

SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE VEÍCULOS POR MEIO DE LAÇOS DE INDUÇÃO: UM PROJETO INTEGRADO DE ENSINO E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

Heloisa Maria Barbosa
Carmela Maria Polito Braga
Fábio Gonçalves Jota
David José Ahouagi Vaz de Magalhães
Ronaldo Guimarães Gouvêa
Danilo Augusto Ferreira Dourado
Jackson Luis Pereira de Carvalho
Julian Cardoso Euletério
Vanessa da Cunha Mendes

Núcleo de Transportes – NUCLETRANS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O desenvolvimento de um Sistema de Identificação de Veículos por Meio de Laços de Indução é apresentado. Detalha-se o projeto dos circuitos eletrônicos dos sensores de Laço de Indução, dos circuitos condicionadores dos sinais analógicos e o do software usado no processamento digital dos sinais provenientes do laço de indução. O sistema de identificação de veículos provê dados para caracterização do tráfego e do veículo, tais como, velocidade, direção do fluxo e caracterização do tipo de veículo (por meio de uma transformação conhecida como FFT). Esta caracterização é feita por meio do espectro de frequência do sinal proveniente do laço indutivo. Resultados experimentais preliminares obtidos com dois laços de indução instalados no campus da UFMG são apresentados.

ABSTRACT

The development of a Vehicle Identification System by means of Inductive Loops is presented. The design of the electronic circuits of the inductive loop as well as of the signal conditioning are detailed. Data that characterize the traffic are supplied, such as, vehicle speed, flow direction, and type of vehicle. The identification of the vehicles is accomplished by means of the well known Fast Fourier Transform (FFT). Experimental results using two (real) inductive loops installed in a street, in the Campus of UFMG, are presented.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema inteligente para detecção, contagem, medição de velocidade e classificação (identificação) de veículos¹.

Numa primeira etapa foi construído, em laboratório, um laço de indução em escala reduzida. Para tanto foi estudada a variação da indutância de uma bobina, quando submetida a diferentes materiais ferromagnéticos, a partir da relação entre a variação da frequência e da indutância. Numa etapa posterior, foram instalados dois Laços de Indução em uma das vias do campus da UFMG, para viabilizar os experimentos deste trabalho. As etapas iniciais de desenvolvimento desse sistema foram descritas por Barbosa et al (2003). A escolha do laço foi feita por tratar-se de uma tecnologia amplamente utilizada, tendo precisão insensível às condições climáticas e, principalmente, pelo baixo custo que apresenta em comparação a outros sistemas de detecção. As desvantagens inerentes a esta tecnologia, como a necessidade de interrupção do tráfego para a instalação e para a manutenção, o enfraquecimento do pavimento, a possibilidade da necessidade de reinstalação no caso de recapeamento da via e a sujeição ao estresse do tráfego e da temperatura, são menos significativas que as contribuições oferecidas no controle eficiente de tráfego a um custo mais baixo.

Enfatizou-se, inicialmente, a concepção do sistema e o projeto do circuito de medição e aquisição do perfil de variação do campo magnético, produzido pelos laços indutivos, quando da passagem de um veículo. Logo após, o trabalho foi focalizado no desenvolvimento do programa para análise e reconhecimento da assinatura única de cada veículo, por meio da análise do espectro de frequência dos sinais obtidos dos laços de indução.

A importância deste sistema, em desenvolvimento, está no fato de tratar-se de uma solução compacta, de baixo custo, envolvendo a aplicação de técnicas modernas de processamento de sinais, como transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT é usada para análise e interpretação dos sinais gerados pelos laços de indução, o que tem proporcionado resultados de engenharia muito interessantes. Isto torna a concepção do sistema factível de ser aplicada em sistemas de transportes reais, com resultados satisfatórios na identificação, contagem e medição de velocidade de veículos.

O hardware do sistema em desenvolvimento será apresentado na segunda seção, enquanto o uso de Transformada Rápida de Fourier para obtenção de assinaturas de veículos, será discutido na terceira. A quarta seção relata a análise dos resultados experimentais de validação do sistema e a última apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

2. O HARDWARE DO IDENTIFICADOR DE VEÍCULOS

O hardware deste sistema é constituído, basicamente, de dois laços de indução propriamente ditos, instalados em uma via do campus da UFMG, e o circuito eletrônico que detecta a variação do campo magnético produzido pelos laços.

O laço, quando energizado, funciona como um indutor, criando um campo magnético ao seu redor. Com a passagem de veículos sobre ele, ocorre uma alteração no campo magnético, devido às correntes de Foucault, que aparecem nas partes metálicas dos veículos. O princípio explorado por este projeto é o de que cada veículo provoca uma alteração particular neste campo magnético, ou seja, cada veículo deixa a sua "assinatura" própria ao passar sobre o laço de corrente. Portanto, basta medir a variação no campo magnético para se saber qual o veículo que está passando sobre o laço.

2.1 O Circuito Oscilador de Colpitts

Com o objetivo de medir as variações produzidas pela passagem de veículos sobre o laço, foi montado um circuito eletrônico capaz de transformar essas variações no campo magnético do laço em tensão elétrica. Neste circuito (um Oscilador de Colpitts), o laço corresponde ao elemento indutivo, sendo a frequência de oscilação determinada pelos elementos capacitivos e indutivos do circuito (RLC). Os elementos capacitivos têm um valor fixo, porém o laço de corrente tem sua indutância variada em função do meio magnético ao seu redor. Assim, a frequência do oscilador irá depender da variação do campo magnético do laço. A frequência de oscilação característica está, geralmente, entre 10KHz e 200KHz. A frequência de oscilação é então convertida em um sinal analógico, conforme detalhado a seguir.

Quando um veículo passa sobre o laço, por ter uma grande massa metálica, provoca uma alteração nas características do circuito RLC, já que a permeabilidade magnética do metal é maior que a do ar, diminuindo o valor da indutância e, conseqüentemente, aumentando o valor da frequência de oscilação. Sendo assim, o detector provê dois tipos de sinais, um de valor

mais elevado (com a indutância padrão) e, portanto, sem veículo sobre o laço, e outro de valor menor quando a indutância sofre redução, revelando a presença de um veículo (ver Figura 1). Para o cálculo da velocidade de um veículo, usam-se dois laços. A velocidade é obtida dividindo-se a distância entre os mesmos pelo tempo transcorrido entre dois picos dos sinais dos laços. Tecnicamente é possível se determinar a velocidade do carro utilizando um único laço; no entanto, isto requer um algoritmo de detecção mais sofisticado, a um custo, muitas vezes, não justificável.

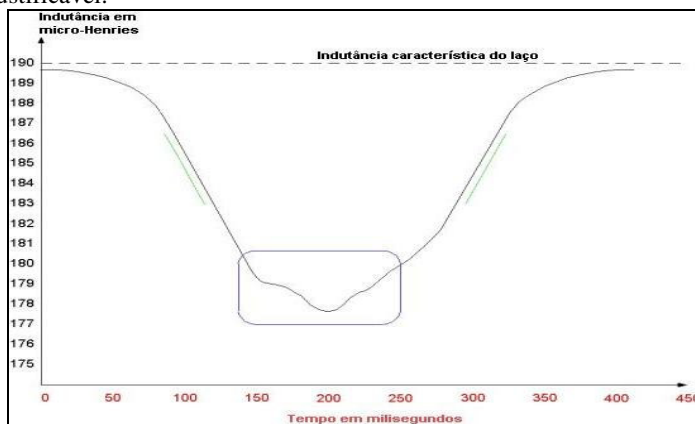


Figura 1: Indutância e assinatura de identificação da classe do veículo

A região selecionada da curva mostrada na Figura 1 é chamada de ‘assinatura’ (por ser característica de cada veículo), e pode, nessa condição, ser usada para distinguir diferentes classes de veículos, ou até mesmo tipos (modelos) particulares de veículos. Foram realizados alguns testes com o circuito operando em condições variadas no sentido de se obterem curvas típicas, tais como, aumento da frequência de oscilação e da tensão de alimentação, atualmente fixados em cerca de 90KHz e uma tensão de 12V.

O circuito deste oscilador, como é encontrado em (Boylestad e Nashelsk, 2004), é apresentado na Figura 2.

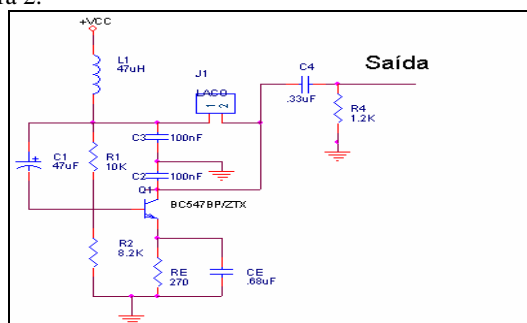


Figura 2: Oscilador de Colpitts

O laço (indutância) é ligado aos terminais 1 e 2 do conector J1 do circuito oscilador (Fig. 2) cuja saída é conectada à entrada de um “detector de fase” especial, conhecido pela sigla PLL (do Inglês, “Phase Locked Loop”).

A frequência de oscilação (como dito, definida pelos valores dos capacitores C1 e C2 e da indutância do laço, L) é dada por:

$$f = 1/(2*\pi*(L*Ceq)^{0.5}) ,$$

onde Ceq é a capacitância equivalente:

$$Ceq = C1*C2/(C1 + C2).$$

A frequência do oscilador na configuração atual (em que C1=C2=100nF) está em torno de 80KHz, quando não há nenhum veículo sobre o laço. A indutância do laço utilizado nos experimentos aqui apresentados foi calculada pelas relações acima, para a qual foi encontrado o valor aproximado de 80uH.

A determinação do melhor valor da frequência de oscilação exigiu um estudo mais aprofundado. Quando esta frequência é muito baixa, a “sensibilidade” do circuito à variações de indutância ocorridas no laço (pela passagem dos veículos) é muito pequena, o que ocasiona a perda de muitos detalhes da curva característica dos mesmos. Ensaios feitos com laços de corrente como os utilizados neste projeto mostraram que a faixa ideal de frequências está entre 40 KHz e 200 KHz.

Garantida uma boa estabilidade do oscilador (com e sem presença de veículos), passou-se a tratar do problema de detecção da variação da frequência em função da passagem de um veículo sobre o laço com a maior precisão e repetibilidade possível. Após considerar algumas alternativas, optou-se pelo uso de um “detector de fase” integrado, PLL em circuito integrado, cujos detalhes são apresentados a seguir.

2.2 O Circuito PLL - *Phase Locked Loop*

O sinal senoidal gerado pelo oscilador Colpitts sofre variações quando da passagem de veículos sobre o laço indutivo (conforme já visto). Essas variações na frequência do oscilador provocam como consequência variações na fase do sinal senoidal, variações estas que podem ser medidas, com precisão e alta sensibilidade, por um “detector de fase” tipo PLL. No projeto, foi usado um circuito integrado (o NE565) para desempenhar a função do “Phase Locked Loop” (o PLL). Este possui um oscilador interno que entra em fase com a frequência do sinal de entrada, ou seja, entra em fase com o sinal senoidal proveniente do oscilador. O NE565 possui três sinais de saída: um com forma de onda triangular, um com forma de onda quadrada (ambos na mesma frequência, e iguais à do sinal de entrada) e uma tensão contínua cujo valor depende da frequência do sinal de entrada.

Detalhes das interconexões para integração do PLL à saída do Oscilador de Colpitts são mostrados na Figura 3.

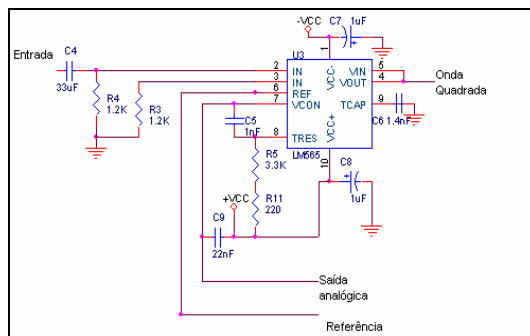


Figura 3: Diagrama de conexões do PLL ao oscilador Colpitts

O capacitor C4 e a resistência R4 (Fig. 3) formam um filtro passa-altas para o sinal proveniente do oscilador, eliminando assim seu valor DC, deixando passar apenas a oscilação em torno da referência de tensão. O valor da resistência R3 deve ser igual ao de R4, para que o PLL receba corretamente a referência de tensão a ser utilizada. O capacitor C9 tem a função de filtrar o sinal da saída analógica, conforme será detalhado mais adiante. Os pinos 4 e 5 do NE565 são interligados entre si para fornecer o sinal de saída em forma de onda quadrada. O sinal com forma de onda triangular é observado no pino 9, antes do capacitor C6. Os valores das resistências R5 e R11 e do capacitor C6 determinam a frequência central de oscilação.

Nos cálculos dos valores das resistências e capacitores do PLL, dois aspectos (cruciais) devem merecer consideração especial: a frequência de corte do filtro e a frequência central de oscilação. Maiores detalhes são apresentados abaixo.

Um terceiro ponto a ser considerado (na escolha dos parâmetros do PLL) é a faixa de frequências (em torno da frequência central) em que o PLL consegue se manter em fase com o sinal de entrada, a chamada frequência de captura (f_c). Caso este valor seja menor do que a faixa de variação possível da frequência do oscilador, novo ajuste dos parâmetros deve ser feito.

A frequência central do PLL corresponde à frequência que faz com que a tensão na saída analógica (do PLL) seja igual à referência (zero volts). O ajuste deste parâmetro é de fundamental importância, já que é ele que define o valor da tensão na saída, em função da frequência da entrada (que no caso é a frequência do oscilador Colpitts do qual, como visto, o laço faz parte).

O sinal de interesse do PLL é a saída analógica que, depois de convertida para a forma digital, é utilizada para transmitir a informação de variação da frequência do oscilador a um computador, por meio de comunicação via porta serial ou USB. O sinal de tensão da saída do PLL é processado em um PIC (Programmable Integrated Circuit), onde a citada conversão do sinal analógico para digital é efetivamente realizada. O PIC é também o responsável por transmitir o sinal digital para o computador através da porta serial.

Como foram instalados dois laços em uma via do Campus/UFG, foi necessário se construir um circuito oscilador e um PLL para cada laço. As saídas dos dois PLL's são conectadas a um único PIC (que tem capacidade para realizar conversão analógica/digital de até 4 sinais

analógicos). Toda a comunicação entre o PIC e o computador (onde os dados são efetivamente armazenados para processamento posterior) é controlada pelo computador. O processo de leitura tem início quando o programa aplicativo (residente no computador) envia ao PIC uma requisição de leitura de um dos laços. O PIC, por sua vez, retorna ao computador os dados referentes àquele laço. Normalmente, o computador alterna o laço a ser monitorado, de forma que ele obtenha dados dos dois laços em intervalos, aproximadamente, constantes e iguais.

A parte computacional do projeto foi implementada em duas etapas. Na primeira foi desenvolvido um programa aplicativo, cuja função se resume a adquirir os dados provenientes dos dois laços e, na segunda, um outro aplicativo que analisa os dados adquiridos e armazenados pelo primeiro, extraindo dos mesmos as informações desejadas.

O programa de aquisição dos dados é responsável por gravar as informações vindas do laço (via PIC), juntamente com a hora de entrada do veículo no mesmo. Este programa gera quatro arquivos distintos, dois deles contêm as assinaturas dos veículos sobre cada um dos laços e os outros dois arquivos contêm a hora de entrada de cada um dos veículos (registrados nos arquivos anteriores) em cada laço. Este último programa aplicativo deve ser capaz de, a partir dos dados armazenados nos arquivos, reconhecer o tipo de veículo, de acordo com a sua assinatura, sua velocidade, o número de veículos passando dentro de um intervalo qualquer de tempo, o tempo entre a passagem de dois veículos e outras informações adicionais (que podem ser extraídas dos dados).

2.3 Comunicação via porta serial: O Circuito Integrado Programável (PIC)

A opção pela utilização de um Circuito Integrado Programável (PIC) se deveu ao fato de este conferir ao sistema maior flexibilidade, já que é possível transmitir os dados via porta serial ou USB, que estão comumente disponíveis em qualquer computador (não sendo assim necessária inserção de nenhuma placa no computador). Outro fator de incentivo ao uso do PIC, foi a existência de um projeto que se desenvolvia paralelamente a este, e que já o utilizava para uma finalidade muito próxima, de tal forma que muito tempo de pesquisa seria poupado (Rapp, Ubirajara e Silva e Jota, 2002).

Para estabelecer a comunicação serial entre o PIC e o computador responsável pelo armazenamento dos dados, foi estabelecido um protocolo de comunicação de forma a fornecer uma certa segurança e controle sobre os dados obtidos. Este protocolo se baseia no princípio de que o PIC receberá uma solicitação de leitura do sinal proveniente de um dos laços, fará a conversão Analógica/Digital (A/D) deste sinal, e, em seguida, o transmitirá para o computador que fez a solicitação, o qual verifica se os dados recebidos foram os requisitados, descarta-os se necessário e, independentemente da presença de erro, envia nova solicitação, ao PIC, de leitura do laço.

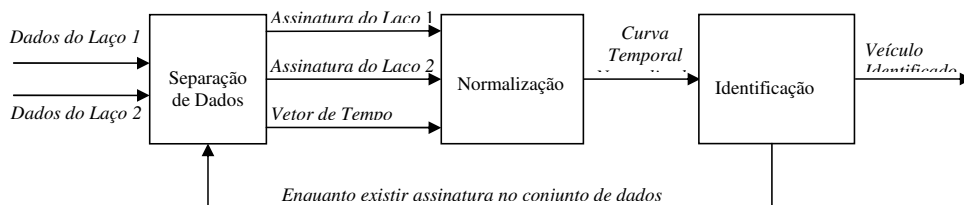


Figura 4: Diagrama de blocos do algoritmo de identificação de veículos

O algoritmo utilizado para controle e processamento dos sinais (Fig. 4) recebe um conjunto de dados provenientes dos dois laços de indução, faz a separação de cada assinatura e dos dados referentes ao instante de passagem do veículo pelo laço. Em seguida faz a normalização e finalmente a identificação. O algoritmo executa esse procedimento sequencialmente, em *loop*, enquanto existirem assinaturas no conjunto de dados, conforme mostrado na Figura 4.

Por razões de ordem prática, a taxa de transmissão serial de dados máxima foi limitada a 19200 bits por segundo (bps). Foi constatado que, para identificação adequada de veículos em alta velocidade, é importante que sejam feitas, no mínimo, entre 10 e 20 medições diferentes, de forma a garantir que o sensor (o laço indutivo) receba corretamente as variações de campo em função da disposição da estrutura metálica do veículo, e, assim, possa classificá-lo quanto ao tipo. Para se conseguirem estas informações, é necessário que a frequência amostragem seja de cerca de 200Hz (o que permite que um veículo com velocidade próxima de 160 km/h seja identificável). A taxa de transmissão de 19200bps fornece uma frequência de cerca de 300Hz, que é, portanto, suficiente para esta aplicação.

Para cada solicitação de leitura tem-se 1 (um) byte enviado pelo computador indicando de qual laço deve-se coletar os dados, e outros 2 (dois) bytes de resposta contendo os dados e alguns bits de verificação, totalizando 3 (três) bytes para cada requisição / resposta.

3. USO DE TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER PARA RECONHECIMENTO DE VEÍCULOS

O grande diferencial deste projeto é a possibilidade da utilização do laço para identificação do tipo de veículo. Para isto é necessário fazer a análise dos dados coletados de cada laço. Atualmente, o método de análise utilizado é a Transformada Rápida de Fourier (FFT) das curvas provenientes dos laços, que contêm as informações dos veículos. A vantagem deste método é que ele permite a transformação de sinais complexos em apenas poucos termos, simplificando a tarefa de comparação de dados. Outro ponto importante é que as curvas precisam ser apenas parecidas para gerar transformadas idênticas, o que é uma grande vantagem, porque as assinaturas dos veículos nunca são exatamente iguais umas das outras, mesmo para veículos idênticos. Os principais fatores que influenciam nesta diferença entre as assinaturas de veículos semelhantes são: a temperatura ambiente, que desloca os valores das curvas, o nível de ruído, que depende das condições da energia elétrica fornecida pela rede, e a velocidade do veículo ao passar sobre o laço, pois quanto maior a velocidade, menor a

quantidade de medições armazenadas. Por experiência anterior (Jota e Jota, 1998), chegou-se à conclusão de que apenas os vinte primeiros termos da série de Fourier são necessários para representar um sinal, que pode ter mais de dois mil pontos. A curva original é perfeitamente reconstruída a partir destes vinte primeiros termos. Várias medições foram realizadas no laço indutivo instalado no Campus da UFMG, com veículos de diversos tipos e fabricantes. Resultados típicos são apresentados a seguir.

As figuras 5a.b. e 6a.b. mostram as assinaturas e as transformadas de Fourier para dois veículos diferentes. Um aspecto que se destaca nestas curvas é que existe uma diferença significativa na amplitude da transformada entre os dois sinais. Nos exemplos mostrados, o sinal do carro possui uma maior amplitude nas baixas frequências, enquanto que o sinal do caminhão, por exemplo, possui amplitude relevante apenas em algumas frequências (específicas). Esta diferença entre as amplitudes dos sinais nestas frequências específicas é que caracterizam a assinatura única de cada veículo e, portanto, deve ser utilizada para determinar qual o tipo de veículo.

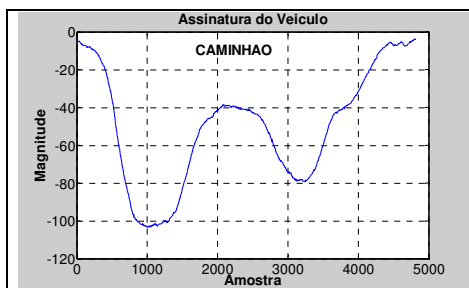


Figura 5.a: Magnitude do Campo Magnético sobre o laço de indução durante a passagem de um caminhão

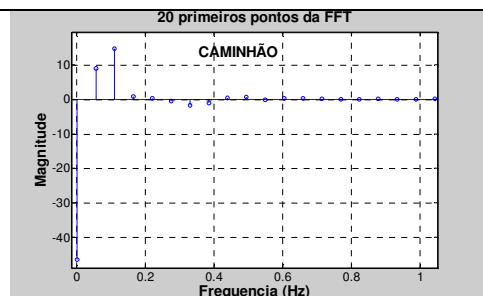


Figura 5.b: Transformada Rápida de Fourier do sinal da Figura 5.a, mostrando as frequências do sinal – assinatura

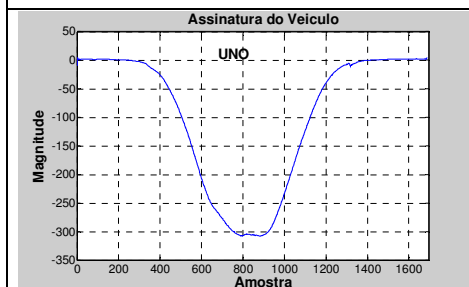


Figura 6.a: Magnitude do Campo Magnético sobre o laço de indução durante a passagem de um Uno Mille

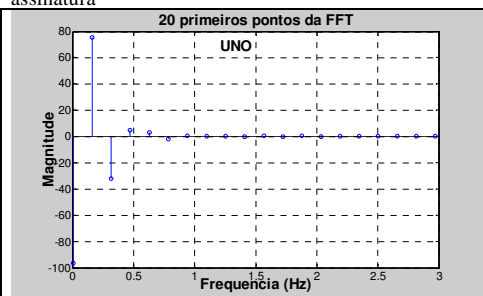


Figura 6.b: Transformada Rápida de Fourier do sinal da Figura 6.a, mostrando as frequências do sinal – assinatura

A transformada de Fourier demonstrou se uma excelente ferramenta para extração da assinatura (em frequência) do sinal apresentado por cada tipo de veículo, sendo capaz de representá-la com apenas 20 componentes (no máximo). Este conjunto de frequências na sequência determinada pela FFT consiste na assinatura única de cada veículo e permite ser

comparado com outros sinais característicos de cada veículo para proceder a identificação do tipo.

Esta ferramenta já foi utilizada em outros trabalhos com finalidade semelhante e os resultados obtidos foram seguros e satisfatórios (Jota e Jota, 1998). Uma série de experimentos com vários tipos de veículos está sendo programada para promover uma validação ampla desta ferramenta para a proposição de identificação de veículos.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dizer que os resultados obtidos no sistema de identificação de veículos aqui proposto são animadores, uma vez que os circuitos eletrônicos projetados e construídos já mostram-se adequados para suas proposições de detecção da variação do campo magnético sobre o laço de indução quando da passagem de veículos. O mesmo pode-se dizer a respeito do sistema de aquisição e processamento destes sinais, e os programas para aquisição dos sinais transmitidos via porta serial a um computador pessoal (PC). O uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificação do tipo de veículo demonstrou ser eficaz para os fins aqui propostos.

Atualmente, os circuitos eletrônicos ainda encontram-se montados em “*protoboard*” (montagem experimental e provisória), mas as placas de circuitos impresso, para montagem em versão final, já estão sendo construídas.

Novos experimentos para validação de vários outros tipos de veículo serão realizados assim que os circuitos eletrônicos estiverem montados nas placas, viabilizando uma análise mais ampla da solução adotada. Mas com os resultados já disponíveis e baseado em resultados de outros trabalhos utilizando FFT (Jota e Jota, 1998), pode-se dizer que a concepção do projeto do sistema de identificação de veículos é bem sucedida e indica que o sistema poderia ser projetado e montado para desempenhar esta função em laços de indução quaisquer, instalados em vias públicas.

Finalmente, mas não menos importante, este trabalho (que se encontra na divisa entre duas áreas do conhecimento) vem despertando grande interesse nos alunos dos cursos de Engenharia Civil e Engenharia de Controle e Automação por uma área de caráter multidisciplinar, que dificilmente seria explorada em um só curso ou departamento da UFMG. Além disso, a expectativa dos autores é que desenvolvimentos como este possam contribuir para fortalecer uma área de conhecimento que carece de formação sólida no país, e que, ao mesmo tempo, demanda resultados de baixo custo e eficientes.

Agradecimentos

Ao Prof. Márcio Fantini Miranda e a Augusto César Silva Brighenti pela participação na equipe de desenvolvimento da primeira fase do projeto do Laço de Indução. Ao Prof. Anísio Rogério Braga, do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica - CEFET-MG, pela sugestão de uso do PLL e pelas valiosas discussões a respeito dos circuitos eletrônicos utilizados neste trabalho.

A PROGRAD – Pró-reitoria de Graduação da UFMG por acreditar no projeto e conceder bolsas aos alunos de graduação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, H.M. et al (2003) Sistemas de Controle e Automação para a Engenharia de Transportes – Um Projeto integrado de ensino e desenvolvimento tecnológico. *Anais eletrônicos do XVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, ANPET, Rio de Janeiro.
- BOYLESTAD, R.L. e NASHELSKY, L. (2004) *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 8ª Ed., Pearson Education.
- JOTA, F. G., JOTA, P. R. S. (1998) High-Impedance Fault Identification using a Fuzzy Reasoning System. *IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution*, v. 145, n. 6, p. 656-662.
- RAPP, T., UBIRAJARA E SILVA, G.P. G., JOTA, F.G. (2002) Remote Load Control Via Powerline and Embedded Web Server. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*. Natal, RN: UFRN, pág. 2096-2102.
-

Endereço dos autores: Coordenador do PAD
Avenida do Contorno 842, sala 607
30-110-060- Belo Horizonte - MG
e-mail: helobarb@etg.ufmg.br

PARTE III

Planejamento de Transportes

Capítulo 9

Transporte urbano

