

USO DE SENSORES ULTRA-SÔNICOS NA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS EM ROBÓTICA E OUTRAS APLICAÇÕES

Teodiano F. Bastos

José Miguel M. Abreu

Ramón Ceres

Instituto de Automática Industrial
Desvio Km 22,800 N-III
La Poveda (Arganda del Rey)
28500 - Madrid, ESPAÑA

Resumo - Entre as pesquisas realizadas no Instituto de Automática Industrial (IAI) sobre sensores para robôs, a mais recente descreve o uso de técnicas digitais e informáticas, na reconstrução de sinais, aplicados a um sensor experimental ultra-sônico utilizado na obtenção de parâmetros para localização e discriminação de objetos. Destaca-se seu uso num sistema alternativo para medir distâncias e num método para compensar as alterações na medida provocadas pela variação da velocidade do som devido a mudanças de temperatura, isto sem necessidade de se utilizar um sensor externo de temperatura. Este sistema permite alcançar precisões muito superiores aos sistemas convencionalmente usados, com um amplo campo de aplicação desde a robótica até a metrologia industrial.

Abstract - This paper presents some aspects of the research activities on sensors for robots, developed in the Instituto de Automática Industrial (IAI) during the last years, specially the digital and computer techniques used in the signal reconstruction of an experimental ultrasonic range sensor and applied for objects location and discrimination. Their use is mainly as an alternative system to measure distance. Based on the same techniques, a method has been developed to compensate the alterations in the measurement introduced by the sound speed variations due to temperature changes. This method is reached without the use of a temperature external sensor. This system leads to a more accurate measurement system than the conventional ones and it can be applied in many fields as robotic and industrial metrology.

1. INTRODUÇÃO

As utilidades dos sistemas ultra-sônicos aliados a seu baixo custo indicam o seu emprego em muitas aplicações. Os dispositivos baseados no método de pulso-eco, por transdutores elétricos, foram utilizados amplamente na medição de distâncias sendo historicamente sua aplicação mais habitual.

Na técnica de pulso-eco, os métodos de medida de distância baseiam-se na determinação do tempo de trânsito que gasta uma onda ultra-sônica em percorrer o trajeto de ida e volta. Trata-se então de medir, com a maior precisão possível, o intervalo de tempo

transcorrido entre o momento da emissão da onda ultra-sônica e o instante de detecção do eco refletido. Por outro lado, para converter o tempo em distância é necessário conhecer a velocidade de propagação das ondas no meio circundante. Mas esta velocidade depende da temperatura ambiente, devendo ser feita uma correção na medida, pois este efeito é o responsável pela maior fonte de erro na medição de distâncias.

Na Figura 1 vê-se um eco típico, tal como se observa em um transdutor piezoelétrico usado como receptor. Este eco apresenta grandes variações em amplitude, que depende da distância, do tamanho, da forma ou da natureza do objeto refletor. Mesmo variando em amplitude, para um mesmo sinal de emissão, sua forma é praticamente independente da superfície refletora, exceto naquelas superfícies que podem causar fenômenos de interferência, como é o caso de refletores apresentando mais de uma superfície de reflexão. Considerando estes fatos, obteve-se um modelo para a forma do eco que serve para comparar com as medidas efetuadas, permitindo obter a medida do tempo de trânsito por contraste entre a medida e o modelo.

Um método convencional para determinar o instante de chegada do eco consiste em estabelecer um valor de referência e considerar que se produz a recepção quando a amplitude do eco supera tal valor. Este valor é convenientemente escolhido acima do nível de ruído existente no sinal. A Figura 2 mostra sinais de ecos retificados, de diferentes amplitudes, e com um mesmo valor de referência na detecção. Conseqüentemente, comete-se um erro considerável na obtenção do instante de chegada, pois alguns ecos são determinados praticamente no seu início, enquanto outros tardam vários períodos até que alcancem o valor de referência para a detecção.

Para contornar este problema, alguns autores (Jaffe 1985; Martin, 1987) desenvolveram sistemas sensoriais onde o valor de referência para detecção varia de forma dinâmica em função do tempo transcorrido desde o momento da emissão, permitindo compensar parcialmente a variação da amplitude do eco com a distância. Embora esse método seja melhor que o de nível fixo, apresenta vários inconvenientes: a amplitude do sinal de eco varia não somente com a distância, mas também com a natureza do refletor, sua orientação, etc. Assim, este método só resolve o problema parcialmente quando os refletores são quase iguais, pois havendo refletores

de diferentes tamanhos, o sistema detectará objetos pequenos como estando mais longe que os grandes, devido à indeterminação introduzida.

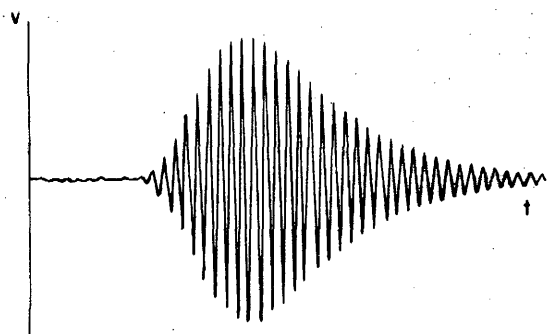


Figura 1. Sinal típico produzido por um eco.

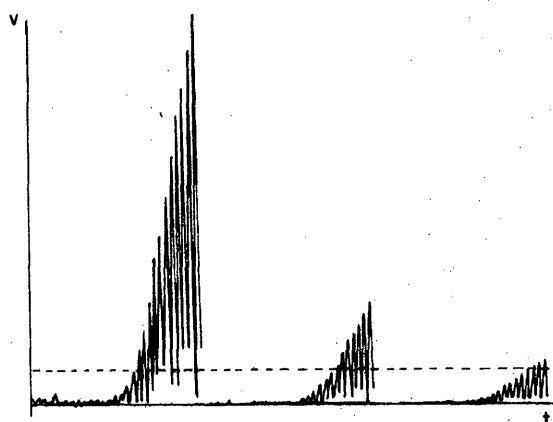


Figura 2. Princípios de três ecos retificados comparados com uma mesma referência.

O processo completo de geração de um eco, desde quando se aplica o sinal elétrico ao emissor, até o receptor gerar outro sinal elétrico, como consequência da onda refletida, é demasiado complexo para formulá-lo exatamente e poder utilizar essa formulação para cálculos em tempo real. Por outro lado, um modelo puramente empírico pode ser inconsistente e totalmente falso ao variar alguma das circunstâncias da medida. Por estas razões obteve-se um modelo baseado na realidade física, sem pretender descrevê-la exatamente.

No método aqui proposto, o sinal de eco completo é digitalizado, sendo ajustado a um modelo previamente definido e deste processo obtém-se o instante inicial de medição. Apresenta-se também um método de correção da velocidade de propagação das ondas, como consequência das variações de temperatura no meio interposto de propagação. Este método está baseado na variação da frequência de ressonância dos elementos piezoelétricos com a temperatura.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDAS

Com vista a um estudo detalhado das ondas ultra-sônicas refletidas por diferentes objetos em distintas circunstâncias, desenvolveu-se o sistema detalhado na Figura 3. Um pulso gerado periodicamente é amplificado a 45 V e aplicado ao elemento transdutor,

que atua como transmissor/receptor. O transdutor é uma cerâmica piezoelétrica ressonante a aproximadamente 220 KHz (Modelo E-188/220 of Massa Products Corporation). O eco procedente do transdutor é restaurado por um amplificador ($G=600$) acoplado ao sistema, que também serve para eliminar parte do ruído existente. O sinal é enviado a um osciloscópio digital com capacidade de conversão de até 25 MHz; o mesmo pulso utilizado para excitar o transdutor é passado ao osciloscópio como sinal de gatilho, o que permite visualizar e digitalizar adequada e simultaneamente o sinal de eco.

Este sistema permite obter 512 medidas com uma resolução de 8 bits. O sinal digitalizado é transmitido ao computador por um canal de comunicação IEEE488; no computador é onde se efetua a análise "off-line" do sinal recebido. Atualmente desenvolve-se no IAI um sistema específico, processando-se os dados em tempo real.

Com este sistema de aquisição tem-se um período de amostragem de $0.391 \mu s$; o que nos resulta numa faixa total de 0.2 ms e uma média de aproximadamente 11 medidas por comprimento de onda, sendo considerado suficiente para a reconstrução do sinal original.

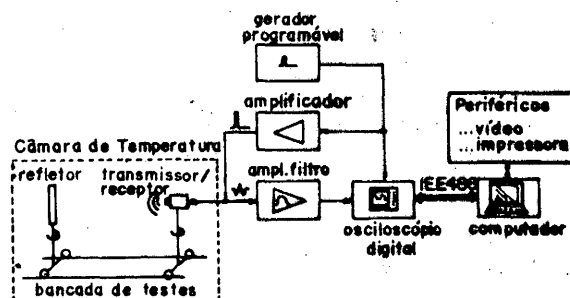


Figura 3. Sistema de análise e medidas.

Para o posicionamento de transdutores e refletores usou-se uma bancada do tipo freqüentemente utilizada em óptica, com possibilidade precisa de rotação e translação (em duas direções) tanto para o sensor como para o refletor.

3. MODELO UTILIZADO

A seguir apresenta-se uma breve descrição do processo físico: Um pulso elétrico é aplicado ao transmissor piezoelétrico, provocando sua vibração mecânica. Depois que o pulso desaparece, devido a sua própria inércia o transdutor permanece vibrando com amplitude decrescente. Este movimento do transdutor é transmitido ao ar produzindo uma onda sônica. Esta onda se propaga através do ar até encontrar um obstáculo, quando então é parcialmente refletida. A onda refletida alcança o receptor que, como consequência da pressão da onda, produz uma vibração mecânica convertida em sinal elétrico dentro do transdutor. Se a distância entre sensor e refletor é adequada, a vibração do transdutor estará praticamente atenuada quando chega a onda refletida, e o fenômeno é tal que permite usar o mesmo transdutor para emissão e para recepção.

O comportamento de uma cerâmica piezoelétrica vibrando em modo espessura, em torno de sua frequência de ressonância, pode ser descrito pelos circuitos equivalentes representados na Figura 4 (Philips, 1974). Considerando o processo completo de emissão-recepção quando excita-se com um pulso muito estreito (função δ), pode-se escrever as equações diferenciais correspondentes e resolvê-

las usando a transformada de Laplace. Considerando que a frequência de emissão é praticamente igual à frequência de recepção, uma solução pode ser apresentada como:

$$V = (C_1.t^n + C_2) \cdot e^{-a.t} \cdot \sin(2\pi ft + \theta) + C_3.e^{-b.t} \quad (1)$$

Nesta expressão, o segundo termo (C3) dá uma componente exponencial que varia muito lentamente comparada com a frequência de ressonância e, embora seja fácil detectá-la durante a medição, no caso ela é filtrada pelo circuito de recepção. Por outro lado pode-se facilmente constatar que a amplitude no início do eco ($t=0$) é zero, e isto só é possível se C2 também é zero. Aplicando estas considerações a (1), vê-se que um modelo matemático aceitável para a descrição do eco pode ser representado por:

$$V = C.t^n \cdot e^{-a.t} \cdot \sin(2\pi ft + \theta) \quad (2)$$

Experimentalmente encontrou-se $n=3$, o que para o transdutor utilizado deu bons resultados.

Nesta fórmula considerou-se $t=0$ como o momento do início do eco, mas o momento da recepção do eco é normalmente desconhecido; o que se pode conhecer bem é o momento de emissão. Usando t_0 para definir o momento de início do eco, e aplicando-o em (2) chega-se ao seguinte modelo mais exato:

$$V = C \cdot (t - t_0)^n \cdot e^{-a \cdot (t - t_0)} \cdot \sin[2\pi f(t - t_0) + \theta] \quad (3)$$

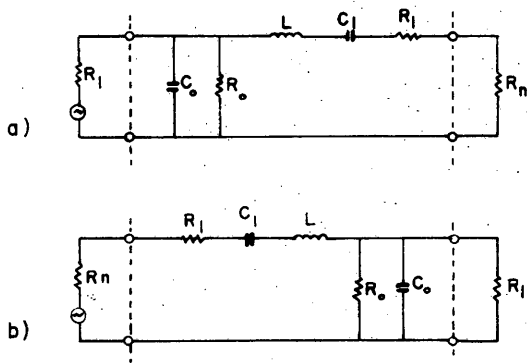


Figura 4. Circuitos equivalentes de um transdutor piezoelétrico funcionando como: a) transmissor; b) receptor.

Neste modelo não se leva em conta a forma do refletor. As medidas experimentais demonstram que o modelo ajusta-se bem às superfícies planas ou curvas de diferentes tamanhos (Figura 5). Mesmo quando se usa somente uma pequena parte do eco para o ajuste do modelo e se extrapola o resultado para todos os pontos, as diferenças obtidas são mínimas. Entretanto, produzem-se diferenças notáveis quando o refletor tem mais de uma superfície de reflexão, que podem produzir fenômenos de interferência entre os ecos (como a superfície mostrada na Figura 6). Refletores que causam estas deformações devem satisfazer três condições: a primeira superfície (a mais próxima ao sensor) deve ser muito pequena, a profundidade do degrau deve ser pequena e a segunda superfície deve ser grande. Para efeitos analíticos, pode-se considerar estes ecos como sendo compostos de vários sub-ecos, cada um deles comprometido com o modelo descritivo. Na Figura 7 se vê um eco composto produzido por um objeto com degrau e o modelo aplicado ao caso. Para minimizar a influência destes efeitos na medida de distância foi usada somente a primeira parte do eco (zona ascendente). Para que se produza deformações notórias nesta zona deve-se chegar a um extremo nas condições antes citadas, isto é, que a

primeira superfície seja tão pequena que seria praticamente indetectável.

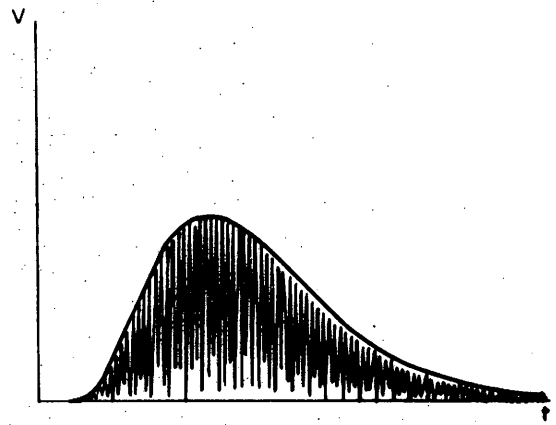


Figura 5. Um eco retificado e o modelo ajustado.

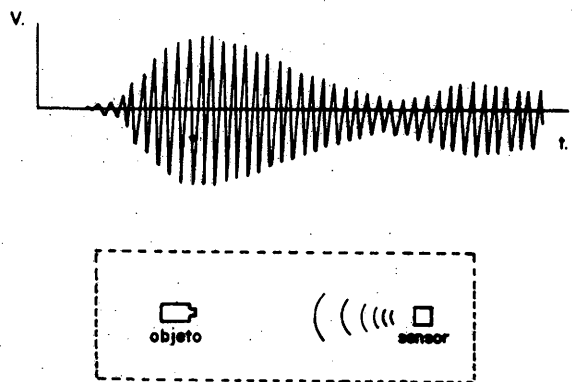


Figura 6. Eco refletido por um refletor apresentando um degrau.

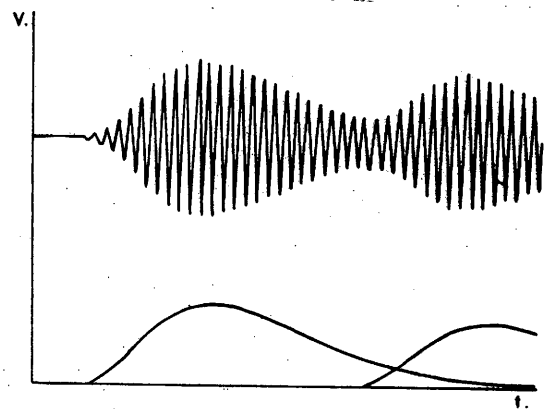


Figura 7. Eco produzido por um objeto com degrau e as curvas extraídas da medida indicando cada uma das superfícies.

O modelo inclui duas constantes "a" e "C". A primeira, "a", sob as condições expostas acima, é praticamente independente do refletor ou da distância, dependendo somente do transdutor. Esta é uma conclusão lógica, considerando o processo de dedução do modelo que é confirmado pelas medidas. A segunda constante "C" dá a medida da amplitude de cada eco. O instante de máxima amplitude do eco se produz quando $t_{max} = t_0 + 3/a$. Em um artigo posterior será apresentada a aplicação do modelo exposto para a identificação de algumas características dos objetos refletores pela análise da

amplitude do eco ultra-sônico. Como exemplo, mostra-se na Figura 8 a variação da amplitude com a distância para três esferas de diferentes raios. Nesta figura as linhas representam a fórmula geral para superfícies esféricas ajustada aos pontos medidos. As fórmulas utilizadas foram previamente deduzidas para o caso.

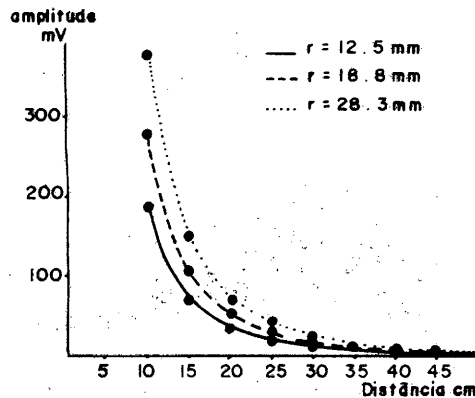


Figura 8. Variação da amplitude com a distância para ecos refletidos por esferas de raio r .

4. APLICAÇÃO DO MODELO NA MEDIDA DE DISTÂNCIA

Para a medida de distância o que interessa é determinar o instante em que se inicia o eco. Com as 512 amostras obtidas pode-se digitalizar o eco completo (Figura 9). Em seguida o sinal é retificado e a envolvente em cada ponto é extraída. Esta envolvente é a que foi usada para realizar o ajuste. De todos os pontos, somente foram usados os compreendidos entre $V=0.1 V_{max}$ e $V=0.9 V_{max}$, sendo V_{max} o máximo valor alcançado pela envolvente. Os primeiros pontos não foram usados porque são relativamente mais influenciados pelo ruído, entretanto podem ser usados mais tarde, num sistema real, como sinal para gatilhar o sistema digitalizador. Os pontos posteriores ao instante $V=0.9 V_{max}$ não são usados a fim de evitar as discordâncias entre modelo e realidade, nos casos das interferências descritas acima. No total usou-se somente umas 90 amostras. Estas amostras foram ajustadas ao modelo descrito em (3) usando um método de mínimos quadrados. "C" pode ser calculada analiticamente quanto t_0 é conhecido e t_0 se calcula de forma iterativa. Como valor inicial para t_0 foi usado $t_0 = t_{max} - 3/a$. Pensa-se que o volume de cálculos é suficientemente reduzido, podendo ser implementado em um sistema trabalhando em tempo real, sem a necessidade de uma eletrônica muito complexa.

Para obter uma maior precisão em algumas medidas no cálculo de distância, foi feita a montagem do refletor sobre um micrômetro. Estimou-se que a precisão obtida é de 0.3 mm para posicionamentos absolutos e de 0.005 mm para os deslocamentos incrementais com o micrômetro.

Em algumas medidas a bancada de provas foi coberta com uma urna plástica transparente, com vista a reduzir as correntes de ar ao redor do sistema, devidas a gradientes de temperatura ou a movimentos no entorno do sensor.

Para o cálculo da distância, as primeiras medidas efetuadas indicavam um desvio padrão muito maior do que o esperado. Após uma análise destas diferenças concluiu-se que elas eram produzidas pelos movimentos de ar no recinto onde era realizada a medição. Para poder estimar a precisão real do sistema de medida, o conjunto sensor-refletor foi colocado no interior da urna de isolamento plástica, reduzindo-se consideravelmente as variações detectadas.

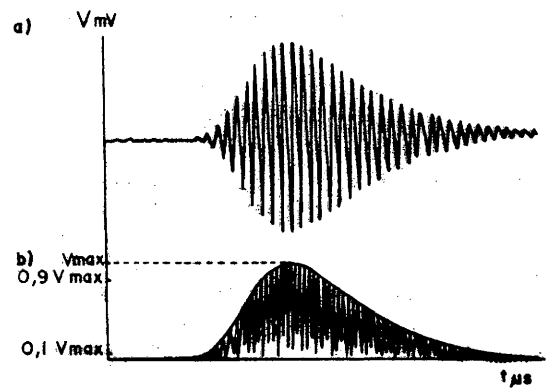


Figura 9. Sinais digitalizados do eco. (a) eco. (b) retificação e envolvente.

A Figura 10 mostra uma série de medidas incrementais realizadas com o mesmo refletor a diferentes distâncias. A linha reta indica o que seria a medida exata. O desvio padrão é de 0.013 mm, o que supera as previsões iniciais. As mesmas medidas realizadas sem a urna protetora mostram um desvio padrão de 0.11 mm, que também é melhor do que a maioria dos sistemas existentes. As medidas realizadas com objetos diferentes dão uma precisão de 0.3 mm, estando dentro da margem de erro causado pelo sistema usado para posicionar os objetos.

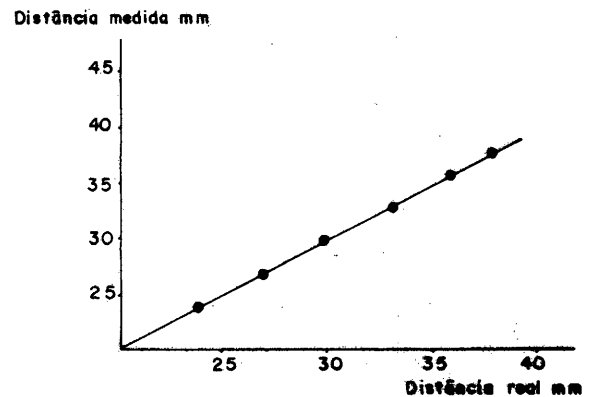


Figura 10. Medidas usando um micrômetro.

5. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E SUA CORREÇÃO

Os transdutores utilizados tanto para gerar como para detectar a onda ultra-sônica são geralmente piezoelétricos, possuindo uma frequência de ressonância bastante definida. Esta frequência de ressonância depende das propriedades mecânicas do transdutor, especialmente da velocidade do som no material (e portanto da sua natureza e compressibilidade) (Krautkrämer, 1983), embora também existam influência de outros fatores como o suporte ou os materiais acopladores utilizados. Ao variar a temperatura, as propriedades mecânicas do transdutor também variam e conseqüentemente sua frequência de ressonância (Philips, 1974).

No sistema descrito a seguir, o cálculo da correção se baseia na medida do deslocamento da frequência de ressonância do transdutor ultra-sônico devido à mudança de temperatura. Para poder avaliar a influência da temperatura na medida colocou-se o transdutor em uma câmara climática de temperatura onde pode-se regular a temperatura desejada. No caso experimentou-se ciclos térmicos

sucessivos de 0 a 35 graus celsius, faixa que pode ser considerada suficiente para operação com este tipo de sensores.

No método de correção empregado, o importante não é conhecer o valor exato da temperatura, pois o que realmente interessa é a variação da velocidade de propagação com relação à frequência da onda.

Para determinar a velocidade do som colocou-se um refletor a uma distância fixa (50 cm) e mediu-se o tempo de trânsito usando o algoritmo de cálculo descrito anteriormente. Usando uma média de 3 medidas, resultou num erro estimado em $0.1 \mu s$, que se traduz num erro de 0.015% na velocidade do som.

Para a medida da frequência foi usada a mesma amostra digitalizada do eco, isto é, a usada para a medida do tempo de trânsito. Primeiro separou-se envolvente e portadora, encontrando-se o valor da frequência da portadora. Somente foi usada a primeira parte do eco, já que nesta zona as variações da frequência, como consequência da natureza do refletor, são mínimas.

Embora este seja um sistema experimental, que não obtém os resultados em tempo real, este problema foi solucionado por outros autores digitalizando a onda ultra-sônica em sistemas específicos operando em tempo real (Durand, 1984; Regtien, 1988).

Até o momento, foram consideradas as medidas sobre objetos estáticos ou quase-estáticos. No caso de se trabalhar com objetos móveis, a frequência é afetada pelo efeito Doppler. A mudança de frequência devido a esse fenômeno é dada pela expressão:

$$Df = 2 \cdot f \cdot v/u$$

Sendo "f" a frequência original, "u" a velocidade do som no ar e "v" a velocidade relativa entre sensor e objeto (Molina, 1988). A compensação necessária para evitar este erro pode ser feita de várias formas: conhecendo a velocidade do objeto a priori ou medindo-a por diferentes técnicas, inclusive diretamente usando o mesmo sensor. De qualquer forma, a influência do efeito Doppler tem menor peso na medida que o devido à temperatura: no caso de $v=1m/s$ (velocidade relativamente alta em robótica) resulta numa variação de 1227 Hz, e uma variação de 0 a 35 graus celsius resulta numa diferença de 10-KHz na frequência de ressonância.

Nas provas estáticas usadas, considerando 3 medidas em cada ponto de temperatura, o erro estimado na medida da frequência é 0.01%. Conhecendo a relação entre a velocidade do som e a frequência de ressonância, o erro cometido na medição de uma distância de 50 cm é inferior a 0.15 mm.

A Figura 11 mostra as medidas da velocidade de propagação com relação às frequências de ressonância. Foi variada a temperatura de 0 a 35 graus celsius em intervalos de 5 graus. Entre os pontos medidos traçou-se uma curva suave de acordo com a fórmula empírica:

$$v = c \cdot e^{af} + b$$

onde "a", "b" e "c" são constantes empíricas.

Imagina-se que para um sistema operando em tempo real seria mais conveniente tabular os resultados e realizar a correção com base nesta tabela. O desvio padrão entre os pontos medidos e a curva ajustada é 0.012%, que é menos do que o esperado, isto conhecendo o erro cometido nas medidas dos dois parâmetros. Se é necessário uma maior precisão, pode-se usar um maior número de medidas no cálculo, pois a temperatura é um parâmetro cujas variações são normalmente lentas.

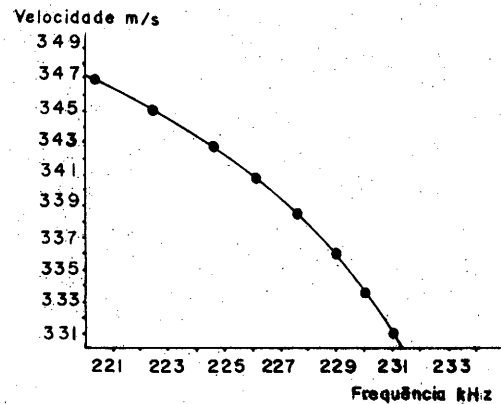


Figura 11. Relação entre a velocidade do som e a frequência.

6. CONCLUSÃO

Foi apresentado um sistema alternativo para medição de distância e para a correção da variação da velocidade do som com a temperatura. Utilizou-se um sensor ultra-sônico, em fase experimental, que usando técnicas digitais, e aplicando um modelo semi-empírico ao eco, melhora notavelmente a precisão obtida na medida de distância. O sistema alcança uma precisão de 0.02 mm para objetos muito distintos e distâncias entre 5 e 100 cm. Em condições reais a precisão cai a 0.1 mm. Se for usada a correção da temperatura, o método dá uma precisão de 0.015% no cálculo da velocidade do som, isto na faixa de 0 a 35 graus celsius, entretanto, usando as técnicas aqui expostas, é possível refinar ainda mais este método, obtendo-se maior precisão.

7. REFERÊNCIAS

- CALDERÓN, L. (1984), Sensor ultrasónico adaptativo de medidas de distâncias. Aplicación en el campo de la robótica, Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, España, 165-167.
- DURAND, D. (1984), Etude et Realization d'un Dispositif Multicapturs Permettant la Conduite Automatique d'un Assemblage Sous-Marin, These doctorale, Universite Paul Sabatier de Toulouse.
- JAFFE, D.L. (1985), Polaroid Ultrasonic Ranging Sensors in Robotic Applications. *Robotic Age*, 23-30.
- KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. (1983), *Ultrasonic Testing of Materials*, New York, Springer-Verlag, ISBN 3-540-11733-4.
- MARTIN, J.M.; CERES, R.; NO, J.; CALDERÓN, L. (1987), Adaptive Ultrasonic Range-Finder for Robots. Workshop on Sensor Devices and Systems for Robotics, Nato-Costa Brava, Spain.
- MARTIN, J.M.; CERES, R.; CALDERÓN, L.; FREIRE, T. (1989), Automatic Thermal Correction for Ultrasonic Range System, *Sensor Review*, 153-155.
- MOLINA, R. (1988), Medida de la velocidad de móviles por técnicas directas ultrasónicas para robots industriales, Trabajo fin de carrera, Escuela Universitaria de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, 1-117.
- PHILIPS, (1974), *Piezoelectric Ceramics, Application book*.
- REGTIEN, P.P.L.; HAKKESTEETG, H.C. (1988), A low-cost sonar system for object identification. Proc. Int. Symposium on Industrial Robots, 201-210.