um modelo deste tipo de processador.



Figura 16 - Processador de Imagens de Vídeo

Fonte: FHWA (2006)

Segundo Pranzl (1999) as câmeras de vídeo normalmente são instaladas em postes altos e suas imagens são transmitidas a um centro de controle de onde os operadores possam controlar suas funções, como rotação e zoom. Esse tipo de instalação é típico de um sistema de monitoramento de tráfego que tenha por objetivo cobrir uma área de grande extensão.

Os processadores de imagens de vídeo podem substituir vários detectores de laço indutivo instalados sob o solo por apenas uma única câmera, possibilitando a detecção de veículos em uma larga área (FHWA, 2006).

Embora já existam muitos sistemas automáticos de processamento de imagens de vídeo, na maioria dos casos as imagens ainda são analisadas visualmente por operadores de um centro de controle. Nas áreas urbanas, as câmeras estão entre os principais instrumentos de sistemas de monitoramento das condições do tráfego e de gerenciamento de incidentes (PRANZL, 1999).

3.2.5 RADAR MICRO-ONDAS

Um tipo de detector de veículos é o baseado no princípio do RADAR (Radio Detection And Ranging). Ele emprega um sensor que emite um feixe de micro-ondas sobre as faixas de rolamento da via de trânsito e, através da energia refletida pelos veículos, são coletadas várias características do tráfego. As Figuras 17 e 18 ilustram o posicionamento e a forma de atuação deste tipo de detector.

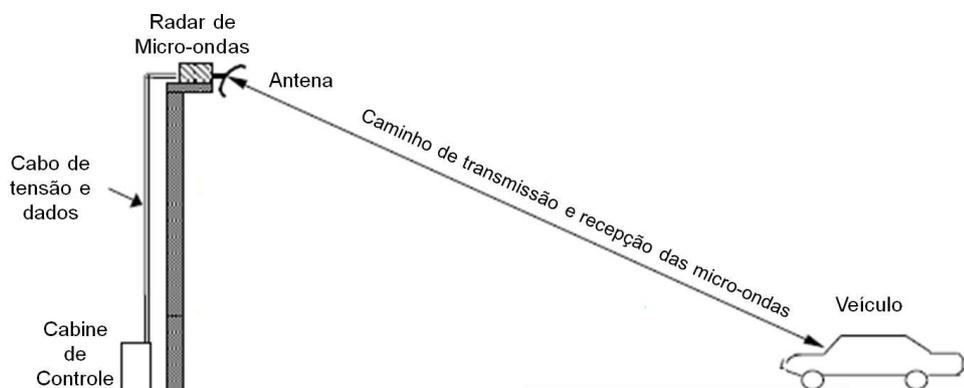


Figura 17 - Radar micro-ondas em operação

Fonte: Adaptado de FHWA (2006)

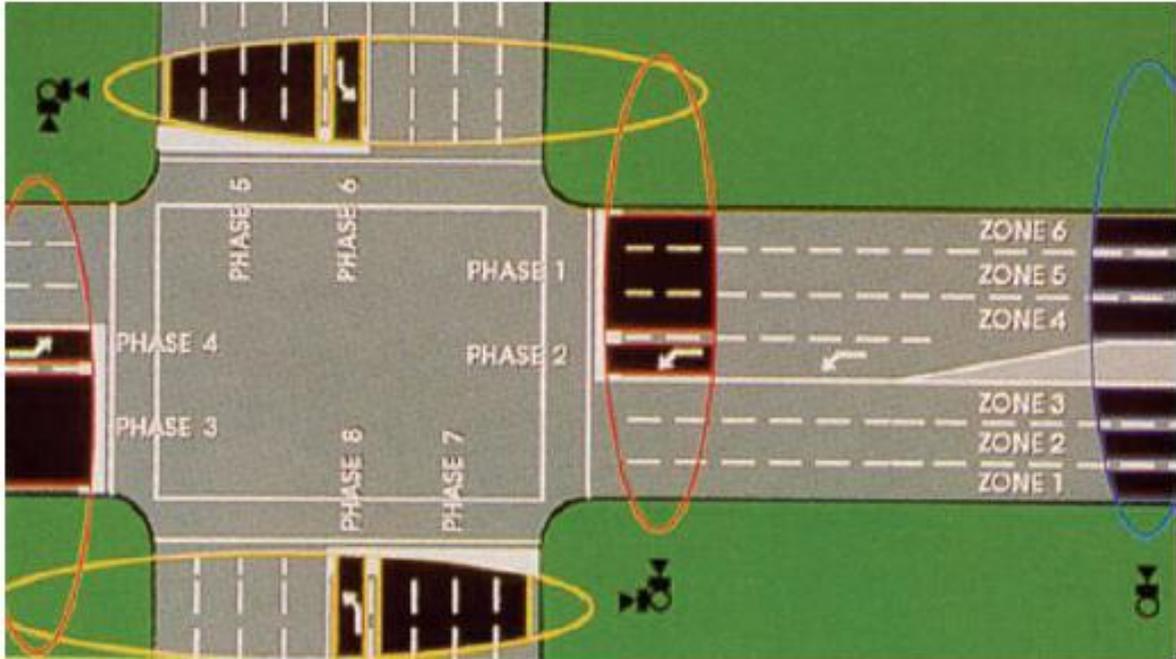


Figura 18 – Projeção da área de cobertura na via

Fonte: FHWA (2006)

Há dois tipos de detectores radar micro-ondas usados em aplicações de gerenciamento do tráfego. O primeiro tipo transmite energia eletromagnética em uma frequência constante e mede a velocidade dos veículos usando o princípio do efeito Doppler. Este tipo de detector não pode detectar veículos parados e, portanto, não é adequado para aplicações que requerem a medição da presença do veículo (KLEIN, 1994).

O segundo tipo de radar micro-ondas transmite uma onda em forma de dente de serra, que varia a frequência transmitida continuamente com o tempo. Isso permite que veículos parados sejam detectados, medindo-se a distância do detector ao veículo. Também calcula a velocidade de veículos em movimento medindo o tempo que ele leva para percorrer entre duas marcas que representam distâncias conhecidas para o radar (KLEIN, 1994).

3.3 COMPARAÇÕES ENTRE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO

Alguns sistemas de detecção instalados acima da via incorporam mais de uma tecnologia. A combinação de sensores de raios infravermelhos passivos com

sensores de ultrassom ou Radar Micro-ondas Doppler fornece maior precisão para detecção de presença e fila de veículos, para contagem de veículos e discriminações de altura e distância (FHWA, 2006).

A escolha de um detector para uma aplicação específica depende de vários fatores, incluindo os tipos de dados a serem coletados, consistência, precisão, número de faixas monitoradas, número de zonas de detecção por faixa, custos e compra e de manutenção dos detectores, suporte dos vendedores, tempo de resposta dos detectores e compatibilidade com as infraestruturas de gerenciamento do tráfego atuais e futuras (KLEIN, 1994).

A tabela 4 resume as vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de detecção (FHWA, 2006).

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Tubos Pneumáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil e rápida instalação. - Baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - baixa precisão. - Alta sensibilidade à temperatura. - Suscetível a vandalismo e desgastes dos tubos.
Magnéticos (<i>Indução ou search coil magnetometer</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ser usados quando os laços indutivos não podem ser instalados. - Alguns modelos são instalados sob a via sem a necessidade de cortes no pavimento. Porém, é necessário fazer perfurações sob a via. - Insensível a intempéries como chuva, neblina e neve. - Menos suscetível a tensões provocadas pelo tráfego do que os laços indutivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalação requer realização de cortes no pavimento ou perfuração de túneis sob a via. - Não detecta veículos parados a não ser no caso de alguns sensores com <i>layout</i> especial e uso de software de processamento de sinais.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

Continuação		
<p>Magnetômetros (<i>Two-axis fluxgate magnetometer</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Menos suscetíveis do que os laços indutivos às tensões do tráfego - Insensível a intempéries como chuva, neblina e neve. - Alguns modelos transmitem dados por meio de comunicação sem fio. 	<ul style="list-style-type: none"> - A instalação requer cortes no pavimento, diminuindo sua vida útil. - Instalação e manutenção requerem o fechamento parcial da via. - Modelos com pequenas zonas de detecção requerem múltiplas unidades para a detecção completa da faixa.
<p>Laços Indutivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Design flexível atendendo uma ampla variedade de aplicações. - Tecnologia madura e bem difundida. - Fornece parâmetros do tráfego (volume, presença, ocupação, <i>gap</i>, velocidade e o <i>headway</i>). - Insensível a intempéries como chuva, neblina e neve. - Fornece dados de contagem de veículos mais precisos do que outras tecnologias usadas. - Padronização comum para obtenção de medidas precisas de ocupação. - Modelos de alta frequência de excitação fornecem dados de classificação. 	<ul style="list-style-type: none"> - A instalação requer cortes no pavimento. - Diminuem a vida útil do pavimento. - Instalação e manutenção requerem fechamento parcial da via. - Os fios dos laços ficam sujeitos a tensões provocadas pelo tráfego e variações de temperatura. - Normalmente necessita-se de múltiplos detectores para monitorar um local. - A precisão da detecção diminui quando é necessária a detecção de uma grande variedade de classes de veículos.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

		Continuação
Detectores Piezoelétricos	<ul style="list-style-type: none"> - Classifica veículos por peso e espaçamento de eixos. -Diferencia eixos individuais com precisão. - Baixo Custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interrupção do tráfego para instalação. - Apresentam falhas em vias com a superfície danificada. - Sensíveis à temperatura e velocidade.
Fibra Óptica	<ul style="list-style-type: none"> - Fornecem contagem e velocidade de veículos. - Leves e imunes à interferência eletromagnética. - Podem ser instalados em ambientes hostis. - Detectam rapidamente variações ambientais. - Baixo custo em relação ao cabeamento de cobre (1:1000). 	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologia muito recente e pouco difundida. - Suscetíveis à quebra.
Acústicos Passivos	<ul style="list-style-type: none"> - Detecção passiva. -Insensíveis às precipitações atmosféricas. - Em alguns modelos é possível operar em múltiplas faixas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixas temperaturas podem afetar a precisão da contagem. - Modelos específicos não são recomendados quando os veículos estão movendo-se lentamente em um tráfego parando e andando.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

Continuação

<p>Ultrassônicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Operação em múltiplas faixas disponíveis. - Capazes de detectar veículos com altura excessiva. - Larga experiência no Japão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Condições ambientais como mudanças de temperatura e turbulência extremas no ar podem afetar seu desempenho. Alguns modelos executam correções compensando as variações de temperatura. - Grandes pulsos de repetição podem degradar a medição da ocupação em vias expressas com veículos trafegando com velocidades moderadas a altas.
<p>Infravermelhos Ativos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Transmite múltiplos raios de luz para precisa medição da posição dos veículos, velocidade e classificação. - Operação em múltiplas faixas tráfego disponível. 	<ul style="list-style-type: none"> - A operação pode ser afeada pela neblina quando a visibilidade é menor que 6 m ou quando há neve caindo. - A instalação e manutenção, incluindo limpezas periódicas das lentes, requerem fechamento parcial da via.
<p>Infravermelhos Passivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sensores passivos multizonas. 	<ul style="list-style-type: none"> - A sensibilidade dos sensores passivos aos veículos pode ser reduzida em presença de chuva, neve ou neblina densa. - Alguns modelos não são recomendados para detecção de presença.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

		Continuação
Vídeo	<ul style="list-style-type: none"> - É possível monitorar múltiplas faixas e múltiplas zonas de detecção por faixa. - Facilidade na adição e na modificação de zonas de detecção - Rico conjunto de dados disponível - Possibilita a detecção em larga área quando as informações obtidas por uma câmera podem ser ligadas a outras 	<ul style="list-style-type: none"> - A instalação e a manutenção, incluindo a limpeza periódica das lentes, requer fechamento de faixas de trafego quando a câmera é colocada sobre a via (o fechamento da faixa pode não ser necessário quando a câmera é colocada ao lado da via). - Seu desempenho é afetado por intempéries como neblina, chuva e neve e também por sombras de veículos, projeção dos veículos nas faixas adjacentes, oclusão, transição do dia para a noite, contraste entre o veículo e a via, presença de água, resíduos de sal, massas pendentes de gelo, teias de aranha nas lentes das câmeras. - Requerem que as câmeras sejam instaladas a alturas de aproximadamente 15 metros para detecção ótima da presença de veículos e medição de velocidade. - Alguns modelos são suscetíveis a erros causados por movimentos das câmeras devido a ventos fortes ou vibrações na estrutura de suporte. - Processamento complexo e com custo elevado.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

		Continuação
Micro-ondas	<ul style="list-style-type: none"> - Tipicamente insensível às variações climáticas em variações relativamente pequenas encontradas em aplicações de gerenciamento de tráfego. - Medição direta de velocidade. - Operação em múltiplas faixas de tráfego disponível. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensores Doppler não detectam veículos parados.

A Tabela 5 apresenta quais são os dados de tráfego tipicamente fornecidos por diferentes tipos de detectores de veículos.

Tabela 5 - Tipos de dados fornecidos por diferentes tecnologias de detecção de veículos (adaptado de FHWA, 2006)

Tecnologia	Dados de saída				
	Volume	Presença	Velocidade	Ocupação	Classificação
Pneumático	X ¹	X ¹	X ¹	-	X ¹
Magnéticos	X ¹	X ²	X ²	X ¹	-
Laço Indutivo	X ¹	X ¹	X ²	X ¹	X ²
Magnetômetro	X ¹	X ¹	X ²	X ¹	-
Piezoelétrico	X ¹	X ¹	X ²	X ¹	X ¹
Fibra Óptica	X ¹	X ¹	X ¹	X ¹	X ²
Acústico Passivo	X ¹	X ¹	X ¹	X ¹	-
Ultrassônico	X ¹	X ¹		X ¹	-
Infravermelho Passivo	X ¹	X ¹	X ²	X ¹	-
Infravermelho Ativo	X ¹	X ¹	X ²	X ¹	X ¹
Vídeo	X ¹				
Micro-ondas	X ¹	X ²	X ¹	X ¹	X ²

1. Utiliza somente um detector.
2. Utiliza um detector específico ou mais de um detector.

Em alguns detectores as informações só podem ser obtidas apenas quando se utiliza um modelo específico ou quando mais de um deles são instalados, como no caso dos laços indutivos, magnetômetros e detectores magnéticos.

Os detectores de laços indutivos continuam sendo largamente usados para monitorar os fluxos de tráfego e para controle semafórico devido principalmente ao seu custo relativamente baixo. Algumas das tecnologias de detecção que ficam acima da via, como processamento de imagens de vídeo, radar micro-ondas multi zonas e detectores infravermelhos passivos podem substituir vários detectores de laços indutivos.

3.4 SENSORES DE IMAGEM

Barbetta e Arantes (2010) propuseram em seus estudos o uso de uma câmera de vídeo como sensor de presença, utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), detectando o movimento ao analisar os quadros capturados por uma *webcam*.

Os sensores ópticos, ou de aquisição de imagens, são formados por elementos fotossensíveis que quando submetidos à exposição luminosa do ambiente por um período determinado, tempo de exposição, mapeiam o nível de intensidade luminosa recebido sobre sua superfície em um sinal elétrico analógico proporcional, repassando este sinal para o elemento processador, que irá digitalizar e armazenar o sinal em uma memória de rápido acesso para futuro processamento (ERHARDT-FERRON, 2000).

3.4.1 IMAGEM DIGITAL

Uma imagem natural pode ser descrita por uma variação contínua de tons e cores. No caso de fotografia, os tons variam de claro a escuro e as cores de vermelho a azul, abrangendo espectro magnético das cores visíveis (VIANNA, 2002).

Uma imagem digital pode ser definida por uma função bidimensional de intensidade da luz $f(x, y)$, que constituem as coordenadas do ponto e o valor de f em qualquer ponto (x, y) representa a proporção de brilho (nível de cinza) da imagem naquele ponto (GONZALES e WOODS, 2001). Segundo Crosta (1992) uma imagem digital caracteriza-se, como uma matriz de dimensões linhas (x) por colunas (y), com cada elemento (célula) possuindo um atributo (z) que representa o nível de cinza.

Uma imagem digital, entretanto, compõem-se de pontos discretos de tons e/ou cores, ou brilho, e não sendo portando uma variação contínua. Uma imagem digital é formada da divisão de uma imagem contínua em uma série de pontos e cada ponto irá possuir uma determinada tonalidade (níveis de cinza) ou cor (colorido). Os valores digitais de cada ponto, resultante da divisão de uma imagem contínua, são denominados de amostragem e quantização (VIANNA, 2002). A Figura 19 ilustra os processos de amostragem e quantização.

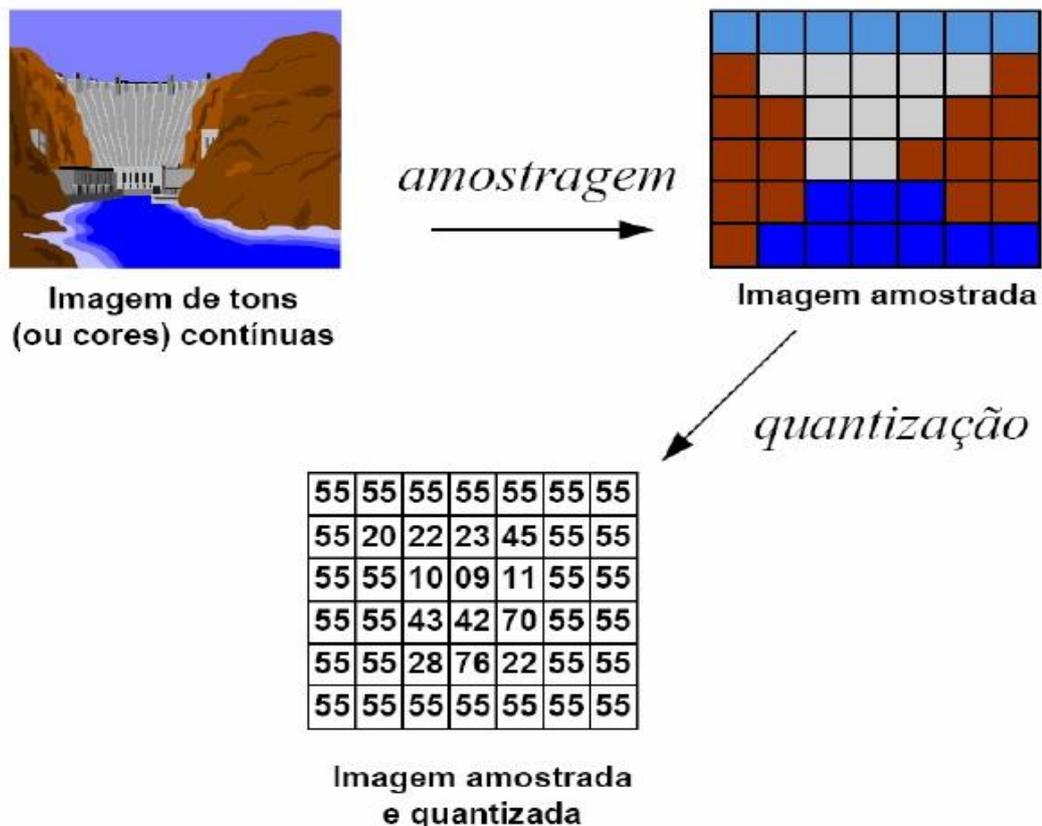


Figura 19 – Amostragem e quantização

Fonte: Vianna (2002)

Ainda segundo Vianna (2002), cada *pixel* em uma imagem digital representa a intensidade luminosa de um determinado ponto da imagem original. Portanto, o conceito de “resolução de brilho” define quão preciso é a intensidade luminosa que cada *pixel* pode representar da imagem original. Após o processo, cada amostra é quantizada. O processo de quantização converte uma intensidade de tons de cinza contínuos, em um valor de brilho. O número de bits que serão utilizados na quantização está diretamente relacionado com a precisão desse valor digital e, portanto com a qualidade da imagem final. Como exemplo pode-se adotar uma imagem digital que possua somente tons de cinza, se 3 *bits* forem utilizados, o brilho pode ser convertido em 8 tons de cinza, no entanto se forem utilizados 8 *bits*, esse valor passará para 256 tons. A figura 20 ilustra uma imagem em diferentes resoluções.

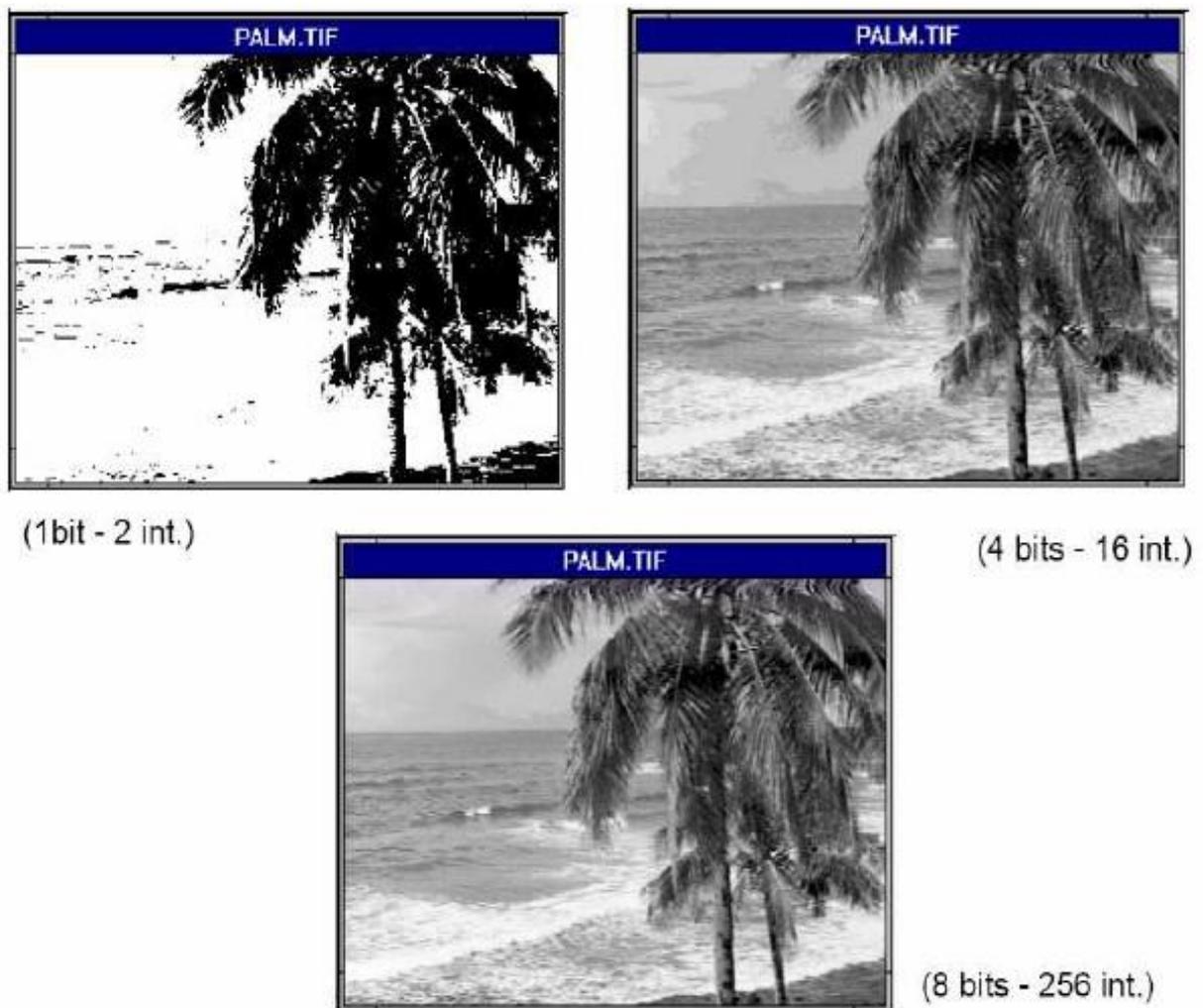


Figura 20– Imagem em diferentes resoluções

Fonte: Vianna (2002)

3.4.1.1 SENSORES EM ESTADO SÓLIDO

A tecnologia empregada na fabricação e operação dos sensores encontra-se bem mais evoluída, sendo os sensores *CCD (Charge Coupled Device)* e *CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)* os mais difundidos atualmente. Esses sensores são formados por matrizes de elementos fotossensíveis (*pixels*) a base de silício e agrupados em formato retangular ou linear, realizando a conversão de imagens em sinais elétricos.

3.4.1.1.1 SENSORES *CCD*

Quando um fóton de energia luminosa atinge em um sensor *CCD* este desprende certa quantidade de elétrons (proporcional à intensidade luminosa).

O funcionamento dos sensores *CCD* baseia-se no efeito fotoelétrico. Determinadas substâncias possuem a capacidade de absorver e liberar durante o processo um elétron. Portanto cada célula fotossensível vai acumulando cargas de acordo com os fótons que a atingem e conseqüentemente liberam elétrons. Por apresentar um único amplificador, a linha inferior do sensor esta conectada ao um registro e esse envia as cargas capturadas pelo sensor serialmente para um amplificador. Após uma linha ter sido armazenada no registro as cargas da linha acima ocupam o lugar deixado vago pelas cargas que foram deslocadas para o registrador, originando assim um processo em cadeia, que faz com que todas as linhas desçam uniformemente. Esse efeito ocorre devido às cargas estarem acopladas. A Figura 21 ilustra o processo.

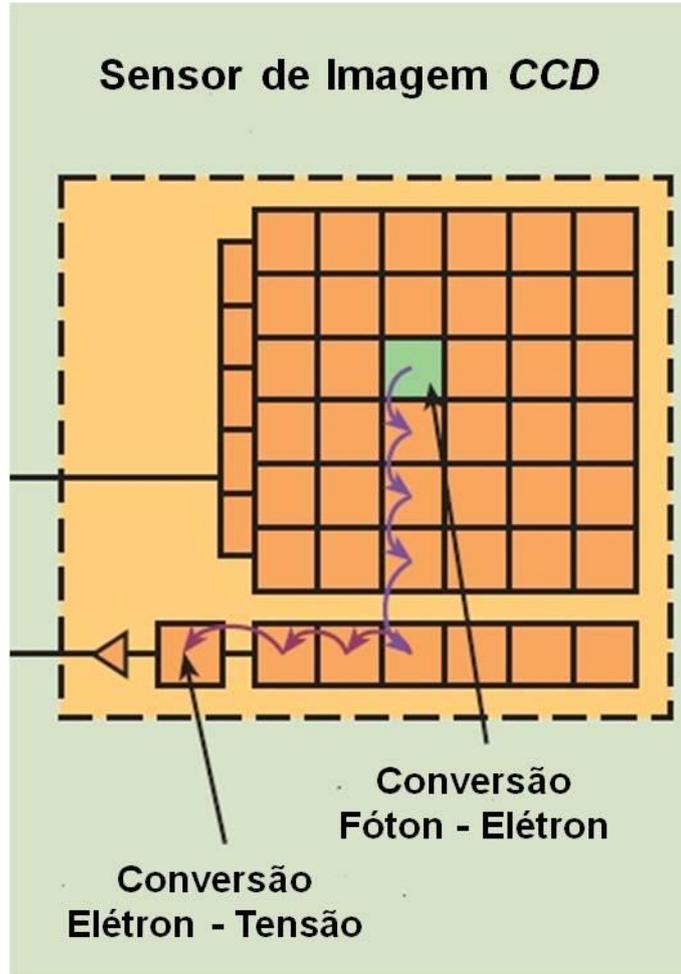


Figura 21 – Leitura dos pixels do sensor CCD

Fonte: Litwiller (2001)

3.4.1.1.2 SENSORES CMOS

Os sensores CMOS são desenvolvidos utilizando processos similares aos usados na criação de memórias ou processadores. Esses sensores utilizam fotodiodos ou transistores para cada *pixel*. Nesse caso cada *pixel* é individual e não há movimento de cargas, permitindo a transformação da luminosidade recebida em um sinal elétrico proporcional. A Figura 22 ilustra a sensibilização e transferência de dados em um sensor CMOS.

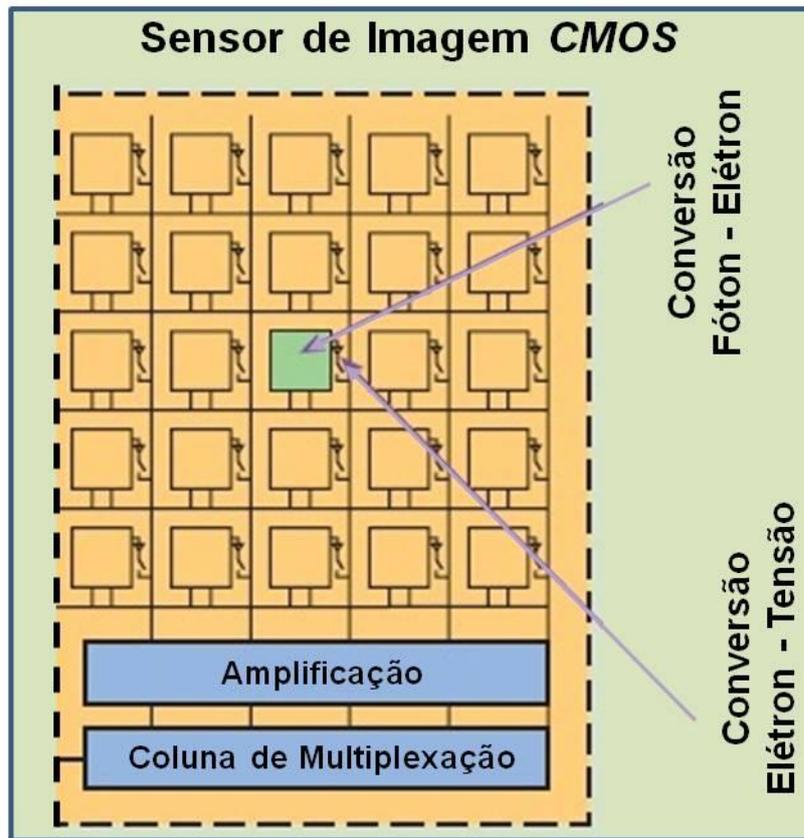


Figura 22 – Leitura dos pixels do sensor CMOS

Fonte: Litwillwer (2001)

3.4.1.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS SENSORES CCD E CMOS

Os sensores CCD e CMOS, diferenciam-se entre si em vários aspectos. A Tabela 6 resume as vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de sensores de imagem.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens dos sensores de imagem

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
CCD	<ul style="list-style-type: none"> -Tecnologia madura e bem difundida. - Baixo nível de ruído. - Maior sensibilidade em ambientes de baixa luminosidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior consumo de energia. - Menor velocidade de aquisição de dados. - Maior custo de produção, exige linha de produção específica.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens dos sensores de imagem

		Continuação
CMOS	<ul style="list-style-type: none"> - Permite o acesso direto ao valor de qualquer <i>pixel</i>. - Menor consumo de energia. - Menor custo de produção. - Não apresentam problemas de <i>blooming</i> (saturação). - Alta taxa de aquisição, pois a transferência dos dados é paralela. - Grande capacidade de integração em um único circuito integrado (CI). 	<ul style="list-style-type: none"> - Nível de ruído na imagem maior do que os sensores <i>CCD</i>.

Os sensores *CCD* continuam sendo largamente utilizados em câmeras digitais devido principalmente a qualidade da imagem e por possuir uma maior maturidade.

A tecnologia *CMOS* de detecção apresenta uma boa relação custo/benefício, e uma série de vantagem quando comparada com a tecnologia *CCD*. Com a adição de filtros de redução de ruídos, os sensores *CMOS* colocam-se como uma escolha para a substituição da tecnologia de sensores *CCD* no futuro.

3.4.2 IMAGEM ANALÓGICA

Uma câmera analógica de vídeo padrão tem uma taxa de atualização de 30 quadros por segundo. Outra característica é o entrelaçamento, onde a imagem de um quadro é formada em dois campos. Primeiro são traçadas as linhas ímpares (onde metade da imagem é formada) e depois são traçadas as linhas pares (a outra metade) formando enfim a imagem do quadro de terá uma frequência total de 60Hz, evitando assim a sensação de cintilação da imagem, conforme Figura 23.

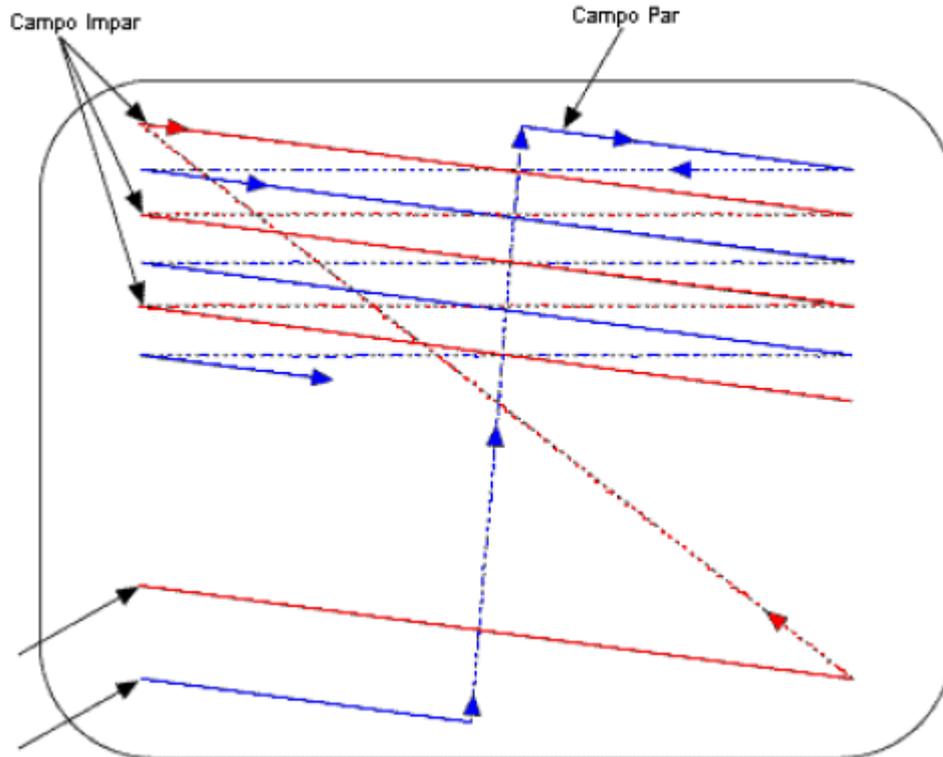


Figura 23 – Entrelaçamento das linhas de vídeo ímpares e pares

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2005)

O sinal de uma única linha de vídeo horizontal consiste de um sinal de sincronismo horizontal (*Hsync*) e região de pixel ativo e decaimento, como ilustrado pela Figura 24.

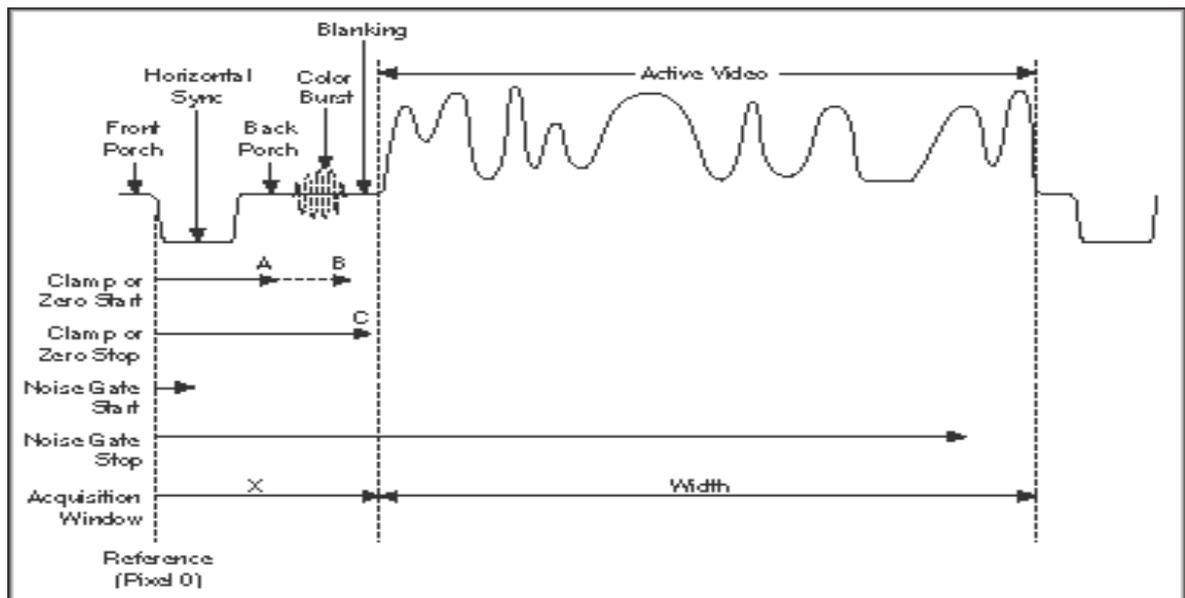


Figura 24 - Sinal de linha horizontal

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2005)

Outro aspecto do sinal de vídeo é a sincronização vertical (*Vsync*) de pulso que se caracteriza realmente por uma série de pulsos que ocorrem entre os campos de sinal do monitor para efetuar uma revisão vertical e se preparar para digitalizar o próximo campo, conforme a Figura 25.

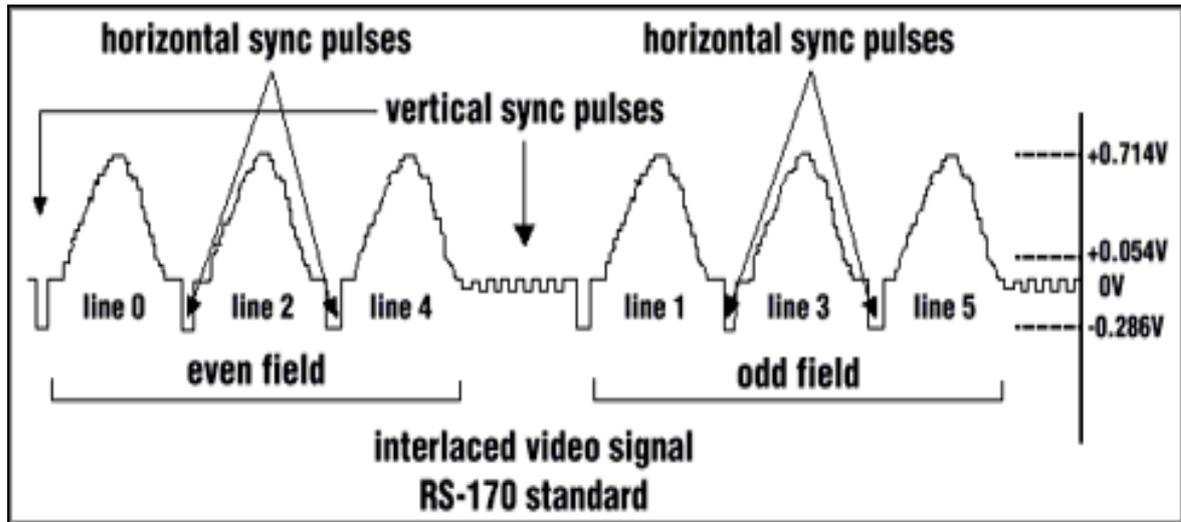


Figura 25 - Sinal de pulso *Vsync*

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2005)

Os parâmetros de interesse são:

- Número de linhas por quadro (linhas/quadro): 525 (que incluem 485 para tela; e o resto são linhas *VSYNC* para cada um dos dois campos);
- Frequência da linha: 15,734kHz;
- Duração da linha: 63,556 μ s;
- Duração horizontal ativa: 52,66 μ s;
- Número de *pixels* por linha (*pixels*/linha): 640 *pixels*.

A partir desses dados, podem-se realizar alguns cálculos:

Pixel por frequência de clock (PCLK):

$$\frac{640 \text{ pixels/linha}}{52,66 \cdot 10^{-6} \text{ s/linha}} \approx 12,15 \cdot 10^6 \text{ pixels/s (12,15 MHz)}$$

Comprimento total da linha em *pixel* do vídeo ativo + informação de tempo (referido como HCOUNT):

$$63,556 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot 12,15 \cdot 10^6 \text{ pixels/s} \approx 772 \text{ pixels}$$

O sinal de vídeo composto colorido mostra que o processo de varredura requer algum espaço adicional na esquerda e na direita de cada linha, como também no topo e na base de cada da região da imagem de vídeo ativo. Esse espaço é constituído por sinais de sincronismo, *burst* de cor e outras informações necessárias para a formação da linha, conforme Figura 24.

Em uma câmera de vídeo padrão *National Television System Committee* (NTSC) das 525 linhas que formam o quadro somente 480 linhas são consideradas ativas. Portanto a duração de cada linha ativa é menor que a duração da linha inteira. A linha inteira tem uma duração de $63,55 \mu s$ enquanto a linha ativa tem uma duração de $52,2 \mu s$.

Com base nas características de formação da imagem, podemos então definir o circuito, conforme Figura 26:

- Sensor de presença: câmera de vídeo analógica colorida;
- Separador de sincronismo de vídeo: responsável por separar os sinais do quadro de vídeo;
- Conversor analógico/digital: Capturar os *pixels* que compõem a imagem. Deve ter velocidade mínima de vinte milhões de amostras por segundo (20 MSPS). Como a duração horizontal ativa é de $52,66 \mu s$ sendo possível capturar em uma linha 131,65 *pixels* de 8bits;
- Memória SRAM: Memória de Acesso Aleatória Estática, com tempo de acesso menor que nove nano segundos, que é responsável pelo armazenamento dos *pixels* capturados;
- Microcontrolador: PIC18F452 de dezesseis bit, responsável pela digitalização, armazenamento e processamento dos dados do sensor.

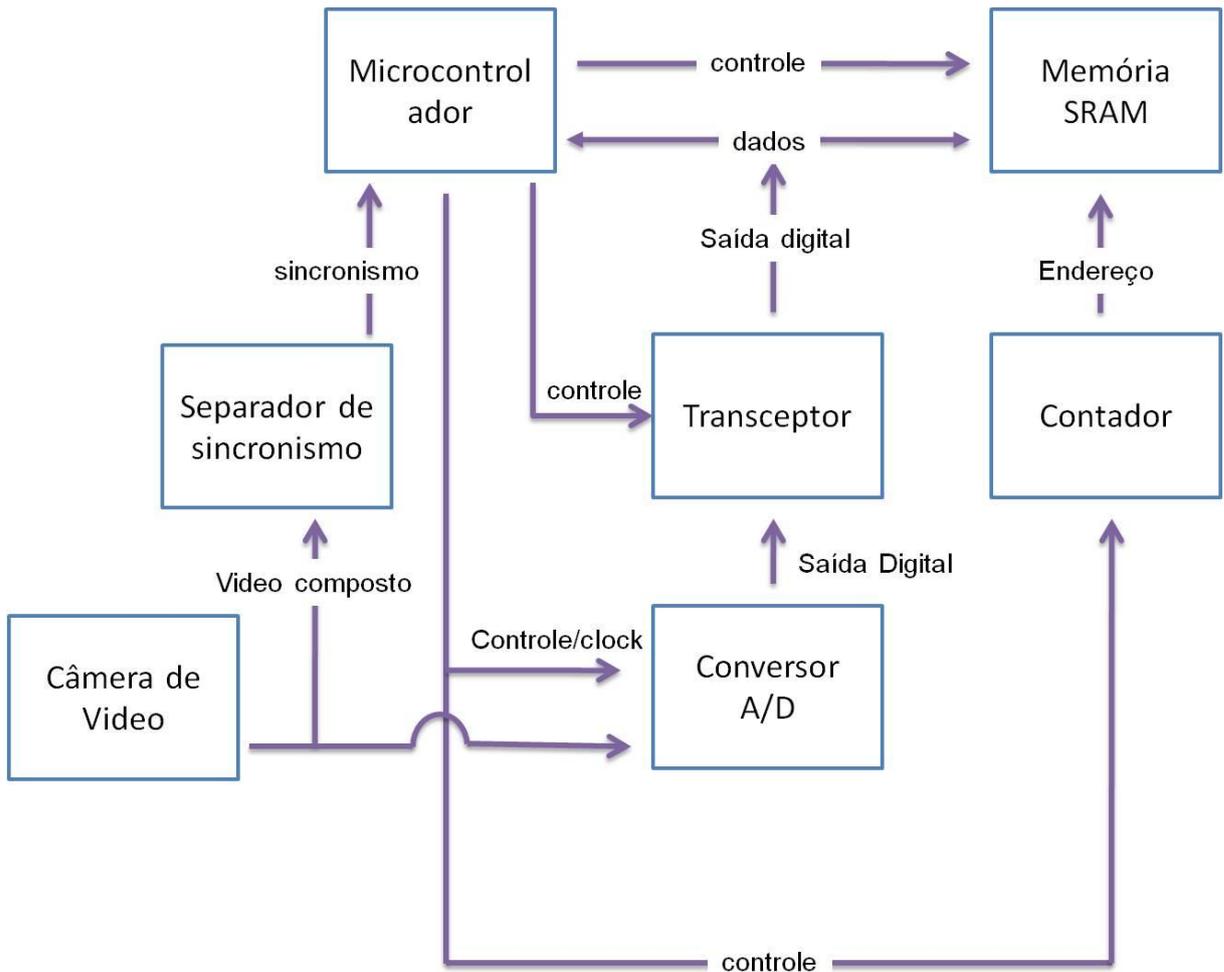


Figura 26 – Circuito para captura da imagem

O sinal de sincronismo horizontal é utilizado como referência para captura e digitalização da informação pelo microcontrolador. O sistema inicia a captura das linhas, para a formação do quadro que é utilizado. Nota-se que um quadro é formado por um conjunto de linhas ímpares e de linhas pares, portanto o sistema armazena na memória *SRAM* um conjunto de vinte linhas ímpares da imagem, formando, portanto o laço virtual. O tamanho e a posição do laço virtual são definidos na programação e fazem parte da análise para a detecção de presença. Nesse caso, como a finalidade é a detecção de presença, podem-se capturar apenas partes do quadro, melhorando a desempenho do sistema, pelo fato de reduzir o tempo gasto na digitalização e gravação. A Figura 27 ilustra o sistema do algoritmo de captura.

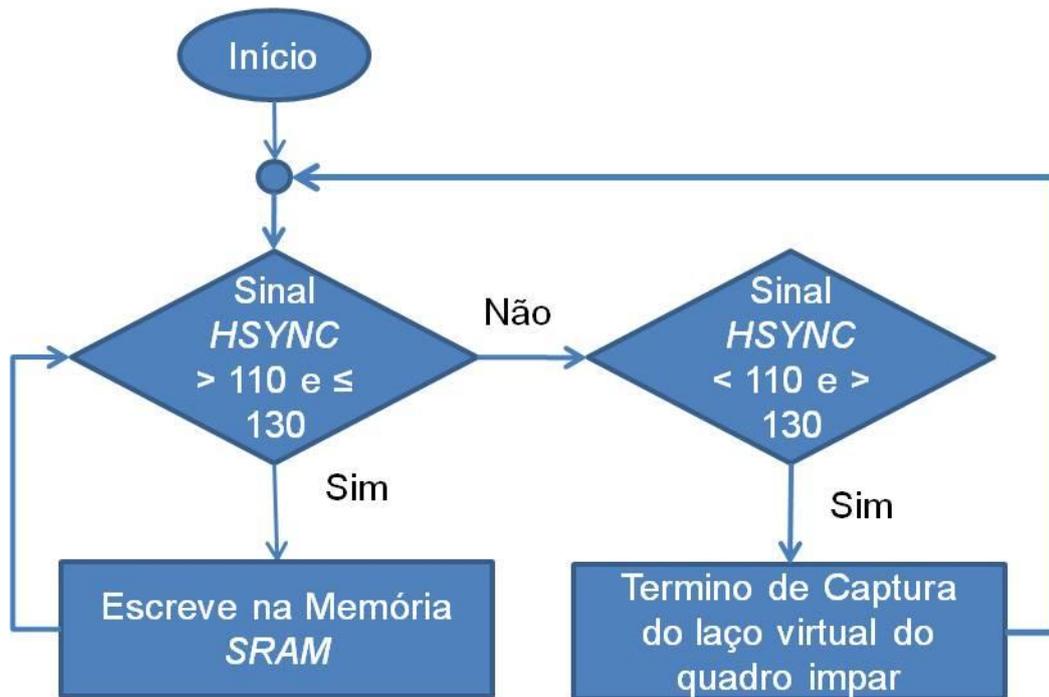


Figura 27 – Diagrama de captura de laço virtual do quadro

Esse processo é utilizado para a captura de laço virtual em quadros ímpares. O algoritmo de captura dos laços é responsável por escrever as linhas na memória *SRAM*, o algoritmo de limiarização é responsável por ler as linhas escritas na memória e também por limiarizar os *pixels*. Quando o conjunto de laços virtuais de dois quadros é capturado aplica-se o algoritmo de comparação dos pontos tomando a decisão sobre a presença ou não de veículos na via. Após a comparação ambos os quadros são descartados e há captura de novos quadros, que serão comparados novamente e assim sucessivamente, conforme Figura 28.

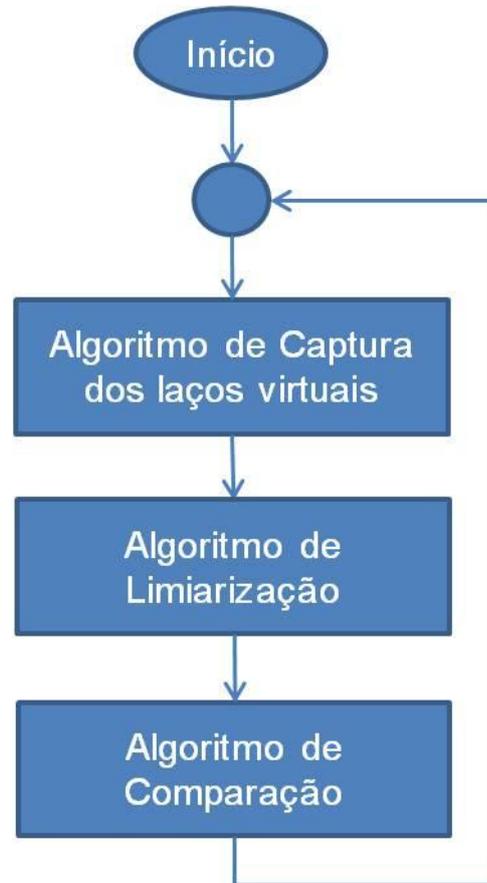


Figura 28 – Diagrama dos algoritmos de captura, limiarização e comparação

O Processo de limiarização ou binarização consiste basicamente em separar os grupos de cinza de uma imagem, determina-se uma intensidade de cinza, chama-se limiar, que separa as partes da imagem, de forma que o grupo de *pixels* com intensidades parecidas sejam separadas de outros. A dificuldade deste processo é determinar qual o valor do limiar. Com isso, pode-se observar a formação de vales na intensidade. O valor do limiar é escolhido neste vale, como sendo o mais próximo do meio da escala dos níveis de cinza.

Estabelecido o valor do limiar (T), usa-se a seguinte função:

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

Onde $f(x,y)$ é o valor da intensidade de cinza de um *pixel*. Consideram-se, então, os *pixels* com valor um como sendo *pixels* de objetos e os de valor zero como sendo de fundo. A Figura 29 limiarização de uma imagem monocromática.

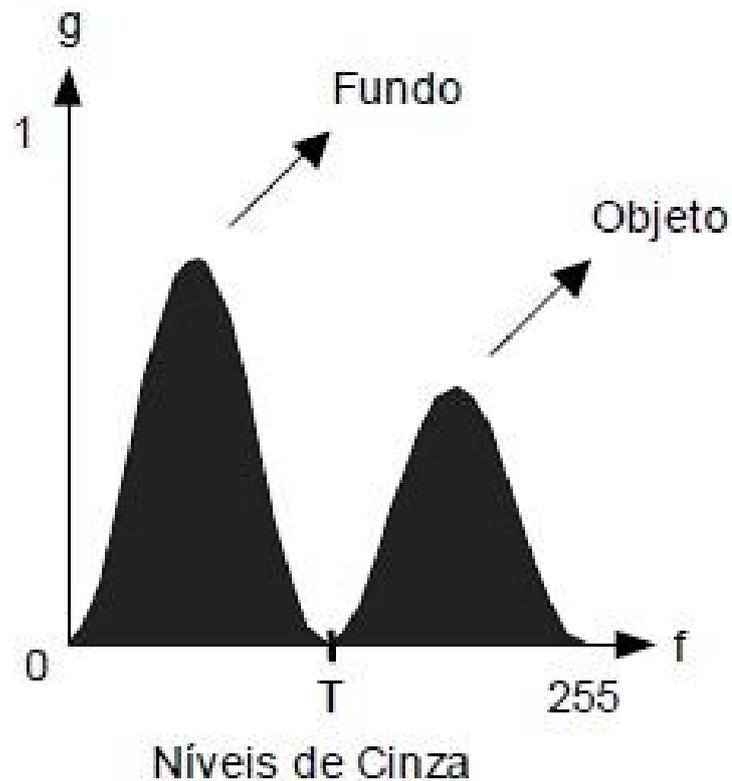


Figura 29 – Limiar (T) de uma imagem monocromática
 Fonte: (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO; 1999)

A imagem original possui 640 *pixels* por linha e um total de 480 linhas, formando uma matriz de 640x480 *pixels* por quadro, cada *pixel* capturado possui 8 bits de resolução, possuindo uma capacidade de 300 kbytes (1 kbyte equivale a 1024 byte), conforme a Figura 30.

Mas devemos observar que houve apenas a captura das linhas ímpares do quadro que é apenas metade do quadro e, portanto são 240 linhas totalizando 150 kbytes. A Figura 31 ilustra a imagem de 640 pixels por 240 linhas.



Figura 30 – Imagem original 640 *pixels* por 480 linhas de 8 bit e 300 kbytes



Figura 31 – Imagem com as linhas ímpares 640 *pixels* por 240 linhas de 8 bits e 150 kbytes

Mesmo capturando somente as linhas ímpares da imagem devido ao tamanho ainda não é possível processar esta informação dentro do microcontrolado *PIC18F452*, pois ele só possui 1,5 kbytes de memória *RAM (Random Access Memory)*. Uma alternativa para diminuir o tamanho da imagem captura é a utilização

de laços virtuais. O laço é colocado virtualmente na própria imagem, e o algoritmo de limiarização só analisa os pontos que estão dentro do laço virtual determinando assim se há veículo na via. A Figura 32 ilustra um laço virtual na via.



Figura 32 – Detecção por laço virtual

O tamanho e a posição do laço virtual dependem da configuração da via e neste caso é definido pelo algoritmo de captura que define a quantidade de linhas capturadas, e pelo algoritmo de limiarização que define a quantidade de *pixels* capturados da linha.

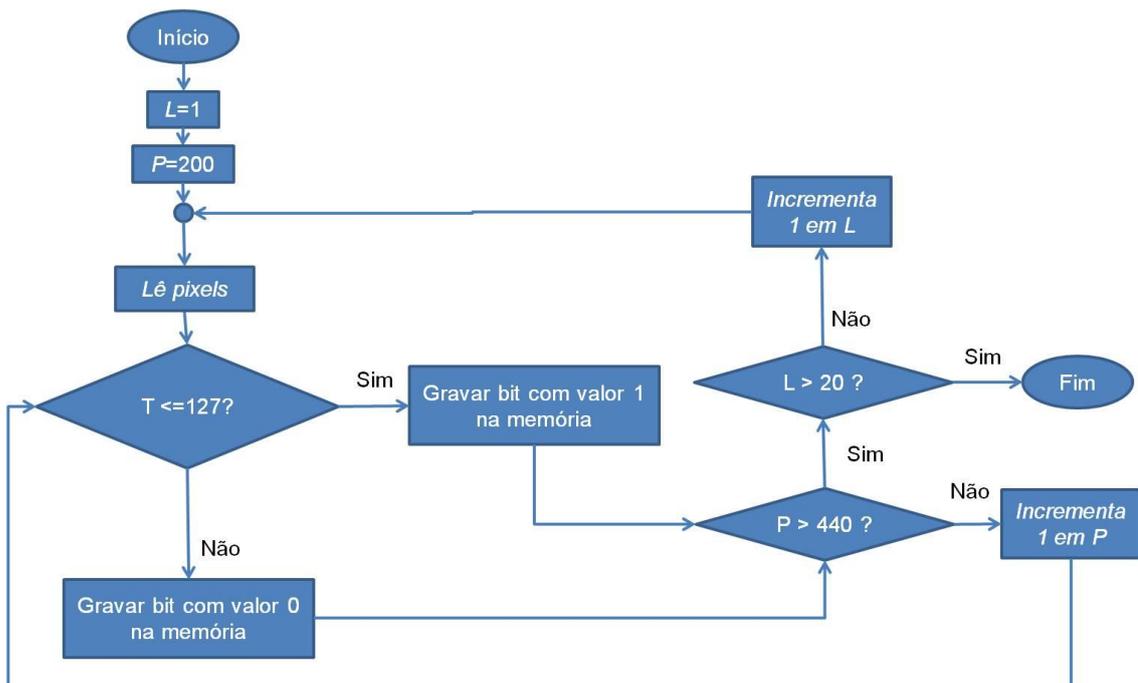


Figura 33 – Fluxograma do algoritmo de limiarização

A Figura 33 ilustra o processo de finalização do laço virtual e de sua binarização. A variável L , em referente às 20 linhas capturadas pelo algoritmo de captura e inicia em 1 ($P=200$) e informa ao sistema que deve começar a captura a partir do *pixel* 200, iniciando a montagem e binarização do quadro para posterior comparação e verificação de presença. O sistema lê o *pixel* de 8 *bits* e compara com o limiar T , que neste caso tem o valor igual a 127, caso seja menor escreve na memória do microcontrolador o valor igual a 1, caso seja maior escreve o valor igual a 0. Na próxima etapa compara P com o valor de 440 que é o valor máximo de captura da linha, caso seja menor incrementa P em 1 e lê o próximo *pixel*, caso seja maior compara L com o valor 20 que é o maior valor de linha capturada, se for menor incrementa o valor em 1 e inicia o processo de binarização da próxima linha.

Quando L alcançar o valor 20, o laço virtual do primeiro quadro terá sido totalmente binarizado e o sistema iniciará a binarização do segundo quadro. Ao término de captura do segundo laço virtual, o algoritmo de comparação analisa os dois laços verificando se existe presença. Caso ocorra à confirmação de presença um sinal é enviado ao microcontrolador que controla o semáforo.

Cada laço virtual depois de binarizado possui 240 *pixels* de 1 bit por linha, totalizando em vinte linhas 4,68 kbit valor esse compatível com a memória *RAM* do microcontrolador que é de 1,5kbytes. A limitação nesse caso se resume ao tempo de processamento referente à binarização do laço capturado.

4. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE PRESENÇA

Neste capítulo, é apresentado o procedimento para a seleção do sensor que foi utilizado como detector de presença do sistema de controle inteligente de semáforo, semáforo inteligente, proposto por Arantes e Barbeta (2010).

Inicialmente, foi proposto o uso de uma câmera de vídeo analógica como sensor de imagem e um microcontrolador para a captura e o processamento da imagem, detectando se há veículos na área de atuação do sensor, sem se preocupar com o tamanho, peso, velocidade ou qualquer outro parâmetro, evitando os sensores instalados na via pública.

Após análises sobre as arquiteturas dos microcontroladores disponíveis para o projeto, observou-se que os parâmetros como tempo de processamento e taxa de aquisição de dados dos conversores *Analógico/Digital (A/D)* não eram suficientes, e, portanto não atenderiam as especificações do projeto. Devido a essas dificuldades, foi necessário desenvolver um sistema de controle para cada via da intersecção composto por: um sensor de imagem, um microcontrolador slave, um conversor *A/D*, um separador de sincronismo de sinal de vídeo, uma memória *SRAM (Static Random Access Memory)*, um transceptor e um contador para endereçamento da memória.

Essa abordagem inviabilizou a proposta inicial do projeto, elevando os custos com o aumento do número de novos componentes. A utilização de um sensor de micro-ondas, como sensor de presença, foi à solução para manter a proposta inicial do projeto.

4.1 FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE MICRO-ONDAS

O sistema de controle do semáforo inteligente é composto por detectores de veículos e um único microcontrolador. O detector consiste de um sensor de micro-ondas fixado no semáforo de forma que não haja interferências em seu funcionamento, conforme a Figura 34.



Figura 34 - Sensor fixado no semáforo

Com o sensor instalado diretamente no semáforo, portanto de forma longitudinal a via, sua calibração é primordial para a detecção, minimizando os erros e aumentando a eficiência do sistema, conforme ilustra Figura 35.

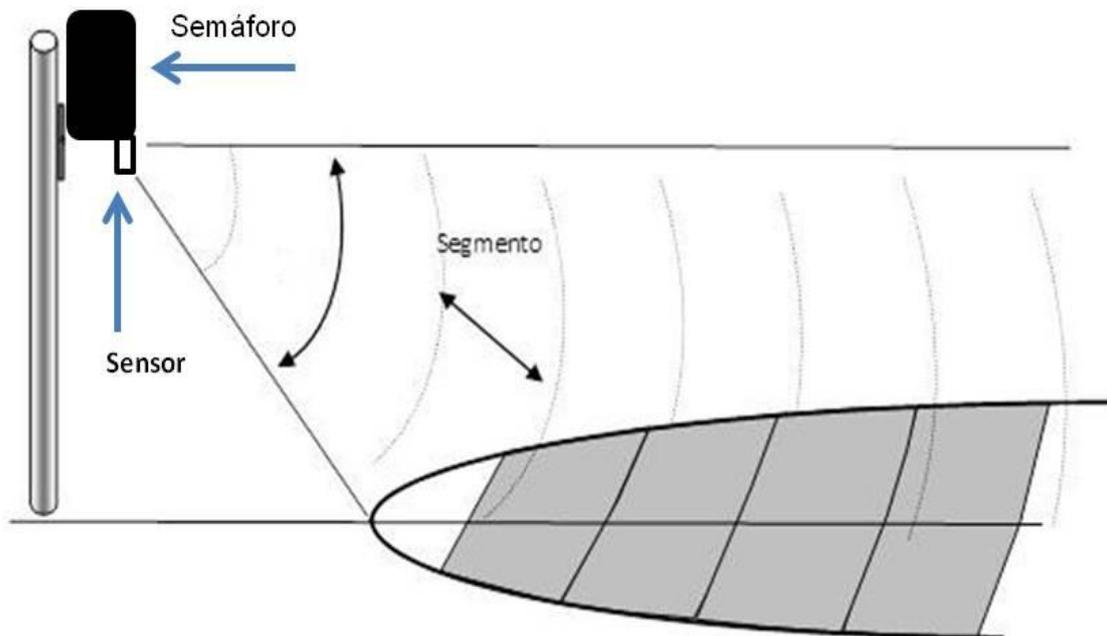


Figura 35 - semáforo e sensor na via

A calibração consiste em determinar a altura, a área e o tamanho do objeto que será detectado, parâmetros estes que devem ser ajustados na instalação do equipamento. Isso permite a detecção de veículos que se movam em sua direção ao atingirem a área de cobertura do projetada na via.

Quando apontado para uma via, o feixe de micro-ondas do equipamento projeta no pavimento uma superfície oval, cuja largura depende do modo

operacional selecionado, que neste caso detecção de veículos para controle do semáforo, conforme ilustra a Figura 36.

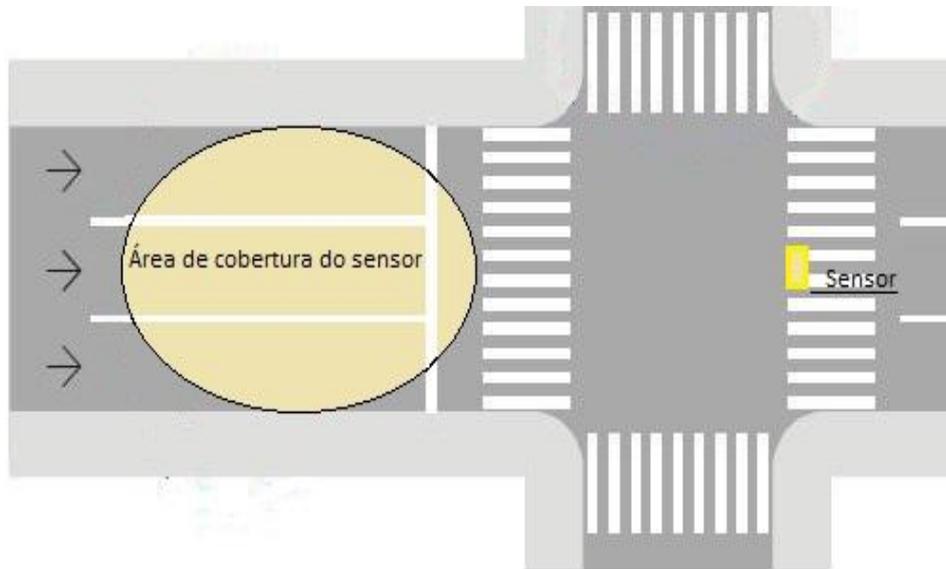


Figura 36 - Área de cobertura do sensor na via

Quando um veículo em trânsito entra na área de detecção do sensor há uma alteração na frequência recebida pelo sensor. Essa alteração gera um sinal elétrico que é interpretado pelo sistema como uma informação de veículo detectado.

Devido à área de cobertura abranger uma região nas laterais da via onde pode ocorrer o estacionamento de veículos, o sensor só detecta veículos em movimento. Caso o sensor captasse veículos estacionados ou parados ocorreria uma falha de interpretação no sistema de controle do semáforo, gerando uma dúvida quanto a real condição do veículo na via. Nesse caso um algoritmo seria necessário para diferenciar um veículo parado esperando pelo direito de cruzar a intersecção de um veículo estacionado na área de detecção do sensor, causando perda de tempo na interpretação do sinal e consequentemente restringindo o fluxo no cruzamento.

A instalação de um sensor auxiliar somente para detecção de veículos parados não se faz necessária, visto que este procedimento aumentaria o tempo de interpretação dos sinais e mesmo assim não garantiria se o veículo está estacionado ou somente parado esperando o direito de passagem. O sistema só não detecta o veículo na via nas seguintes hipóteses:

- Ao ser iniciado ou reiniciado em caso de queda de energia;

- Falha do detector, que pode ocorrer por quebra do mesmo ou em casos onde a interferência ambiental seja extrema, como uma chuva torrencial, e gerando sinais inconstantes.

O uso de semáforos inteligentes elimina a necessidade de controle de intersecções operando em programação de amarelo intermitente.

A utilização da operação em amarelo intermitente deve ficar restrita a horários em que a demanda de veículos em uma interseção controlada por semáforos é muito baixa, em que semáforos com programação de tempos fixos acabam gerando paradas desnecessárias. Quando utilizado corretamente, o amarelo intermitente reduz as paradas dos veículos. Entretanto, existem várias restrições ao seu uso, que devem ser observadas, evitando assim acidentes de trânsito.

O amarelo intermitente em interseções, em períodos de baixa demanda veicular, não deve ser utilizado nos seguintes casos:

- Onde pelo menos uma das vias tenha velocidade regulamentada acima de 60 km/h;
- Em semáforos que operam com três ou mais estágios veiculares;
- Onde existirem duas ou mais linhas focais próximas, em sequência, no mesmo campo de visão do condutor, e uma delas não possa operar em amarelo intermitente, o que poderia gerar dúvidas de interpretação do condutor.

Além das restrições apresentadas recomenda-se, por questões de segurança, que a decisão pelo uso do amarelo intermitente considere os seguintes fatores de risco:

- Presença de pedestres na interseção;
- Existência de duplo sentido de circulação em pelo menos uma das vias da interseção com velocidade regulamentada igual ou superior a 40 km/h, sem canteiro central ou com canteiro central com largura inferior a 5 m;
- Circulação de caminhões e ônibus.

O aspecto mais importante em uma interseção que opere em amarelo intermitente é a intervisibilidade dos condutores que se aproximam por movimentos conflitantes, garantindo que a distância de frenagem seja suficiente para que os condutores detenham seus veículos a tempo, e o risco de colisões será minimizado.

Por meio de seus sensores o semáforo inteligente pode reconhecer as diversas situações de tráfego na intersecção e sinalizar cada corrente de veículos de acordo com sua demanda, otimizando a utilização do cruzamento. No caso em que uma das vias tenha o seu volume reduzido durante determinados períodos, o sistema atuará mantendo o fluxo constante na via onde houver a detecção de veículos.

Durante o período noturno, o semáforo inteligente permite que o atendimento às solicitações de passagem seja mais rápido devido a menor demanda de tráfego no local.

Em um cruzamento sinalizado frequentemente ocorre à parada e a espera de abertura do sinal verde, apesar da não existência de veículos na via transversal. Com o semáforo inteligente essa espera é sensivelmente reduzida, pois quando o sinal dos detectores for reconhecido pelo sistema como um veículo, o pedido de passagem será rapidamente atendido, eliminado assim paradas desnecessárias no cruzamento.

Esse procedimento evita que motoristas ultrapassem o sinal vermelho, seja por impaciência ou por insegurança, em locais onde sinta que sua integridade física está ameaçada. Um aspecto interessante neste procedimento é a do motorista não ser induzido a cometer uma infração de trânsito.

Uma abordagem clássica do funcionamento do semáforo inteligente é a extensão do tempo de verde, em função das detecções de veículos nas vias. Para cada semáforo de uma intersecção é designado um tempo mínimo de verde, que é o tempo necessário para que os veículos que se encontram na área de detecção cruzem a intersecção em segurança. Caso o sensor detecte mais veículos na via o tempo de verde é estendido. O processo de extensão do período de verde só termina caso ocorra:

- Ausência de demanda para esse sinal verde;
- Detecção de veículo na outra via;
- A via atingiu o limite máximo de extensão de verde.

Nesses casos o semáforo terminará o ciclo de verde atual, passará inicialmente para amarelo e depois vermelho e liberará o sinal verde para a outra via. Esse procedimento é primordial para garantir o funcionamento do sistema se ocorrerem falhas em um ou mais detectores.

Portanto se fosse utilizado o método de amarelo intermitente, além das restrições já descritas, os problemas causados pelo uso do método de amarelo intermitente em caso de falha dos detectores seriam:

- Em um sensor, a via em questão não receberia o direito de passagem;
- Em ambos os sensores, nenhuma das vias receberia o direito de passagem e o sistema entraria em loop infinito.

No caso de falha ou incerteza em ambos os sensores, o controle da intersecção não é totalmente comprometido. Segundo Vilanova (2005) o funcionamento em amarelo intermitente na maioria dos casos ocorre por falha no sistema de controle do semáforo, impedindo seu funcionamento normal.

O caso mais complicado seria a falha de um único detector. Nesse caso a via onde ocorreu à falha não receberia o direito de passagem, devido ao sistema entender que não há demanda. O sistema funcionaria de modo errático, gerando conflitos no direito de passagem podendo assim causar acidentes.

O sensor de movimentos para detecção de veículos elimina o erro da detecção de veículos parados no meio-fio, ou estacionados de forma irregular, e o uso da alternância dos ciclos baseado no tempo mínimo de verde reduz os conflitos caso não ocorra à detecção de veículos, por falha de um ou mais sensores, mantendo o sistema funcionando. Essa operação é denominada falha segura, uma vez que na incerteza ou na falha do sensor, o sistema mantém o fluxo de veículos nas vias, funcionando de forma temporizada.

4.2 DIAGRAMA DE FLUXO

Na figura 37 é apresentado o diagrama de fluxo do sistema de controle do semáforo inteligente. Quando o sistema inicia ou reinicia por queda de energia elétrica, os semáforos que compõe a intersecção iniciam em vermelho por um período T_{min} (Tempo mínimo), parando o fluxo na intersecção e garantindo um início seguro. T_{min} é o tempo necessário para que os veículos que estão na intersecção terminem de cruzá-la e para novos veículos não entrem na área de conflito da intersecção, garantindo assim a segura no local. Ao termino do período T_{min} , o semáforo inicia o procedimento de liberação de uma das vias da intersecção e

mantém a interrupção na outra via. O procedimento de escolha de qual via será liberada poderá ser determinada de acordo com o histórico da intersecção ou de procedimentos definidos pelo órgão de trânsito. A via será liberada durante o tempo mínimo de verde e após este tempo ocorrerá à alternância desse ciclo por duas vezes. Esse é o tempo necessário para que o sistema obtenha a informação dos sensores sobre a presença de veículos. Para ilustrar melhor o funcionamento do fluxograma e, portanto do algoritmo de controle, apresentamos uma sequência de situações previstas para o controle dos semáforos.

- Situação 1: O sistema verifica o sensor da Via 1;
- Fase 1 - Ocorreu à detecção de veículos ele verifica se o ciclo da via 1 está ativo;
- Fase 2: Caso afirmativo ocorre à verificação de que o tempo de verde máximo (V_{max}) da via foi atingido. O tempo de V_{max} é o número máximo de extensões de verde para cada via. Este procedimento garante o direito de passagem para ambas as vias e em caso de falha ou incerteza do sensor de uma das vias, se esse procedimento não fosse adotado o tempo de verde seria estendido de forma infinita, comprometendo o funcionamento do sistema e gerando conflitos e acidentes na intersecção. Após a verificação de V_{max} e o mesmo não foi atingido há a extensão do tempo de verde para a via e leitura do sensor da outra via (via 2).
- Situação 2: O sistema verifica o sensor da Via 1;
- Fase 1: Ocorreu à detecção de veículos;
- Fase 2: Verificar o se o ciclo ativo é da Via 1, neste caso é negativo o ciclo esta ocorrendo na Via 2, espera o término do ciclo da Via 2 e inicia o ciclo de verde da Via 1;
- Fase 3: Inicia a leitura do sensor da outra via (via 2).
- Situação 3: O sistema verifica o sensor da Via 1;
- Fase 1: Ocorreu à detecção de veículos;
- Fase 2: Verifica o se o ciclo ativo é da Via 1, neste caso é positivo;
- Fase 3: Verifica V_{Max} nesta situação V_{max} foi atingido, portanto ocorre a alternância do ciclo, por meio da rotina Temporização;
- Fase 4: Ler o sensor da outra via (via 2).

- Situação 4: sistema verifica o sensor da Via 1;
- Fase 1: Não ocorreu à detecção de veículos;
- Fase 2: Inicia a leitura do sensor da outra via (via 2).

Os procedimentos de identificação e controle dos semáforos da intersecção tanto na via 1 quando na via 2 são idênticos e, portanto as situações de 1 a 4 ilustram o controle do sistema em ambas as vias.

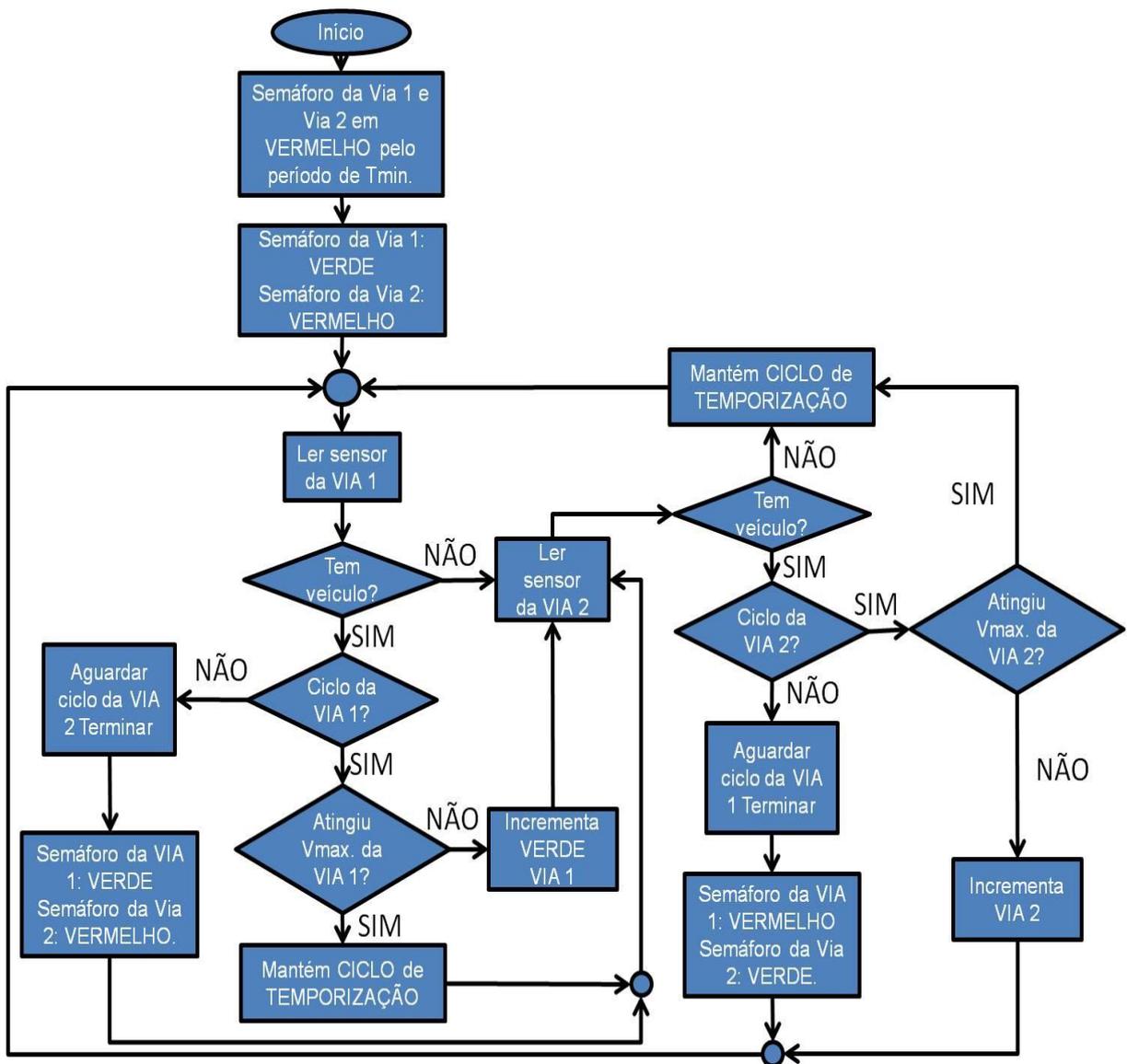


Figura 37 - Diagrama de fluxo do sistema de controle

4.3 RECURSOS DO SISTEMA

Os recursos disponíveis no sistema para o controle do cruzamento são:

- Determinar o tempo de ciclo ótimo de intersecção;
- Ajustar o tempo de verde necessário para cada fase;
- Manter o sistema funcionando em caso de falha de um ou mais sensores;
- Garantir a segurança na intersecção, evitando conflitos desnecessários;
- Manter sempre o melhor fluxo de veículos na intersecção;
- Eliminar o tempo de espera desnecessário nos cruzamentos;

4.4 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE PRESENÇA

Os principais requisitos para a utilização do sensor de presença em um sistema de semáforo inteligente:

- Baixo custo de aquisição;
- Facilidade de instalação e manutenção, não necessitando a interdição da via para sua execução;
- Baixo custo de instalação e manutenção, não necessitando cortes ou instalações diretas na via;
- Baixa sensibilidade a variações ambientais, tais como, chuva, neblina, luminosidade e temperatura;
- Possibilidade de utilização de um microcontrolador por cruzamento;
- Garantia de acertos.

4.5 SELEÇÃO DO SENSOR DE PRESENÇA

A Análise das técnicas de detecção leva em conta os custos, tempo de desenvolvimento, área de detecção, local de instalação, dificuldade de implantação e

disponibilidade de materiais. Estes critérios foram avaliados separadamente e combinados determinando assim a seleção do sensor. A tecnologia escolhida foi a de micro-ondas, que utiliza ondas eletromagnéticas e o efeito Doppler na detecção dos veículos. Entretanto antes da definição da tecnologia de micro-ondas de efeito Doppler ter sido escolhida, foi estudada a tecnologia baseada em imagem, possibilitando assim determinar sua real viabilidade. A detecção de presença com base em sensores de imagem foi estudada e sugerida por Barbeta e Arantes (2010). Portanto primeiramente será estudada a viabilidade do uso de um sensor de imagem como detector de presença e verificada sua viabilidade.

4.5.1 SENSOR DE MICRO-ONDAS

Segundo Maxwell, as ondas eletromagnéticas envolvem a presença de um campo elétrico e um campo magnético variáveis no tempo que se induzem mutuamente e propagam-se no espaço (RIBEIRO, 2008). A geração desses campos pode ser a partir de uma corrente elétrica que varie no tempo e a onda eletromagnética gerada possuirá a mesma frequência dessa corrente, conforme Figura 38.

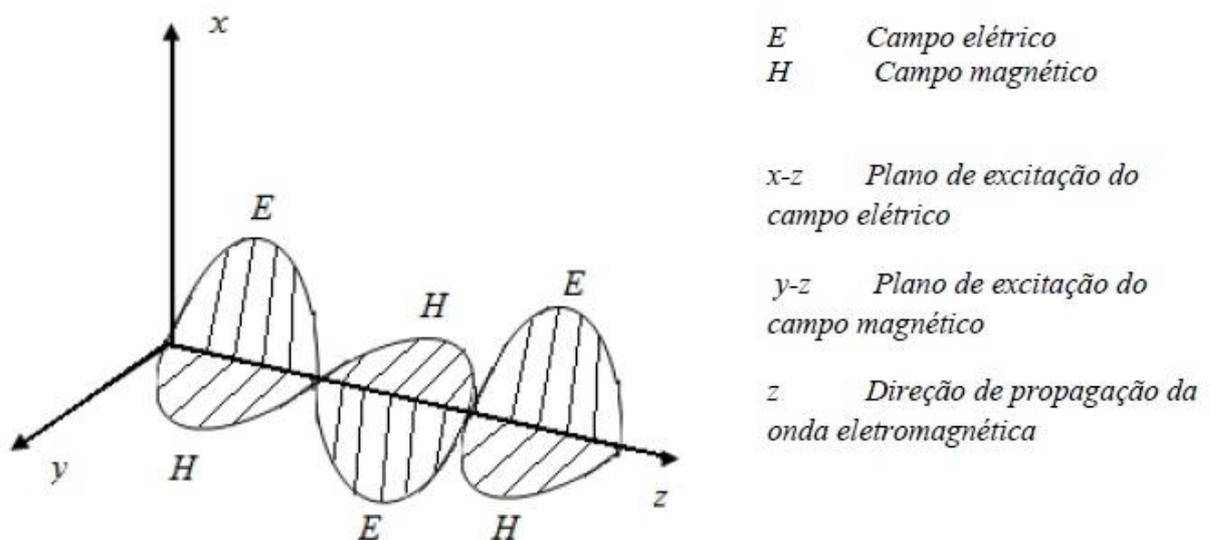


Figura 38 – Campo elétrico e campo eletromagnético de uma onda
 Fonte: Ribeiro (2008)

O Efeito Doppler é uma característica encontrada nas ondas eletromagnéticas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento em relação ao observador, que se encontra fixo em um ponto.

Se R for a distância que separa o radar de seu alvo, tendo o comprimento de onda λ , corresponde a uma excursão angular 2π radianos, assim essa mesma excursão angular total φ feita pela onda eletromagnética é igual a $4\pi R/\lambda$ radianos.

Para um alvo em movimento, R e φ estarão variando em relação ao tempo, essa variação de excursão angular total φ em relação ao tempo é igual à frequência.

Esta é a frequência angular de Doppler ω_d , dada pela expressão:

$$\omega_d = 2\pi \cdot f_d = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi \cdot v_r}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

f_d é a frequência de Doppler e v_r é a velocidade relativa entre o alvo e o radar. Sendo assim, a frequência de Doppler é dada pela seguinte expressão:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v_r \cdot f_0}{c} \quad (2)$$

Onde f_0 é a frequência de emissão e c a velocidade de propagação da luz (3×10^8 m/s). A velocidade relativa também pode ser escrita da forma $v_r = v \cos(\theta)$, sendo v o módulo da velocidade do alvo e θ o ângulo entre a trajetória do alvo e a linha que o une ao radar.

Assim, quando o objeto estiver aumentando sua distância em relação ao radar, a resultante do Efeito Doppler se tornará cada vez mais negativa e decrescente, pois a frequência do eco recebido será menor que a frequência de emissão do transmissor, indicado na equação seguinte:

$$f_{eco} = f_0 - f_d \quad (3)$$

Por outro lado, quando o objeto estiver diminuindo sua distância em relação ao radar, conforme a Figura 39, a resultante do Efeito Doppler se tornará cada vez mais positiva e crescente, pois a frequência do eco recebido será maior que a frequência de emissão do transmissor, indicado na equação seguinte:

$$f_{eco} = f_0 + f_d \quad (4)$$

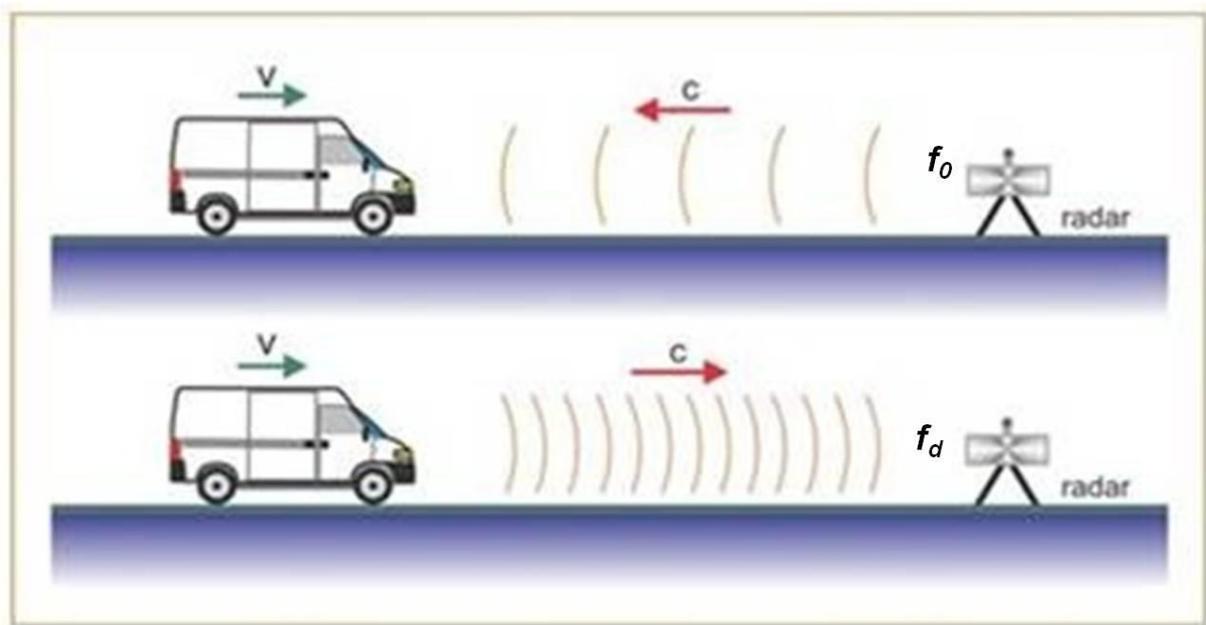


Figura 39 - Frequência emitida (f_0) e frequência recebida (f_d)

Fonte: Mazzuco, Lima e Ferlin (2012)

Esses radares emitem um sinal de rádio contínuo, não existindo assim a necessidade de tempos de escuta e de emissão típicos dos radares de impulso. Esse tipo de radar pode ser utilizado para detectar objetos em movimento e seu sentido de deslocamento.

O sensor de micro-ondas de efeito Doppler é um sistema detector de movimento que utiliza ondas eletromagnéticas. Por emitir sua própria radiação eletromagnética (*REM*) é considerado um sensor ativo. E, portanto, capaz de operar nas mais diversas condições ambientais, tais como luz solar ou em sua ausência, neblina, fumaça e chuvas moderadas (HENDERSON e LEWIS, 1994).

Os sinais elétricos de alta frequência são enviados em direção ao objeto a ser monitorado. As informações são obtidas por meio das ondas que retornam a partir da reflexão do objeto que se movimentem na área de detecção.

O sensor de micro-ondas MDU 1720 de Efeito Doppler é composto de uma placa de circuito impresso (*PCB*) com as antenas do módulo de transmissão e recepção, conforme a Figura 40.

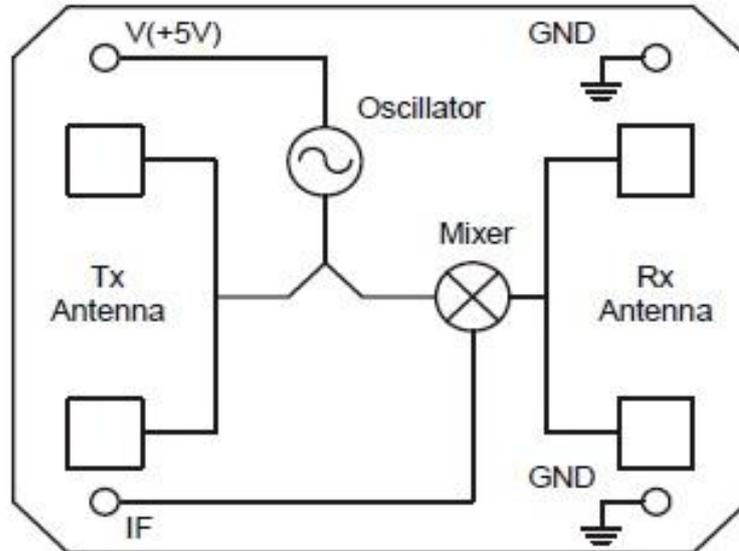


Figura 40 – Placa de circuito impresso do Sensor de micro-ondas

O sinal de oscilador de 10,525 GHz é encaminhado para a antena *Transmitter (Tx)*, e também a um diodo misturador (*mixer*). A saída do diodo misturador de Frequência Intermediária (*IF*) contém o sinal a diferença das frequências transmitidas e recebidas, juntamente com os componentes do sinal original e produtos de intermodulações harmônicas.

A diferença de frequência do sinal, resultante da mistura das frequências do sinal de transmissão e do sinal de retorno é um componente importante. A magnitude desse sinal é proporcional à reflexão da energia transmitida e está na gama de microvolts (μV). O sinal de saída do sensor passa por um circuito detector do sinal Doppler, Figura 41, onde um filtro passa baixas, elimina todos os sinais de frequências mais altas e ruídos, permitindo a passagem do sinal de diferença entre as frequências transmitidas e recebidas. Após passar pelo filtro o nível de tensão do sinal ainda é muito baixo necessitando ser amplificado. A etapa de comparação consiste em transformar o sinal amplificado em uma saída digital, comparando-o com o sinal de referência do comparador de tensão (*VC*), que neste caso é de 5 V.

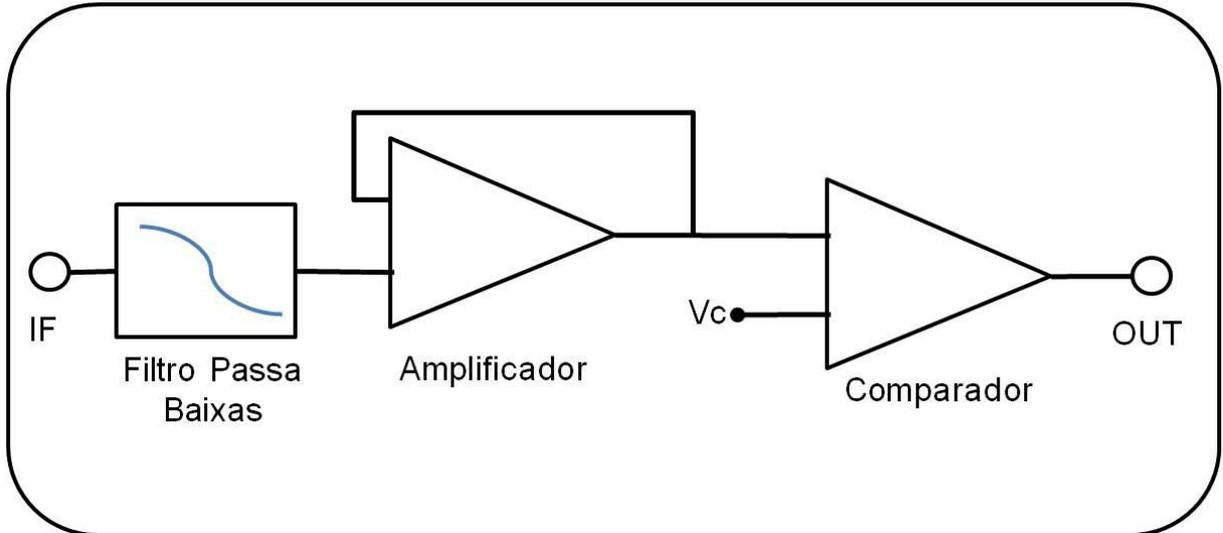


Figura 41 – Diagrama de blocos do circuito de detecção do sensor

O sinal de diferença de frequência está relacionado com a componente de velocidade do objeto e ao sensor por meio desta expressão:

$$F_d = 2V \cdot \left(\frac{F_t}{c}\right) \cdot \text{Cos}\theta \quad (5)$$

Onde:

F_d = frequência diferença entre a frequência emitida e a frequência recebida.

V = velocidade do alvo.

F_t = Frequência de transmissão.

c = velocidade da luz em 3×10^8 m/s.

θ = ângulo entre o objeto e o sensor.

O limite de velocidade das vias na cidade de São Paulo atualmente é de 60 km/h. Segundo o INMETRO (1998), os medidores de velocidade fixos ou estáticos de veículos admitem um erro máximo ± 7 km/h para velocidades até 100 km/h e de $\pm 7\%$ para velocidades superiores de 100 km/h. Como margem de segurança pode-se definir essa margem de tolerância no caso do projeto em 9 km/h.

Portanto a velocidade máxima de detecção nesse caso é 69 km/h, e essa informação é importante para definição da frequência de detecção do circuito de acordo com a expressão (6).

Onde:

F_d = frequência Diferença (referida como a frequência Doppler) [Hz]

V = velocidade do objeto [m/s]

F_t = (Frequência de transmissão) 10.525 GHz

c = (velocidade da luz) $3 \cdot 10^8$ m/s

$\cos \theta$ = (ângulo do objeto em movimento, perpendicular à PCB da antena) 1

$$F_d = 2 \cdot 19,16 \cdot \left(\frac{10,525 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \right) \cdot 1 \quad (6)$$

$$F_d = 1,34 \text{ kHz}$$

Definida a frequência de detecção do circuito pode-se definir a resistência e o capacitor do filtro passa baixas. A Figura 42 apresenta o circuito passa baixas não inversor utilizando um amplificador operacional.

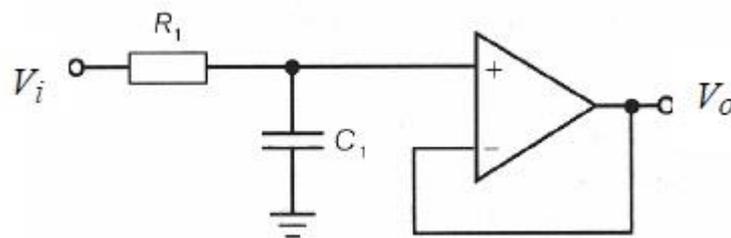


Figura 42 – Filtro Passa Baixas

A frequência de corte do circuito é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (7)$$

Onde:

f_c = Frequência de corte do filtro passa baixas igual 1,34 kHz

R_1 = Resistência R [Ω]

C_1 = Para C escolhido igual a 2,2 nF

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,34 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}}$$

$$R_1 = 54 \text{ k}\Omega$$

4.6 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

O circuito de detecção foi desenvolvido e simulado por meio do software *Proteus* versão 7.4. A Figura 43 apresenta o circuito de detecção do sensor de movimento.

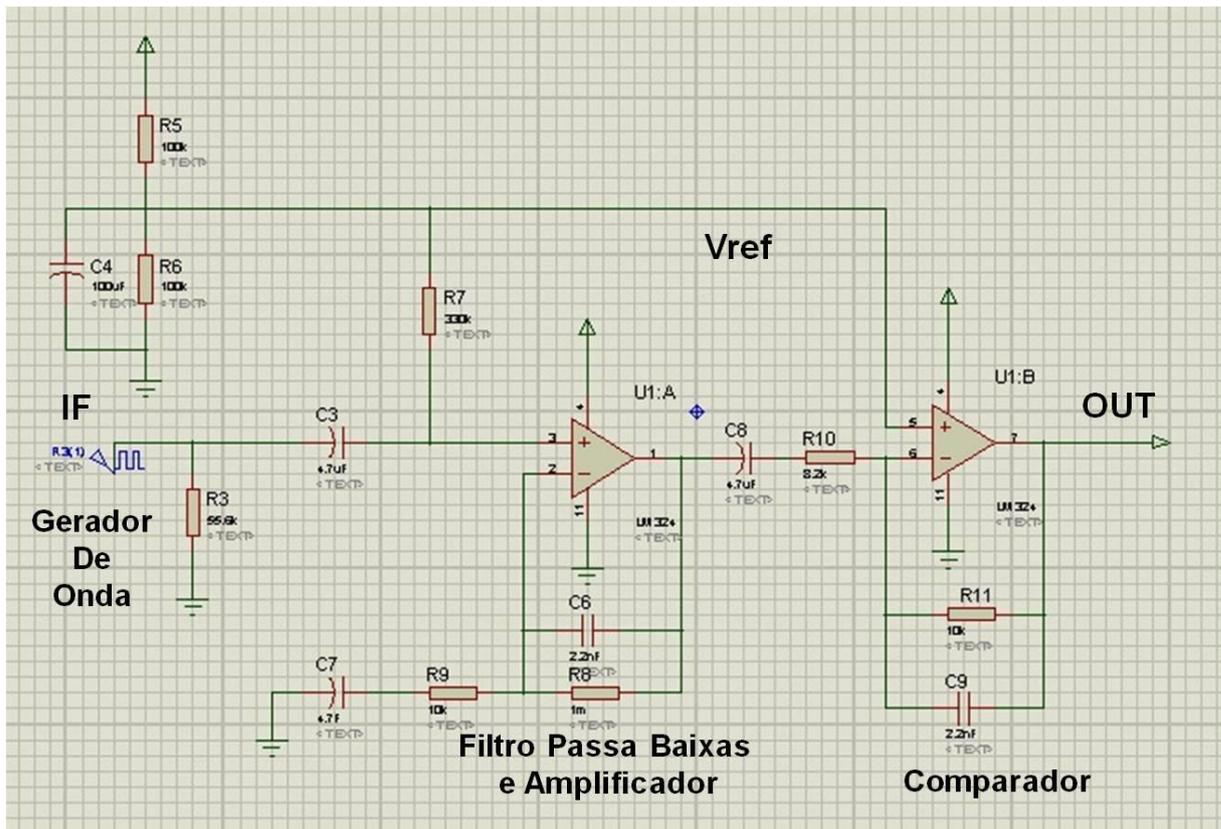


Figura 43 – Simulação do circuito de detecção

Para representar o sensor de micro-ondas utilizou-se um gerador sinal de onda quadrada com frequência de 100 Hz, permitindo verificar o funcionamento do circuito no simulador. A figura 44 mostra as propriedades do gerador de sinal.

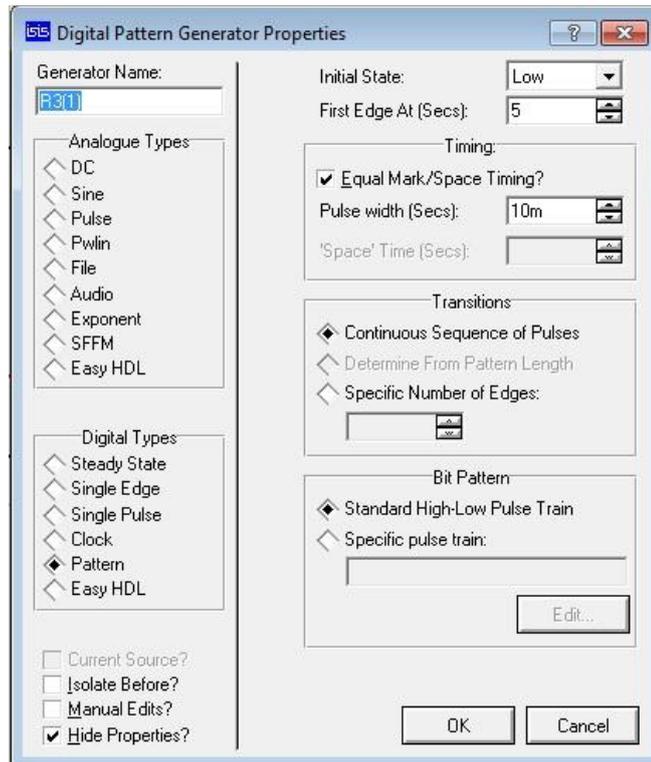


Figura 44 – Propriedades do gerador de sinal

O gerador de onda está configurado para iniciar a geração de pulsos após 5 segundos do início da simulação. Esse tempo é necessário para simular a falta de veículos na via pública. A figura 45 ilustra o sinal de saída do circuito detector no início da simulação.

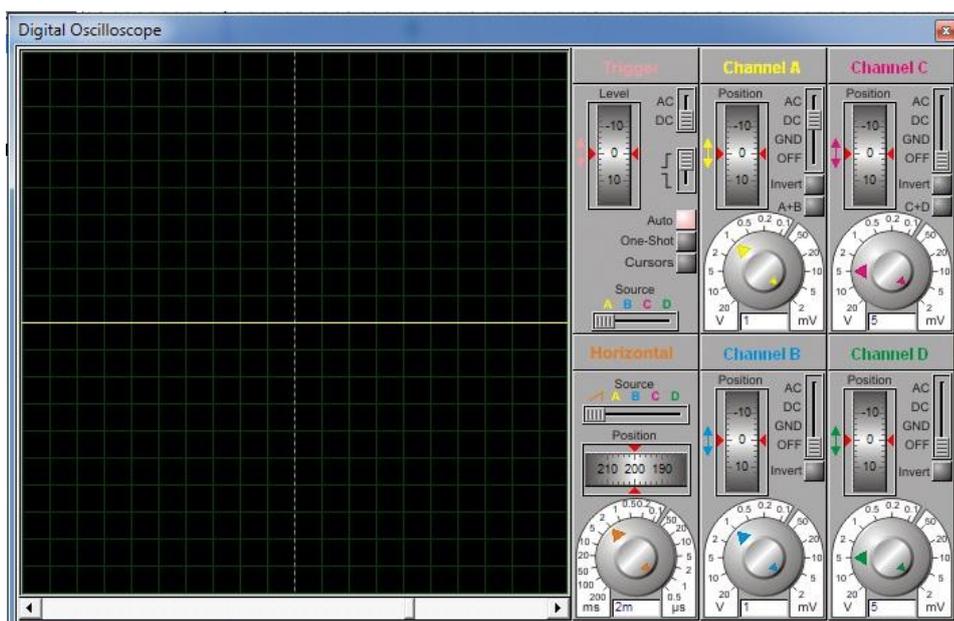


Figura 45 – Propriedades do gerador de sinal

Pode-se observar na Figura 45 que o nível de sinal na saída (*OUT*) do circuito de detecção é de zero volt.

A Figura 46 apresenta o sinal do gerador que se inicia após 5 segundos do início da simulação de veículos na via pública.

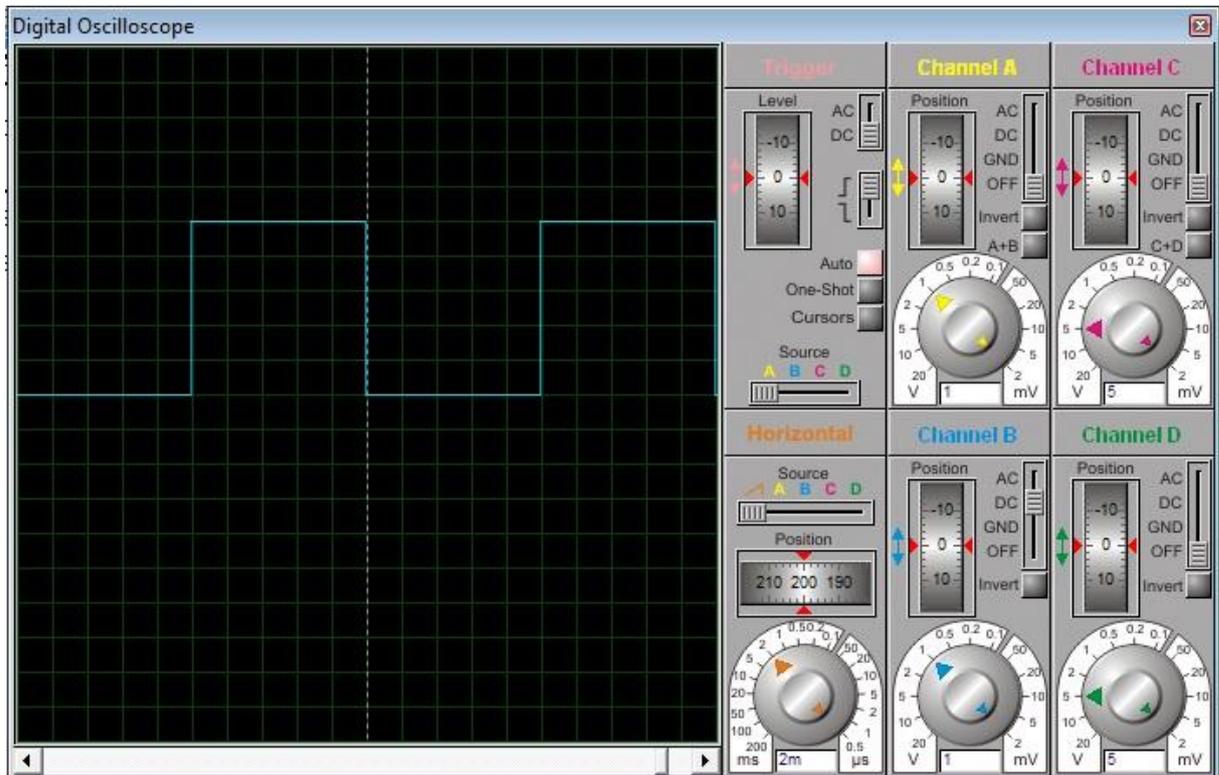


Figura 46 – Propriedades do gerador de sinal

Com a geração da onda quadrado do gerador de sinais entra na primeira etapa do circuito de controle formado por um amplificador operacional, essa etapa é composta de filtro passa baixas não inversor com ganho de tensão, responsável por filtrar os sinais de alta frequência, em uma segunda etapa o sinal é comparado com uma tensão de referência (V_{ref}) e digitalizado. Após ser digitalizado o sinal é disponibilizado na saída (*OUT*), indicando a detecção do veículo. A Figura 47 ilustra o sinal digitalizado na saída.

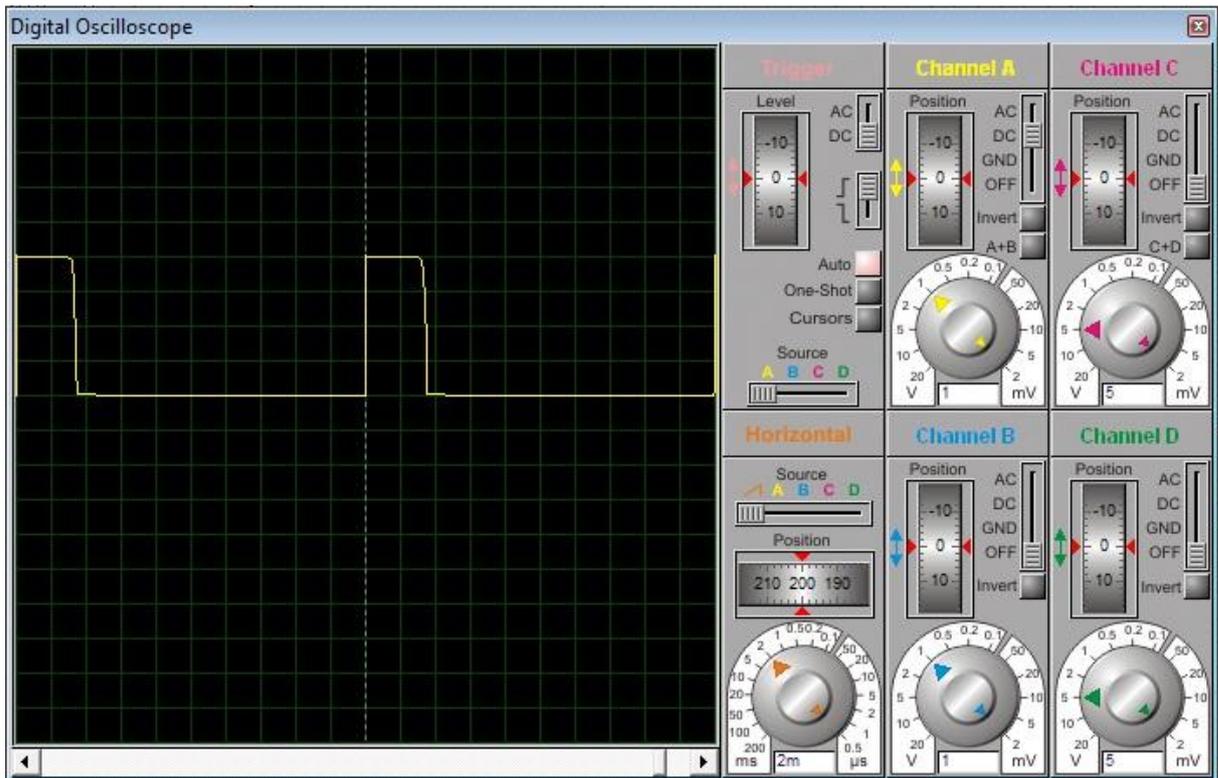


Figura 47– Sinal de detecção de veículo na saída (OUT)

Observando a Figura 47 nota-se que o sinal na saída (OUT) do circuito detector é uma onda quadrada e está pronto para ser utilizado em um microcontrolador, neste caso para ser utilizado pelo circuito do semáforo inteligente.

5. RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o circuito de detecção montado em uma placa de circuito universal, conforme a Figura 48, que representa o circuito diagramado na Figura 43.

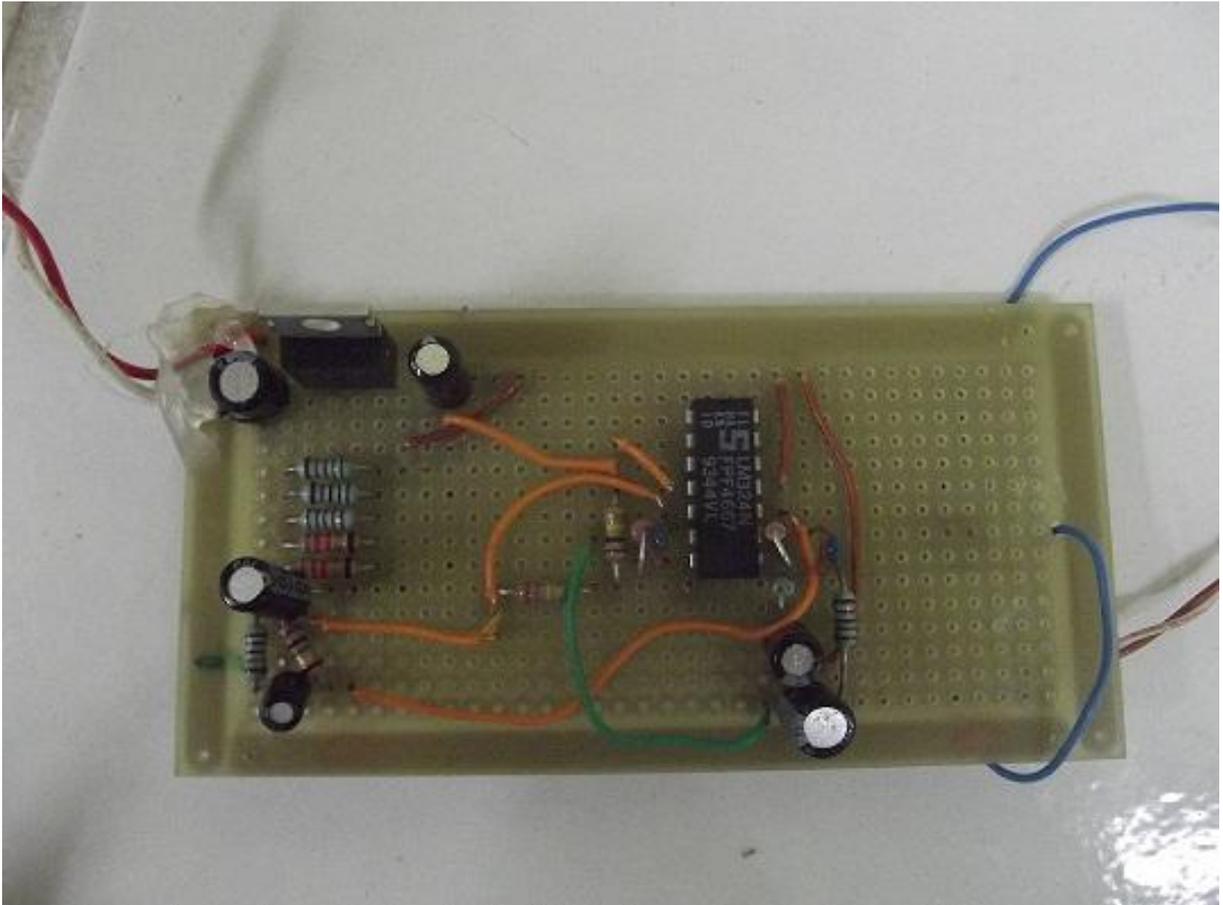


Figura 48 – Circuito de detecção

A verificação de presença ou ausência de um veículo é realizada a partir da coleta e processamento do sinal elétrico gerado pelo sensor de micro-onda.

Os testes foram realizados em uma via pública por dois dias intercalados no período da manhã durante duas horas. A fim de quantificar a quantidade e tipos de veículos detectados efetuou-se a soma dos períodos, estando os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade e tipos de veículos detectados

Veículo	Quantidade
Automóvel	40
Motocicleta	25

Durante o período de teste não ocorreram falhas na detecção dos veículos que transitavam pela via pública, mesmo quando estes transitam próximos.

A Figura 49 apresenta o início dos testes, Neste caso a via encontra-se sem a presença de veículos e, portanto não há sinal na saída do circuito de detecção.

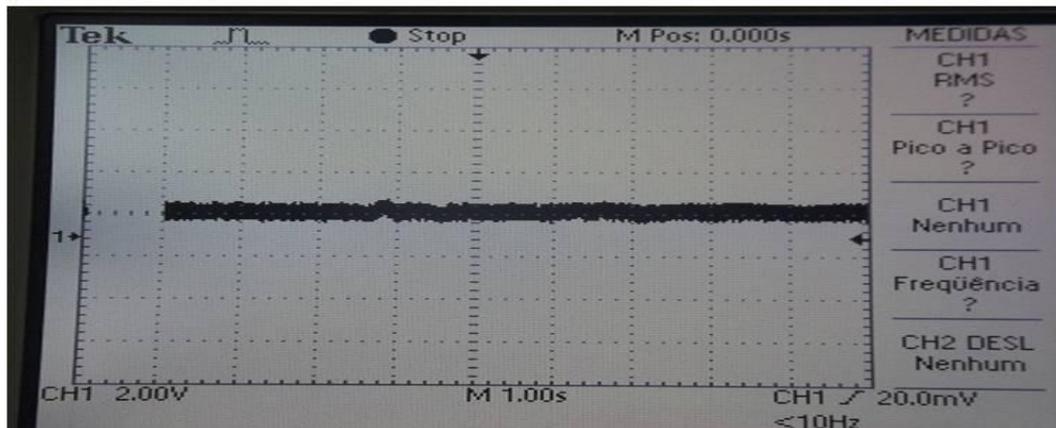


Figura 49 – Sinal de saída do circuito de detecção sem a presença de veículos

A Figura 46 mostra o sinal de saída do circuito sensor com a detecção de uma motocicleta na via.

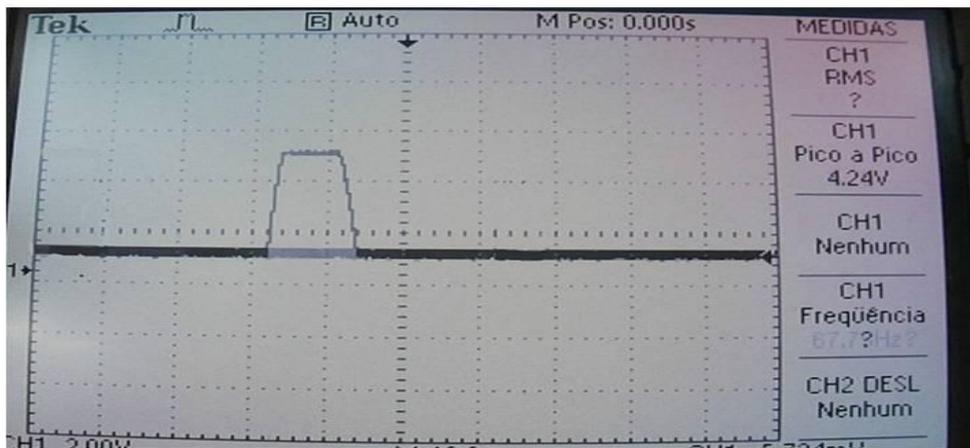


Figura 50 – Detecção de uma motocicleta na via

A Figura 47 mostra o sinal de saída do circuito sensor detectando um veículo na via.

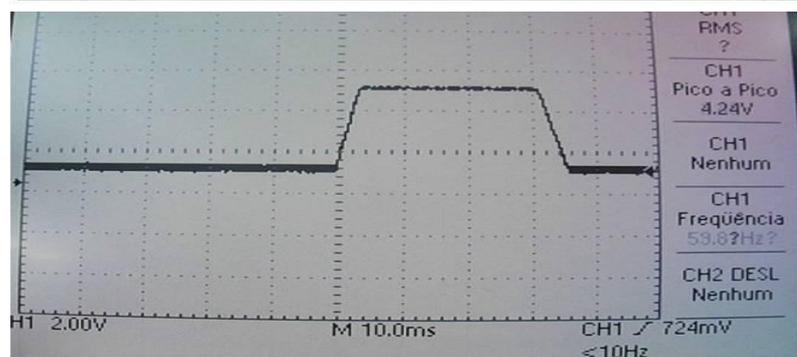


Figura 51 – Detecção de um veículo na via

Os resultados de detecção foram válidos, as detecções tanto de uma motocicleta como de um veículo geraram uma onda quadrada na saída do circuito de controle com uma amplitude de quatro volts como demonstrado nas figuras 50 e 51, justificando sua utilização para o controle de um semáforo inteligente.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho estudou a viabilidade da utilização de uma câmera de vídeo analógica e monocromática como detector de presença, mas devido às suas desvantagens como limpeza periódica das lentes, desempenho limitado em situações de intempéries como chuva, neblina, etc., ou em situações como sombras, contraste entre o veículo e a via, transição do dia para a noite e o processamento complexo. A complexidade do processamento digital das imagens e sua utilização na detecção de presença exige um sistema de controle para cada via da intersecção composto por um sensor de imagem, um microcontrolador *slave*, um conversor A/D, um separador de sincronismo de sinal de vídeo, um transceptor, uma memória *SRAM* e um contador para o endereçamento da memória. O aumento do número de novos componentes elevou os custos o que fez com que o circuito torna-se inviável.

Este trabalho apresentou os possíveis sensores de presença para utilização em semáforos inteligentes, e definiu como a melhor solução um sensor de micro-ondas de Efeito Doppler para a detecção de veículos em uma via pública. O sensor de micro-ondas devido às suas características não intrusivas e facilidade de implantação apresenta-se como uma solução adequada na redução de custos, quando comparado com outros sensores que necessitam de instalações físicas no solo ou na lateral da via, pode, portanto, ser instalado em todos os semáforos de uma cidade, evitando o que ocorre com os sistemas sofisticados, que por limitações de custo, priorizam os cruzamentos de maior tráfego.

O circuito de detecção do sensor de presença foi testado em uma via pública, e funcionou de forma adequada detectando o movimento na área de atuação do sensor. Obteve-se na saída do circuito de detecção do sensor um sinal digital que possibilita sua implantação em um semáforo inteligente.

A utilização de semáforos inteligentes é uma ferramenta importante e adequada na solução dos problemas de trânsito em uma intersecção.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se desenvolver uma interface de comunicação via porta paralela ou serial para configuração e calibração do sistema proposto neste trabalho permitindo os ajustes mais precisos durante sua instalação e manutenção.

Pode-se desenvolver um algoritmo baseado na demanda de tráfego denominado Volume-Densidade determinado o número de veículos que se aproximam da interseção de uma determinada área ou de conjunto de semáforos interligando-os por rede wireless, controlando o tráfego de uma região de forma mais eficaz.

REFERÊNCIAS

- ARANTES, R. A. Controle de Semáforo Eletrônico Inteligente. 59f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica/Eletrônica). Universidade de Taubaté. Taubaté, 2010.
- BARBETA, D. B. Sensor de Presença a Partir do Processamento Digital de Imagens. 70f. : il.; 30 cm. Monografia (Graduação em Engenharia de Telecomunicações). Universidade de Taubaté. Taubaté, 2010.
- BITTENCOURT, D. C. Resultado de Pesquisa “Antes e Depois” – Corredor Pompéia. 9p. (Nota Técnica da CET 205/2001) Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, 2001.
- CROSTA, A. P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Unicamp. Campinas, 1992.
- DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito. Manual de Semáforos. 172 p., II (Col. Serviços de engenharia, 4), 2ª ed., Brasília, 1984.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento, Convênio 102/2007 DNIT/UFSC, Santa Catarina, 2007.
- CAMPOS, L. P. G. Impacto de Obras na Via Pública. 80p. il. (Boletim Técnico da CET nº 30). Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 1982.
- CHRISTIANINI, W. A. C.; HAGIWARA, S.S. Operação de Trânsito: Um Desafio Permanente. 56p. (Boletim Técnico da CET nº 44). Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 2008.
- CLOWES, D.J. Urban Traffic Control: Past, Present and Future. Transport and Road Research Laboratory, UK, Second International Conference on Road Traffic Control 15-18, Institution of Electrical Engineers, UK, 1986.
- ERHARDT-FERRON, A. Theory and Applications of Digital Image Processing. University of Applied Sciences Offenburg, 1ª ed., 2000.
- FHWA – Federal Highway Administration – Traffic Detector Handbook: Third Edition – Volume I, USA, October, 2006.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital Image Processing: Second Edition. Prentice-Hall. New Jersey, 2001
- HALVORSEN, D. Finger on the Pulse – Piezos on the Rise. Traffic Technology International, June/July, 1999.
- HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. Radar In: Manual of Remote Sensing – Principles and Applications of Imaging Radar. New York: John Wiley & Sons. 3ª Edition. 750 p. 1994.

HENRY, L. C.; RECKER, L. W. Paramics Pluglin Documents – Loop Data Aggregator. PATH ATMS Center, University of California, Irvine, 2003.

HOMBURGER, W. S.; KELL, J. S.; PERKINS, D. D. Fundamentals of Traffic Engineering. 13^a ed., Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, USA, 1992.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo. Brasil, Portaria nº 115, de 29 de Junho de 1998.

KLEIN, L. A.; KELLEY M. R.; MILLS M. K. Evaluation of Traffic Detection Technologies for IVHS, SPIE Vol. 2344 Intelligent Vehicle Highway Systems p. 42 – 53, 1994.

Lei 13.332/02 | Lei nº 13.332 de 04 de abril de 2002 de São Paulo – Dispõe sobre o Funcionamento dos Semáforos Após as 23:00 horas e dá outras Providências. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/813645/lei-13332-02-sao-paulo-sp>>, acesso: junho de 2011.

LITWILLER, D. CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. Dalsa – Technology with Vision. Canadá. 2001.

MARQUES FILHO O.; VIEIRA NETO H. Processamento Digital de Imagens. Brasport, ISBN 857420098, Rio de Janeiro, 1999.

MAZZUCO, A. C.; LIMA, F. G.; FERLIN, G. S. Relatório Efeito Doppler e Sistema Doris. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Seminário sobre Efeito Doppler, UNESP, Presidente Prudente, 2012.

MICHALOPOULOS, P.G.; JACOBSON R. D.; ANDERSON C. A.; BARBARESSO J. C. Integration of Machine Vision and Adaptive Control in the Fast-Trace IVHS Program. 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., January, 1993.

MICROWAVE SOLUTIONS. MDU 1720 Microwave Motion Sensor DataSheet. Disponível em: <<http://docs.microwave-solutions.com/createPdf.php?id=MDU1720>>, acesso: agosto de 2012.

MING, S. H.; POWLER G. R. Avaliação Antes/Depois – Semáforos Inteligentes (SEMin), Eixos Alvarenga/Camargo. 9p. (Nota Técnica da CET 202/98) Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 1998.

MORAIS, L. L. Estudo Sobre Tecnologia de Computação Aplicadas a Sistemas de Controle de Tráfego Urbano, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Curso de Pós-graduação em Ciências da Computação, Trabalho Individual, Porto Alegre, março de 1999.

MUNHOZ, E. A. M. Sistema de Controle de Tráfego: Aplicação do Programa TRANSYT. 92 p. il. (Série: Boletim Técnico da CET nº 10) Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 1978.

NATIONAL INSTRUMENTS. Video Signal Measurement Fundamentals. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/4750/en>>, acesso: junho de 2011.

PASSOS, J. C. F. Sensores: Os Olhos Mecânicos da Mecatrônica Industrial. Editora Saber. São Paulo, 2002.

PRANZL, M.; Os painéis de mensagem variável como fonte de informação das condições de tráfego: Uma metodologia de suporte ao operador, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte, COPPE/UFRJ, 1999.

RIBEIRO, J. A. J. Engenharia de Microondas – Fundamentos e Aplicações, Ed. 1, 608 p., Editora Érica, São Paulo, 2008.

ROESS, R. P.; McSHANE, W. R.; PRASSAS, E. S. Traffic Engineering. Prentice Hall, 2º ed., United States of America, 1998.

SAFAAI-JAZI, A., ARDEKANI, S. A., MEHDIKHANI, M. A Low-cost fiber optic weigh-in-motion sensor. Final Report Virginia Polytechnic Institute and State Universidade, Blacksburg, 1990.

SANTOS, J. E. S. Minicurso de Introdução a Instrumentação, Semana Acadêmica de Projetos e Instalações Elétricas, FURG/CTI, Rio Grande, RS, 2006.

SZASZ, P. Á. Estudo da Viabilidade e Implantação de Centralização Semáforica na Cidade de Campinas, Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas (EMDEC), Campinas, Brasil, 1997.

VIANNA, A. C. Computação Gráfica. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://inf.ufes.br/~thomas/graphics/www/disc_cg.html>. Acessado em Dezembro 2012.

VILANOVA, L. M. Critérios para a Implantação de Semáforos. 2007. Disponível em: <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/criterios_implantacao_semaforos.pdf>. Acessado em agosto de 2012.

VILANOVA, L. M. O controle de Semáforos em Tempo Real: A Experiência de São Paulo. 70 p. (Boletim Técnico da CET, 38) Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 2005.

WANG Y.; NIHAN N. L. Can Single-Loop Detector Do the Work of Dual-Loop Detectors? Journal of Transportation Engineering, ASCE, March/ April, p. 169 – 176, 2003.

WEBSTER, F. V.; COBBE, B. M. Traffic Signal, Road Research Technical, HMSO, London, UK, 1966.

APÊNDICE A - Sensor de micro-ondas MDU 1720

O sensor MDU 1720 possui alta sensibilidade, alta fidelidade, baixo consumo de energia, baixa emissão de harmônicas e tamanho reduzido, atendendo as necessidades do projeto, conforme os parâmetros descritos na Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 1 - Características Elétricas do Transmissor (Adaptado de Microwave Solutions, 2012)

Frequência de operação	10,525 GHz
Precisão de ajuste da frequência	3 MHz
Potência de saída (min.)	13 dBm <i>EIRP</i>
Tensão de operação	+ 5 V \pm 0.25 V
Corrente de Operação	40 mA (típico) – 60 mA (máximo)
Emissões de harmônicas	<- 7,3 dBm
Largura de pulso (min.)	5 μ s

Tabela 2 - Características Elétricas do Receptor (Adaptado de Microwave Solutions, 2012)

Sensibilidade	(10 dB S/N) – 86 dBm
Ruído	<10 μ V

Tabela 3 - Características da Antena (Adaptado de Microwave Solutions, 2012)

Ganho	8 dBi
Largura de feixe	-3 dB
Plano Vertical	72°
Plano Horizontal	36°

Tabela 3 - Características físicas (Adaptado de Microwave Solutions, 2012)

Peso	9 g
Guia de conexões	2,54 mm de espaçamento.
Coeficiente Tensão/temperatura	3 dB
Coeficiente Frequência/Temperatura	6,5 MHz.
Temperatura de operação	-10° C a + 55° C.