

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Karolie Nobre Dantas Grassi

Sistema de medição e monitoramento da velocidade de veículos automotivos

Campina Grande
Setembro de 2009

KAROLIE NOBRE DANTAS GRASSI

Sistema de medição e monitoramento da velocidade de veículos automotivos

Relatório de Projeto de Engenharia Elétrica apresentado à Coordenação de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Orientador: José Gutemberg de Assis Lira

Campina Grande
Setembro de 2009



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Agradecimentos

Aos professores Freire e Gutembergue, pela orientação e conselhos, por acreditarem na minha capacidade e pelas oportunidades que tem me concedido de aprender.

A meu namorado e colega de profissão, Bruno Emmanuel, pelos aconselhamentos acerca deste trabalho e pela presença paciente e carinho que me dedica.

A todos os professores, funcionários, colegas de ambiente de trabalho e em especial aos amigos que me acompanharam e que de fato contribuíram positivamente nesta etapa da minha caminhada.

Dedicatória

A Deus.

A minha família, em especial meus pais Eugênio Pacelli Dantas Grassi e Joseiza Nobre Fernandes, que me deram suporte e que se dedicam com afinco e amor à missão de pais também educadores; a minha irmã Estephanie, que com muito carinho e paciência me apoiou; a minha avó, Izabel Fernandes Nobre, sempre nutrindo minhas esperanças com palavras de incentivo e amor.

Índice

1. Introdução	1
2. Requisitos básicos do sistema	2
2.1 Comparação entre os sensores disponíveis no mercado	2
2.2 Unidade de controle	3
2.3 Fornecimento de energia ao sistema	4
3. Sensores indutivos: características	4
3.1 Princípio de funcionamento.....	4
3.2 Restrições físicas.....	5
4. Materiais e métodos.....	6
4.1 <i>Hardware</i>	6
4.1.1 Sensores.....	6
4.1.2 Oscilador	7
4.1.3 Unidade de controle	11
4.2 <i>Firmware</i>	11
4.2.1 Algoritmos para implementação da medição usando microcontrolador	13
5. Resultados	15
6. Conclusões	16
7. Referências bibliográficas	17

1. Introdução

Atualmente, cresce a necessidade por sistemas de monitoramento e controle de tráfego de veículos automotivos nas vias públicas e conseqüentemente de sistemas de detecção de tais veículos. Uma das funcionalidades de um sistema de controle de tráfego de veículos automotivos é a medição e monitoramento da velocidade dos veículos, para fins de aplicação das penalidades previstas na legislação de trânsito em vigor aos condutores de veículos que ultrapassem os limites estabelecidos pelas mesmas. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo o projeto de um sistema de medição e monitoramento da velocidade de veículos automotivos.

2. Requisitos do sistema

Basicamente, no desenvolvimento de um sistema de medição que atuará em campo, como é o caso do sistema projetado, é necessário considerar os requisitos do local onde o sistema atuará, para evitar seu mau funcionamento ou desligamento não desejado e possíveis danos aos seus elementos. Para isto, devem ser considerados se a tecnologia dos sensores utilizados é apropriada para as condições do local, a forma de implementação do sistema de aquisição de dados e as condições necessárias para manter o equipamento operando em segurança, sem afetar nem ser afetado por outras instalações elétricas ou fatores externos.

2.1 Comparação entre os sensores disponíveis no mercado

Em um sistema de medição de velocidade de veículos automotivos, é possível utilizar diferentes tipos de sensores de velocidade. Os mais utilizados neste tipo de sistema são citados na tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das tecnologias que podem ser usadas em detectores de veículos.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Ultra-som	- Tamanho compacto, fácil instalação.	- Pode ser sensível à temperatura e a turbulências do ar.
Doppler de microondas	- Funciona bem sob mau tempo; - Mede diretamente a velocidade do veículo.	- Não é capaz de detectar veículos parados ou veículos se movendo a velocidades muito baixas.
Radar de microondas	- Funciona bem sob mau tempo; - Mede diretamente a velocidade do veículo; - Opera no modo <i>side-looking</i> ;	- Requer uma antena direcionada para confinar área de detecção impressão no modo <i>forward-looking</i> .
Infravermelho passivo (apenas recebe)	- Maior distância visível em neblina com relação a sensores de comprimento de onda maior;	- Pode ter seu desempenho degradado por chuvas ou neve pesadas;
Infravermelho ativo (transmite e recebe)	- Maior distância visível em neblina com relação a sensores de comprimento de onda maior; - Mede diretamente a velocidade dos veículos.	- Pode ter seu desempenho degradado por chuvas ou neve pesadas;
Processador de imagem no espectro visível (sensores de	- Fornece dados para o gerenciamento do tráfego e	- Pode ter seu desempenho degradado por chuvas ou neve

luz, utilizando fotografia)	imagens sobre a incidência de incidentes; - Uma câmera e um processador podem servir múltiplas vias; - Pode fornecer um vetor com vários dados sobre o tráfego pode ser fornecido;	pesadas; - Veículos grandes podem obscurecer veículos menores; - Sombras, reflexões do pavimento úmido e transições do dia/noite podem resultar em detecções perdidas ou detecções falsas.
-----------------------------	--	--

Fonte: *Vehicle Detector Technologies for Traffic Management Application*, [1].

Os sensores mais utilizados em sistemas de medição e monitoramento da velocidade de veículos automotivos são:

- Infravermelho;
- Sensores de luz no espectro visível (fotografia);
- Indutivos.

Os sensores a infravermelho são de baixo custo, mas além das limitações técnicas expostas na tabela 1 podem, dependendo da sua disposição no local de medição, ser alterados por transeuntes através da colocação de obstáculos que impeçam a emissão ou a recepção de luz pelo sensor, por exemplo. O uso de processamento digital de imagens, além das limitações expostas na tabela 1 requer softwares mais sofisticados e portanto tem um custo de desenvolvimento maior. Por esta razão, os laços indutivos são, desde os anos 60, os sensores mais utilizados na medição de velocidade de veículos automotivos em vias públicas.

2.2 Unidade de controle

O sistema de medição deve estar de acordo com a Resolução nº 115 do Inmetro, de 29 de junho 1998, atualmente em vigor, que estabelece que, entre outros requisitos:

- A divisão mínima nas medidas deve ser de 1 km/h;
- O erro máximo da medição da velocidade para unidades testadas em laboratório deve ser de ± 1 km/h para valores medidos até 100 km/h e de ± 2 km/h para valores superiores;
- Na apreciação técnica da unidade em condições de uso e na verificação metrológica inicial pelo Inmetro, o erro máximo da medição da velocidade deve ser de ± 3 km/h para valores medidos até 100 km/h e de ± 3 % para valores superiores, quando do uso de sensores estáticos, como é o caso dos laços indutivos.
- Em verificações metrológicas periódicas ou eventuais, na utilização de sensores estáticos o erro máximo da medição da velocidade pelas unidades deve ser de ± 5 km/h para valores medidos até 100 km/h e de ± 5 % para valores superiores;
- Os medidores de velocidade, os dispositivos complementares e acessórios devem ser fabricados com materiais de resistência adequada e possuir características capazes de assegurar a

estabilidade desses instrumentos nas condições normais de uso;

- A determinação da velocidade dos veículos deve realizar-se de forma concomitante.

- Os medidores de velocidade automáticos, como é o caso deste projeto, devem ser dotados de dispositivo seletor de velocidades que permita ajustar previamente a velocidade de controle;

Além disso, é interessante que o sistema disponha de calibração na medição da frequência natural dos osciladores (e, portanto, dos laços indutivos), visto que esta frequência pode variar de acordo com as condições do ambiente.

Outro requisito a ser definido é a comunicação do sistema de monitoramento com um microcomputador, para armazenamento dos eventos: data, hora e velocidade do veículo, a qual pode ser feita, a princípio usando o protocolo RS-232.

2.3 Fornecimento de energia ao sistema

De acordo com a Resolução nº 115 do Inmetro, de 29 de junho 1998, atualmente em vigor, os seguintes requisitos, referentes ao fornecimento de energia ao sistema, devem ser atendidos:

- Os medidores de velocidade devem ser ter, além de botão liga/desliga, indicador de estabilidade de tensão e/ou indicador de bateria;

- O instrumento deve ser provido com um autodiagnóstico, independente do circuito de medição capaz de verificar as funções e o bom funcionamento de todos os circuitos desde a entrada até a saída do medidor de velocidade; este autodiagnóstico pode ser automático quando o medidor de velocidade é ligado, e deve também ser disponível por acionamento manual;

- Quando no autodiagnóstico for acionado um dispositivo de registro, este deve identificar claramente a situação de teste.

Além disso, o medidor deve atender operar corretamente sob condições como:

- Tensão elétrica de alimentação entre -10 % a +20 % da tensão nominal para corrente contínua e entre -15% a +10%, para corrente alternada.

- Radiações eletromagnéticas com intensidade de campo de 10 V/m em frequências entre 80 MHz a 1000 MHz;

- Boa sensibilidade mesmo a temperaturas ambientes de -10°C a +55°C e umidade relativa do ar entre 10% e 95%.

3.1 Sensores indutivos: características

3.1.1 Princípio de funcionamento

Em um sistema de medição de velocidade de veículos automotivos, o laço indutivo é inserido em um circuito eletrônico sintonizado no qual o laço e o cabo de ligação do laço são os elementos indutivos. Quando um veículo passa sobre o laço indutivo ou pára sobre o laço, ao mesmo tempo aumenta a permeabilidade magnética do indutor (o que aumenta a sua indutância) e induz as

chamadas *eddy currents* nos laços indutivos; o efeito resultante é a diminuição da indutância dos mesmos. Isto aumenta a frequência de oscilação do circuito e pode ser detectado por um controlador como sendo a passagem ou presença de um veículo [KLEIN et al, 2006].

3.1.2 Restrições físicas

Frequências de operação

A faixa de frequências de operação de um laço indutivo em um sistema de medição de velocidade recomendada por [KLEIN et al, 2006] é de 10 kHz a 200 kHz. Entretanto, [KLEIN et al, 2006] também cita que para frequências da ordem de 10 kHz, o efeito das capacitâncias entre o laço indutivo e seu invólucro (o material dielétrico usado para protegê-lo de intempéries na cavidade aberta no asfalto) é significativo. Para frequências muito altas, é preciso utilizar uma unidade controladora com um relógio de frequência muito alta, o que aumenta consideravelmente o custo do produto.

Fontes de erro na medição

Devido à passagem constante de veículos e à existência da indutância mútua entre espiras que conduzam uma corrente elétrica e que estejam próximas, observam-se os seguintes fatores que podem comprometer o desempenho do sistema de medição:

- *Splash over*, que consiste em uma falsa detecção causada por um veículo que trafega na faixa adjacente;

- *Crosstalk*, que consiste na interferência de campos magnéticos entre laços indutivos muito próximos [NISHIMOTO, 2006], dependendo da distância entre os laços (que limita a indutância mútua entre eles);

- Trajetórias irregulares dos veículos, que podem aumentar o tempo durante o qual o veículo percorre a distância entre os laços, acarretando na medição de uma velocidade menor que a do percurso em linha reta e portanto com menor exatidão [KI & BAIK, 2006]; este tipo de problema pode ser evitado diminuindo a distância entre os laços e inserindo no asfalto blocos que delimitem o percurso do veículo na passagem sobre os laços.

- Um espaçamento grande entre os laços também pode levar à detecção simultânea de mais de um veículo, quando da passagem de veículos muito próximos, o que pode resultar em erros muito grandes; isto pode ser reduzido pela diminuição da distância entre os laços, a custo de um aumento do efeito do *crossover* causado pela indutância mútua entre eles, mas pode também ser tratado em um algoritmo de tratamento de erros, que teste se o resultado da medição é aceitável com relação às condições físicas envolvidas na medição.

Uma outra característica é que a variação de frequência dos dois laços é diferente; assim, os tempos de início e fim do laço são inexatos [KI & BAIK, 2006].

3. Materiais e Métodos

3.1 Hardware

3.1.1 Sensores

Utilizou-se um par de laços indutivos semelhantes, com 6 m de perímetro e 1,5 m de fio trançados na extremidade para interligação com a unidade de controle.

Configuração dos sensores

Forma: Com base no estudo feito por [KI & BAIK, 2006], escolheu-se duas configurações dos dois laços para realização de testes: inicialmente, os dois laços com formato quadrado com lados 1,5 de comprimento e os dois laços com formato retangular, com 1 m de largura e 2 m de comprimento.

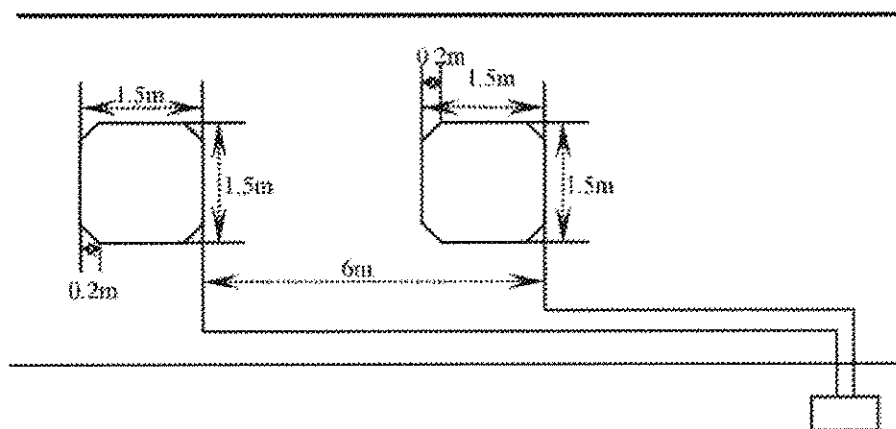


Figura 1: Layout dos laços indutivos, sugerido por [KI & BAIK, 2006].

Distância: Segundo [KI & BAIK, 2006], [KLEIN et al, 2006] o espaçamento de 4,9 m entre as extremidades dos laços indutivos apresentou melhores resultados, mas para melhorar a precisão é necessário aumentar a distância tanto quanto for possível. Veículos como caminhões mais longos terão suas velocidades subestimadas, e carros mais curtos produzirão velocidades sobrestimadas, e por esta razão não há uma distância que permita a melhor detecção possível para todos os tipos de veículos. Entretanto, isto pode ser tratado no algoritmo de detecção da passagem dos veículos.

Frequência de operação

Tendo em vista as restrições colocadas por [KLEIN et al, 2006], escolheu-se inicialmente a frequência de 20 kHz. A partir deste valor de frequência e dos valores medidos dos parâmetros dos laços, projetou-se o oscilador senoidal. Para proteger a unidade de controle, inseriu-se entre o oscilador e a unidade de controle um transformador de pulsos, com relação entre os números de espiras do primário e do secundário de 1:1. Isto, bem como a verificação dos valores do capacitor

usado (não eletrolítico) fez com que a frequência de oscilação de cada laço fosse de cerca de 62,5 kHz, ao invés do valor inicialmente usado no projeto do oscilador.

Parâmetros dos laços indutivos

Para projetar o circuito oscilador, é necessária a medição dos valores de resistência, capacitância e indutância dos laços indutivos. Entretanto, devido ao comportamento predominantemente indutivo dos laços, a capacitância dos mesmos foi desconsiderada neste projeto. Para medição da resistência, da indutância e do fator de qualidade dos laços usou-se uma ponte RLC que realiza medições nas frequências 120 Hz e 1 kHz. Por simplicidade, mediu-se os parâmetros de apenas um laço e na frequência de 1 kHz, valor mais próximo do da frequência de operação. Os valores obtidos são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros elétricos dos laços indutivos utilizados.

Parâmetro	Frequência = 1 kHz
Resistência, R_s (Ω)	0,85
Indutância L_s (H)	$272,6 \times 10^{-6}$
Fator de qualidade, Q	≈ 2

Em se tratando de uma rede RLC, conhecidos os valores de R_s , L_s e Q para as determinada frequência, pode-se calcular os valores de R_s e L_s na frequência de operação do circuito no qual a rede é introduzida.

3.1.2 Oscilador

A configuração inicialmente proposta é mostrada na figura 2.

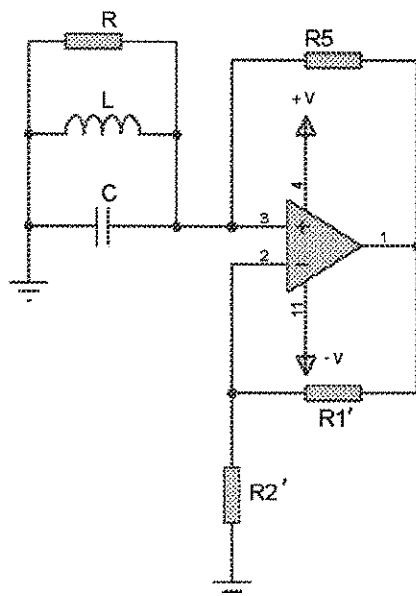


Figura 2: Oscilador RLC senoidal.

Para esta configuração, tem-se que:

$$G_1 = 1 + \frac{R'_2}{R'_1} \quad \text{e} \quad \frac{R'_1}{R'_1 + R'_2} = \frac{R_L}{R_L + R_5}$$

O ganho de malha fechada deve ser igual a 1 para que o circuito oscile. Entretanto, devido ao erro associado aos valores dos componentes, esta condição não é atingida, mesmo com o uso de resistores de valor ajustável. Para efetuar o controle automático do ganho, testou-se diferentes configurações. Obteve-se melhor resultado inserindo um componente cuja resistência é controlada por tensão: um JFET operando em uma faixa praticamente linear. Assim, usou-se a configuração mostrada na figura 3, com o transistor BF245, o amplificador operacional TL084 e o diodo 1N4148.

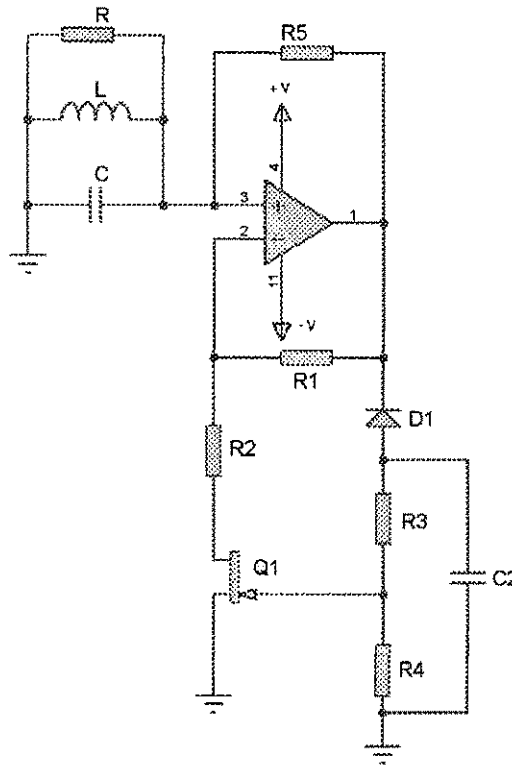


Figura 3: Oscilador RLC senoidal com controle automático de ganho.

O gráfico da operação do JFET de canal tipo-n é mostrado na figura 3. As condições de oscilação do circuito da figura 3 são as seguintes:

$$G_2 = 1 + \frac{R_1}{(R_2 + r_{DS})}, \quad R_2 + r_{DS} = R'_2 \text{ k}\Omega \text{ e } \frac{R_2 + r_{DS}}{R_1 + R_2 + r_{DS}} = \frac{R_L}{R_L + R_5},$$

onde a resistência dinâmica do JFET é dada por $r_{DS} = \frac{\partial v_{GS}}{\partial i_D}$.

A corrente de dreno do transistor é dada por:

$$\begin{aligned} i_D &= I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \\ &= I_{DSS} \left(1 - 2 \frac{v_{GS}}{V_P} + \frac{v_{GS}^2}{V_P^2} \right) (1 + \lambda v_{DS}) \end{aligned}$$

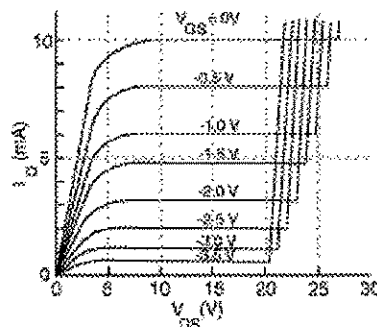
Visto que $\lambda = 1/V_A$, onde V_A é a tensão de Early e apresenta um valor alto em módulo, pode-se considerar que $\lambda v_{DS} \rightarrow 0$ e tem-se [SEDRA & SMITH, 2000]:

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - 2 \frac{v_{GS}}{V_P} + \frac{v_{GS}^2}{V_P^2} \right)$$

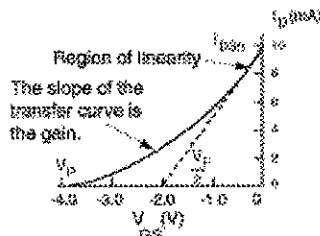
$$\frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} = \frac{1}{r_{DS}} = I_{DSS} \left(-\frac{2}{V_P} + 2 \frac{v_{GS}}{V_P^2} \right)$$

$$r_{DS} = \frac{\partial v_{GS}}{\partial i_D} = \frac{1}{2 I_{DSS} \left(\frac{v_{GS}}{V_P} - \frac{1}{V_P} \right)} = \frac{1}{\frac{2 I_{DSS}}{V_P^2} (v_{GS} - V_P)}$$

onde I_{DSS} é a corrente i_D quando $v_{GS}=0$ e V_P é a tensão negativa v_{GS} para a qual o JFET pára de conduzir, como mostrado na figura 3b.



Common source JFET characteristic curves



Transfer curve for a JFET (after Disbaterster & Holter)

Figura 3: Curvas de operação de um JFET de canal tipo-n.

O controle de r_{DS} é feito então através da tensão v_{GS} . Conforme mostrado na figura 3a, se a tensão v_{DS} for limitada a valores suficientemente baixos (aproximadamente 200 mV), a corrente i_D varia linearmente para qualquer tensão v_{GS} aplicada.

Quando a tensão v_{GS} aumenta (devido a uma diminuição da tensão v_S), a resistência r_{DS} diminui. Quando r_{DS} diminui, v_G diminui e conseqüentemente v_{GS} diminui, o que faz com que a resistência r_{DS} aumente. Desta forma, ao valor da resistência dinâmica do JFET é compensado e o ganho de malha fechada do circuito permanece igual a 1, satisfazendo a condição necessária para que oscile.

4.1.3 Unidade de controle

Optou-se por projetar a unidade de controle usando um microcontrolador da Microchip, o PIC 16F877, com um relógio controlado por um oscilador a cristal piezoelétrico com o maior valor de frequência possível disponível para microcontrolador.

3.2 Firmware

O erro da frequência de oscilação do cristal, f_{osc} , é $\delta_{f_{osc}} = f_{osc} \times EF \times FEF$ Hz, onde EF é a estabilidade de frequência do cristal e FEF é um fator de conversão da estabilidade de frequência em unidade de frequência. A frequência de oscilação do cristal varia então entre $f_{osc} - \delta_{f_{osc}}$ Hz e $f_{osc} + \delta_{f_{osc}}$ Hz. Considerando os osciladores a cristal (com estabilidade de frequência da ordem de ppm) descritos a seguir, tem-se que $FEF = 1 \times 10^{-6}$ e a frequência varia como mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Faixa de valores da frequência de oscilação do cristal de quartzo.

f_{osc} (MHz)	Estabilidade de frequência (ppm)	$\delta_{f_{osc}}$ (Hz)	$f_{osc_{min}}$ (MHz)	$f_{osc_{max}}$ (MHz)
4	±50	200	3,9998	4,0002
20	±30	600	19,9994	20,0006

O intervalo de tempo durante o qual o microcontrolador realiza uma instrução ou ciclo de instrução, é dado por $f_{uC} = f_{osc}/4$, de modo que o tempo de um ciclo é igual a $T_{uC} = 1/(f_{osc}/4)$. Assim, para um desvio de EF ppm, o mínimo ciclo de instrução do microcontrolador é $T_{uC_{min}} = 1/(f_{uC_{max}}) = 1/(f_{osc}/4 + EF)$ e o máximo ciclo de instrução do microcontrolador é $T_{uC_{max}} = 1/(f_{uC_{min}}) = 1/(f_{osc}/4 - EF)$. Para os cristais acima referidos, o ciclo de instrução varia como mostrado na tabela 4.

Tabela 4 – Faixa de valores da frequência de oscilação do cristal de quartzo a serem utilizados.

$f_{ciclo} = f_{uC}$ (MHz)	$T_{ciclo_{min}} = T_{uC_{max}}$ (μs)	$T_{ciclo_{max}} = T_{uC_{min}}$ (μs)
1	0,9999500	1,0000500
5	0,1999988	0,2000012

Para medir de velocidade através dos microcontroladores PIC (em particular do PIC 16F877, que será usado no projeto), pode-se utilizar a periodicidade dos *timers*, os quais são, em termos simples, contadores de eventos, tanto para medir a frequência de oscilação de cada laço indutivo como para medir o intervalo de tempo durante o qual o veículo percorre a distância entre os dois laços.

Para medir de velocidade através dos microcontroladores PIC (em particular do PIC 16F877, que será usado no projeto), pode-se utilizar a periodicidade dos *timers*, os quais são, em termos simples, contadores de eventos, tanto para medir a frequência de oscilação de cada laço indutivo como para medir o intervalo de tempo durante o qual o veículo percorre a distância entre os dois laços.

Para medir os valores de frequência do laço, pode-se usar um *timer* do microcontrolador, com a melhor resolução possível (a de um ciclo de instrução) de modo que

$$f_{\text{laço}} = \frac{n}{T_s} \text{ Hz,}$$

onde n é o número de bordas de subida do sinal de entrada durante o intervalo de amostragem e T_s é o período de amostragem, ou seja, o período mínimo que se pode ajustar para a contagem do *timer* do microcontrolador, expresso em segundos.

Calculando-se através do MATLAB o erro de contagem de um *timer* de um microcontrolador PIC na medição da frequência de oscilação do laço indutivo, com um passo de 1 Hz, na faixa de 40 kHz a 80 kHz (a frequência de oscilação do laço, nas condições de laboratório e nos testes do oscilador em campo, é de cerca de 62,5 kHz) os erros máximos de cerca de 8% e 1,5% para f_{osc} igual a 4 MHz e 20 MHz, respectivamente. Deste modo, apesar de para 4 MHz o erro ser diferente de zero para um número menor de valores de frequência do laço indutivo, o erro com a frequência de operação do cristal de 20 MHz é cerca de cinco vezes menor, o que mostra ser mais vantajosa a utilização do cristal com esta frequência para a entrada de relógio do microcontrolador.

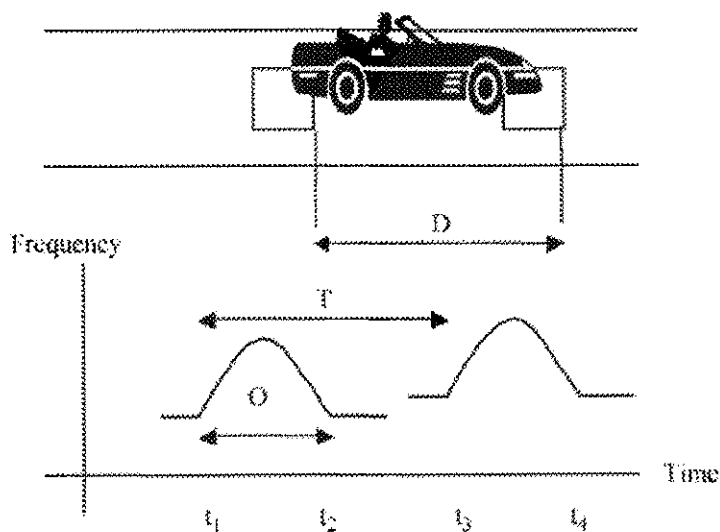


Figura 4: Exemplo da variação da frequência de oscilação dos laços na passagem de um veículo automotivo. [KI & BAIK, 2006].

A velocidade do veículo ao passar pelo centro dos dois laços indutivos é

$$vel = \frac{d}{\Delta t} \text{ m/s ou } vel = 3,6 \frac{d}{\Delta t} \text{ km/h,}$$

onde d é a distância entre os laços indutivos, em metros, e

Δt é o intervalo de tempo entre a passagem do veículo pelo centro do primeiro laço e pelo centro do segundo laço, em segundos (de acordo com a figura 4, pode ser dado por $t_3 - t_1$, por exemplo).

Utilizando outro *timer* do microcontrolador com a melhor resolução possível, que é T_{uc} , pode-se contar quantos intervalos T_{uc} ocorrem durante a passagem do veículo sobre os laços, de modo que, conhecido o valor de t para a distância fixa na qual os laços foram instalados, pode-se de acordo com [KI & BAIK, 2006] calcular a velocidade por

$$vel = 3,6 \frac{d}{m \times T_{uc}} \text{ km/h.}$$

Mesmo que o veículo passe pelos dois laços a uma velocidade alta, o erro possível na contagem do intervalo de tempo transcorrido na passagem pode ser desprezado, pois é de no máximo 0,0002512 % e 0,000005 % para f_{osc} igual a 4 MHz e 20 MHz, respectivamente.

Uma terceira componente de erro que se deve ao uso do microcontrolador depende do método usado na implementação por software, pois o microcontrolador precisa realizar duas tarefas básicas que têm restrição de tempo: medição da frequência de oscilação dos laços e do intervalo de tempo de passagem do carro. Dependendo do atraso entre o atendimento da rotina de detecção do veículo pelo primeiro laço e o atendimento da rotina de início da contagem do intervalo de tempo

Δt pelo processador do microcontrolador, pode haver um erro considerável e crítico em uma destas contagens, comprometendo a exatidão do cálculo da velocidade.

3.2.1 Algoritmos para implementação da medição usando microcontrolador

Medição da frequência

Dois métodos básicos podem ser usados para aquisição do sinal de entrada:

- A conversão A/D do sinal senoidal dos laços indutivos e posterior cálculo da frequência: [KI & BAIK, 2006] citam que Pursula e Kosomen descobriram que o erro padrão das velocidades medidas com “assinaturas analógicas” do sinal oscilatório é um terço do erro padrão com a saída saída digital com limites pré-estabelecidos. Assim, uma vantagem deste método é a obtenção de valores do sinal senoidal com boa precisão. A velocidade do veículo é determinada usando-se o ponto de 50% de amplitude do limite inicial das assinaturas dos primeiro e do segundo laços. Entretanto, este método tem as desvantagens do atraso da conversão e a necessidade de armazenar na memória um número considerável de valores.

- O uso do módulo de contagem de pulsos em conjunto com o *timer* do microcontrolador: Nesta implementação, o sinal senoidal v_{i1} e v_{i2} são saturados, de modo a se obter ondas

quadradas, com tensão positiva igual a 5 V se $v_i > 0$ e com tensão igual a 0 V se $v_i < 0$. Através dos pinos CCP1 e CCP2, são monitoradas as bordas de subida dos sinais v_{i1} e v_{i2} . A cada subida destes sinais, é ativada a interrupção do módulo Capture/Compare correspondente e é incrementado, dentro do módulo, um contador. O próprio módulo Capture/compare dispõe de um contador, cujo valor máximo (ou de *overflow*) é definido na configuração inicial do microcontrolador. Ao término da contagem, através de uma regra de três e de acordo com a periodicidade dos ciclos de máquina do microcontrolador, é possível calcular a frequência dos sinais v_{i1} e v_{i2} . Um pseudocódigo para a realização desta tarefa é mostrado a seguir:

1. Configurar o módulo de captura para capturar as bordas de subida do sinal saturado;
2. Configurar o pré-escalador do *timer* para que o contador do mesmo tenha seu valor máximo de *overflow*, ou seja, para contar o período máximo que pode ser contado (que depende do número de bits do *timer*);
3. Quando houver uma interrupção do módulo de captura ocorrer subtrair o tempo inicial do tempo final, isto é, as duas contagens do *timer* nos instantes t_1 (quando uma interrupção do módulo de captura) e t_2 (quando houve a interrupção seguinte do módulo de captura).
4. Testar o *flag* de *overflow* do *timer*, para monitorar se o seu valor deve ser *resetado*.

Medição de tempo de passagem

O tempo de passagem pode ser obtido pela diferença entre o tempo em que ocorre o pico de frequência no primeiro laço e o pico de frequência no segundo laço.

Cálculo da velocidade

Como a medição da frequência de oscilação dos dois laços e do tempo de passagem do veículo são críticos, pois erros grandes nos valores medidos podem acarretar erros consideráveis no valor da velocidade, o valor do tempo de passagem pode ser armazenado na memória e o cálculo da velocidade (que também consome tempo de processamento) ser realizado logo após serem medidos os limiares de frequência estabelecidos, caso não estes valores não ocorram logo em seguida (isto é, caso não ocorra a detecção de um novo veículo).

4. Resultados

Em termos de *hardware*, testou-se o oscilador na configuração da figura 3, o qual apresentou estabilidade na frequência de oscilação e verificou-se maior variação da frequência (de cerca de 1 kHz) ao se utilizar o laço no formato quadrado, com lado 1,5 m de comprimento, em testes realizados em campo, na presença e na ausência de um veículo de passeio.

Em termos de *firmware*, é preciso ainda testar o algoritmo implementado para verificar o erro devido à restrição de tempo para que o processador do microcontrolador atenda a rotina de cálculo da frequência de oscilação dos laços e do intervalo de tempo de passagem do carro. Além disso, após a implementação do algoritmo, pode-se reduzir o custo associado à escolha do microcontrolador citado, optando por um microcontrolador que atenda aos requisitos mínimos do *firmware*. Após isso, é possível melhorar o sistema desenvolvendo uma interface mais usual para o usuário, que não apenas LEDs sinalizadores.

5. Conclusões

Observou-se a partir deste trabalho algumas vantagens na implementação do *hardware*:

- estabilidade na frequência de operação do circuito da figura 3 apesar do baixo fator de qualidade dos laços indutivos;
- sensibilidade a variação da indutância do laço e modificação da frequência de ressonância;
- possibilidade de implementação de baixo custo.

Observou-se também, no desenvolvimento e teste do *firmware* através de ferramentas de simulação como o Proteus™ (é necessário ainda realizar testes no microcontrolador), as seguintes vantagens na implementação do mesmo utilizando um microcontrolador:

- baixo erro associado ao cálculo da velocidade;
- código simplificado e tamanho reduzido;
- baixo custo.

6. Referências bibliográficas

INMETRO. Portaria nº115 de 29 de junho de 1998.

KI, Yong-Kul; BAIK, Doo-Kwon. *Model for Accurate Speed Measurement Using Double-Loop Detectors*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 4, Julho 2006.

KLEIN, L.A. *Vehicle Detector Technologies for Traffic Management Applications*. Part 1.

KLEIN, L.A.; MILLS, M. K.; GIBSON, D. R. P. *Traffic Detector Handbook*, US Department of Transportation, 2006. Volumes I e II.

NISHIMOTO, Régis Eidi. *Novas Geometrias de Laços Indutivos*. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2006.

SEDRA, Adel; SMITH. *Introdução à Microeletrônica*. Pearson Makron Books. São Paulo, 2000.

Datasheet do PIC 16F877:

<http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>, acessado em Julho de 2009.