

## Goodears – Robot orientado por um farol acústico

João Reis, Paulo Santos, José Neto Vieira e Luís Almeida

**Resumo** – Este artigo descreve de forma sucinta o robot *Goodears*, um robot autónomo capaz de se orientar por uma fonte sonora. O sistema de orientação possui dois microfones espaçados de uma distância  $D_M$ . A direcção da fonte sonora é obtida com base no atraso relativo entre os sinais recebidos no microfones. Foram seguidas duas abordagens relativamente à caracterização da fonte sonora: previamente conhecida e desconhecida. No primeiro caso usaram-se *matched filters* combinados com uma PLLs tendo-se obtido muito bons resultados. O robot era efectivamente capaz de seguir uma fonte sonora com características pré-definidas mesmo emitindo com reduzidos níveis de potência e em presença de ruído. No segundo caso fez-se uma correlação cruzada entre os dois sinais tendo-se obtido resultados positivos embora inferiores aos da outra abordagem.

**Abstract** - This paper presents a brief description of the *Goodears* robot which is an autonomous robot capable of following an acoustic source. The robot has two microphones spaced by a given distance  $D_M$ . The direction of the sound source is computed based on the delay between the microphone signals. Two distinct approaches have been followed concerning the acoustic source: previously known and unknown. In the first case, a pair of *matched filters* was used, combined with one PLL each, resulting in a very good performance. The robot could effectively follow a sound source with pre-determined characteristics even when emitting with low power and in the presence of noise. In the second case a cross correlation was carried out between the signals of the two microphones. The results were positive although not as good as those of the first approach.

### I. INTRODUÇÃO

O robot *Goodears* foi desenvolvido por um grupo de dois alunos de Eng<sup>a</sup> Electrónica e Telecomunicações no âmbito do seu projecto de fim-de-curso. O objectivo principal que presidiu à sua construção foi o de estudar mecanismos que permitissem determinar a direcção de uma fonte sonora, não baseados na intensidade, de forma a que um agente autónomo, um robot, se pudesse guiar por essa mesma fonte. Um robot equipado com tal sistema poderia, por exemplo, reagir a um chamamento acústico, deslocando-se em direcção ao chamador. Pretendia-se, ainda, desenvolver o trabalho apenas com dois microfones, à semelhança dos seres vivos que possuem dois ouvidos. Por último, pretendia-se averiguar a

possibilidade de instalação do sistema numa plataforma de baixo consumo que permitisse o funcionamento a partir de um conjunto de baterias NiCad pequenas (AA). A plataforma utilizada foi um kit DSP baseado no processador TMS320C30 com o interface analógico adequado quer à ligação dos microfones quer ao controlo dos motores.

Relativamente à caracterização da fonte sonora, existem duas situações distintas, uma em que a fonte é conhecida e outra em que não é. O primeiro caso permite tirar partido das propriedades do som emitido pela fonte para o conseguir identificar e discriminar, mesmo imerso em ruído ambiente. O segundo caso é mais complexo, esperando que o robot reaja a um som qualquer. Para estas duas situações seguiram-se duas abordagens diferentes. No primeiro caso, usou-se um *matched filter* associado a cada sinal. A saída desse filtro era aplicada a uma PLL realizada em software que permitia obter uma sequência regular de pulsos. Posteriormente era medido o desfasamento temporal entre os pulsos das duas sequências. No segundo caso aplicou-se uma correlação cruzada entre os sinais dos dois microfones, medindo-se o atraso relativo dos dois sinais através do desvio do pico da correlação.

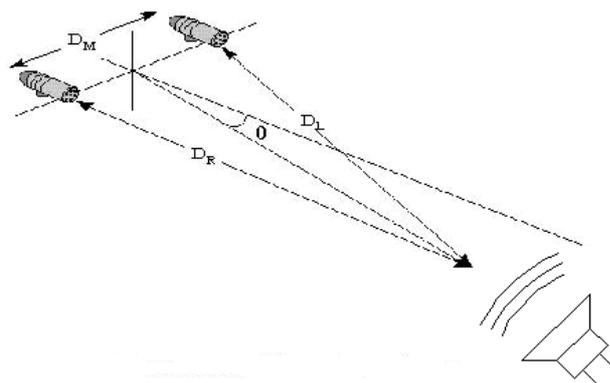


Fig. 1 – Visão geral do sistema com os dois microfones separados de uma distância  $D_M$  e a geometria de detecção da posição da fonte sonora.

Em ambas as abordagens, a determinação da direcção da fonte sonora (Sound Direction Of Arrival - SDOA) baseia-se no cálculo da diferença de tempo interaural, em inglês Interaural Time Difference (ITD), que consiste em determinar o desfasamento entre os sinais recebidos nos dois microfones (fig. 1).

Para distâncias  $D_L$  e  $D_R$  (de left e right) muito maiores que o espaçamento dos microfones  $D_M$  (fig. 1), o ângulo a que está a fonte pode ser aproximado por

$$\theta \cong \sin^{-1}\left(\frac{D_L - D_R}{D_M}\right) \quad (1)$$

ou em termos da ITD em amostras

$$\theta \cong \sin^{-1}\left(\frac{v_s ITD}{D_M}\right) \quad (2)$$

em que  $v_s$  é a velocidade do som. O cálculo da ITD é efectuado de forma diferente consoante a abordagem seguida, i.e. com fonte conhecida ou não. Em qualquer dos casos, é necessário que os sinais sonoros emitidos pela fonte tenham um conteúdo espectral relativamente largo.

Na secção seguinte é exposta a utilização da técnica de *matched filter*, utilizada na abordagem com fonte sonora conhecida. Na secção III expõe-se a utilização da correlação cruzada para obter a direcção de fontes sonoras desconhecidas. O artigo termina com algumas observações críticas relativas à implementação de ambas as abordagens, à construção do robot e seu desempenho.

## II. PRIMEIRO MÉTODO: MATCHED FILTER

Uma das técnicas de estimação de atraso temporal mais conhecidas baseia-se na utilização de *matched filters*. Esta abordagem pode ser facilmente implementada, embora a respectiva resolução seja limitada pela largura de banda do sinal transmitido. Neste método é emitido um sinal sonoro conhecido, com uma largura de banda grande (300-3400Hz) relativamente ao espectro audível. Este sinal, designado por *chirp de frequência*, será melhor descrito posteriormente. Na figura 2 encontra-se o diagrama de blocos relativo ao cálculo da ITD usando este primeiro método.

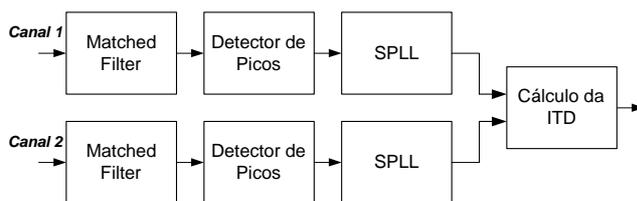


Fig. 2 - Diagrama de blocos do 1º método

### Matched Filter

Em muitos sistemas é considerado o problema de recuperar um sinal com uma forma de onda desconhecida a partir de um sinal original, usando toda a sua informação tal como a largura de banda que ocupa, a altura de ocorrência, ou as suas propriedades estatísticas no domínio dos tempos. Contudo, em algumas situações, a forma do sinal que se espera receber é previamente conhecida. Nesse caso, podemos aplicar uma técnica denominada de *matched filtering*. Com esta técnica

consegue-se melhorar substancialmente a relação sinal ruído na detecção do sinal. Basicamente, a técnica de *matched filtering* consiste em correlacionar o sinal de entrada, desconhecido, com o sinal esperado. Sempre que um padrão semelhante ao sinal esperado for reconhecido no sinal de entrada, o filtro gera um pico na respectiva saída.

### Conceitos

Para se perceber melhor a técnica de *matched filtering* convém relembrar dois conceitos fundamentais da teoria do processamento digital de sinal: o somatório de convolução (3) e o de correlação cruzada (4).

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} h[n]x[k-n] \quad (3)$$

$$R_{xy}[\tau] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n+\tau] \quad (4)$$

No primeiro caso é efectuada a multiplicação com acumulação da resposta impulsional  $h[n]$  do sistema por uma versão invertida no tempo e atrasada do sinal de entrada  $x[n]$ . No segundo caso é efectuada a multiplicação com acumulação dos sinais  $x[n]$  e  $y[n]$  em que este último é atrasado no tempo  $\tau$  amostras. A diferença mais relevante entre os dois somatórios é que no primeiro, i.e. na convolução, é necessário inverter no tempo um dos sinais originais.

Suponhamos agora que um sinal  $x[n]$  é aplicado à entrada de um sistema linear que tem uma resposta impulsional  $h[n]$  igual a uma versão de  $x[n]$  invertida no tempo. A saída de tal sistema é dada pelo somatório de convolução que, neste caso, coincide com o somatório de autocorrelação do sinal  $x[n]$ . Um sistema linear assim é chamado de *matched filter*, uma vez que a resposta impulsional do filtro é uma versão do sinal a detectar.

Para facilitar a detecção do sinal  $x[n]$  é conveniente que a respectiva função de autocorrelação seja tanto quanto possível semelhante a um impulso. Quando assim é, sempre que o sinal à entrada contém uma versão de  $x[n]$ , o filtro gera um impulso na saída. O problema da detecção do sinal pré-definido  $x[n]$  é então reduzido à procura de impulsos na saída do filtro.

Um sinal que possui uma função de autocorrelação impulsional é o ruído branco. A sua função de autocorrelação com densidade espectral de potência  $\sigma$ , é dada por (5).

$$R_{xy}[\tau] = \sigma\delta(\tau) \quad (5)$$

Outros exemplos de sinais com autocorrelação impulsional são o *chirp de frequência* e uma sequência aleatória de  $\pm 1$ .

Na prática estes sinais podem apenas ser aproximados, usando uma duração e banda limitada. Contudo, usando valores grandes mas realizáveis para estas grandezas é

possível obter sinais com autocorrelação suficientemente próxima do impulso ideal. Nestas condições a técnica de *matched filtering* tem um bom desempenho, permitindo detectar um sinal pré-definido na presença de ruído mesmo com relações sinal/ruído muito baixas.

*Chirp de frequência*

O sinal escolhido para ser emitido pelo farol acústico foi o *chirp de frequência*. Este sinal pode ser interpretado como uma sinusóide cuja frequência varia linearmente ao longo do tempo desde uma frequência inicial  $f_0$  até à frequência  $f_1$ . Este sinal pode ser descrito como a modulação em frequência de um sinal em dente de serra e representado pela expressão (6) em que  $\psi(t)$  é a fase instantânea.

$$x(t) = A \cos(\psi(t)) = \Re\{Ae^{j\psi(t)}\} \quad (6)$$

A derivada da fase em ordem ao tempo dá-nos a frequência angular e dividindo por  $2\pi$  obtemos a frequência instantânea em Hz (7).

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi(t) \quad (7)$$

Por outro lado, pretendemos que a frequência cresça linearmente a partir de um valor inicial  $f_0$  tal como descrito em (8). O declive de  $f_i(t)$  é  $2\mu$ , e a sua ordenada na origem é  $f_0$ . Se o sinal começar em  $t = 0$ , então  $f_0$  é também a frequência inicial.

$$f_i(t) = 2\mu t + f_0. \quad (8)$$

A partir das expressões (7) e (8), por integração, pode-se obter a fase instantânea  $\psi(t)$ , resultando na expressão (9).

$$\psi(t) = 2\pi\mu t^2 + 2\pi f_0 t + \phi \quad (9)$$

Considerando que o *chirp* tem uma duração  $T$ , então, o *matched filter* terá como resposta impulsional o sinal dado por (10) que não é mais que o próprio *chirp* invertido no tempo.

$$h(t) = f(T - t) \quad (10)$$

*Detector de picos*

O detector de picos tem como função detectar os impulsos gerados pelo filtro com uma energia acima de um dado limiar. Estes correspondem a detecções do sinal pré-definido imerso no sinal de entrada. A definição do limiar tem repercussões importantes. Se o limiar estiver demasiado baixo poderão existir detecções falsas. Se estiver demasiado alto, as ocorrências do sinal pré-definido no sinal de entrada poderão não ser detectadas. Uma vez que o melhor valor para o limiar não é conhecido *a priori*, utilizou-se um algoritmo adaptativo para estimar dinamicamente o seu valor (fig. 3). A saída do *matched filter* é passada por um rectificador de meia

onda e depois por um filtro IIR passa-baixo de 1ª ordem com uma largura de banda muito baixa. O limiar para a detecção dos picos é definido para metade do valor de saída do filtro. Com este método o limiar de detecção é automaticamente ajustado quer quando, por exemplo, o robot se aproxima do farol acústico, quer quando se afasta.

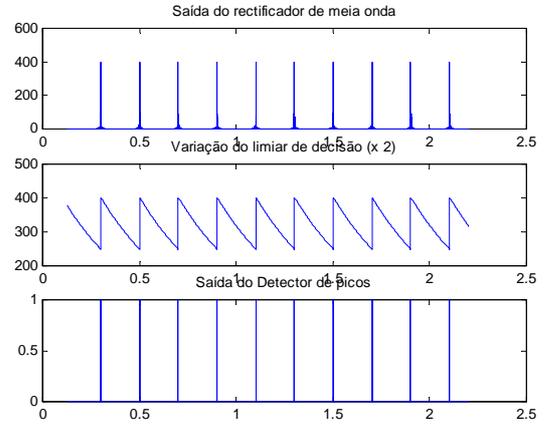


Fig. 3 – Evolução do limiar adaptativo do detector de picos.

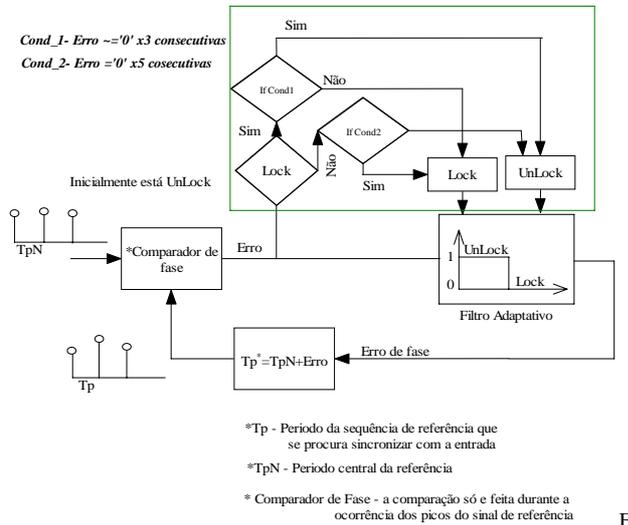
*Software PLL (SPLL) e cálculo da ITD*

Antes de fazermos uma explicação do funcionamento da PLL convém relembrar que o sistema é composto por dois canais audio. O sinal obtido em cada um destes canais é submetido independentemente a um *matched filter* e um detector de picos. As saídas de ambos os detectores contém uma sequência de impulsos cujo desfasamento temporal é usado para calcular a ITD conforme referido na secção I e figura 2. Contudo, dado que os dois canais são independentes, poderão ocorrer situações em que é gerado um impulso apenas num canal, podendo esta situação originar erros na determinação da ITD.

Para evitar estas situações, utilizou-se mais um aspecto pré-conhecido do sinal acústico emitido, i.e. o período de repetição do *chirp* ( $T_p$ ). Assim, tendo em conta eventuais falhas de detecção do *chirp*, a saída do detector de picos é constituída por uma sequência de impulsos espaçados  $T_p N$  em que N representa o número instantâneo de períodos entre dois impulsos consecutivos (fig. 4). Esta sequência é aplicada a uma PLL que só sincroniza com a frequência pré-definida de repetição do *chirp* ( $1/T_p$ ). Assim, sempre que a PLL se encontra sintonizada, i.e. *locked*, a respectiva saída é uma sequência de impulsos com um período regular igual ao período de repetição do *chirp*.

A figura 4 descreve a constituição e funcionamento da PLL realizada em *software*. A comparação de fase, i.e. a determinação da diferença entre o período instantâneo e o de referência, é efectuada sincronamente com os impulsos do sinal de referência gerado pela PLL. Deste modo é possível eliminar eventuais picos indesejáveis do sinal de entrada, tornando o sistema mais robusto.

Depois dos sinais de ambos os canais passarem pelas respectivas PLL's, sempre que estas estiverem sincronizadas podemos efectuar a medição do atraso de uma das seqüências relativamente à outra sem risco de cometer erros por ausência de impulsos num dos canais. A determinação deste atraso permite estabelecer o valor da ITD, para posterior localização da fonte acústica no plano azimutal.



ig. 4 – Diagrama de blocos da SPLL

### III. SEGUNDO MÉTODO: CORRELAÇÃO CRUZADA

#### Teoria subjacente

Outro método para obter a direcção de uma fonte sonora consiste na utilização da correlação cruzada dos sinais dos dois microfones. Neste caso não existe nenhum sinal pré-definido pelo que o robot se deverá orientar para o som mais forte.

A correlação cruzada entre dois sinais (4) pode ser entendida como uma medida da semelhança entre esses sinais. A função de correlação apresenta um máximo no instante em que a semelhança entre os sinais é também máxima. Assim, o desvio do máximo da função de correlação relativamente à posição central  $\tau = 0$  representa o atraso de um sinal em relação ao outro.

Aplicando uma janela temporal aos sinais de ambos os canais e calculando a respectiva função de correlação deverá ser possível determinar o desvio do respectivo máximo e daí calcular a ITD. O sinal, positivo ou negativo, desse desvio define a localização esquerda ou direita da fonte sonora no plano azimutal.

Também neste método se coloca a questão de determinação do máximo da função de correlação. De facto, sempre que os sinais correlacionados tiverem um baixo conteúdo espectral, i.e. uma largura de banda estreita, a função de correlação resulta numa forma alargada, cujo máximo pode ser difícil de determinar. Por

outro lado, se os sinais tiverem um conteúdo espectral rico, a função de correlação apresenta um pico relativamente estreito, facilitando a determinação do máximo. Deste modo será de esperar que este método apresente melhores resultados sempre que os sons produzidos para orientação do robot contemham um espectro relativamente largo.

#### Implementação

Uma das dificuldades práticas associadas a este método consiste no próprio cálculo da função de correlação. De facto, a utilização directa da expressão (4) é muito pesada computacionalmente; exigindo um processador de grande capacidade de cálculo especialmente para janelas de dimensão elevada. Por outro lado, a utilização de janelas justapostas, i.e. sem sobreposição, pode resultar em variações grandes e súbitas nos sinais e, conseqüentemente, na função de correlação.

Para resolver estes problemas utilizou-se uma janela deslizante em que a janela seguinte, com N amostras de largura, é obtida a partir da anterior pelo deslocamento de uma amostra. Neste caso, comparando os cálculos das funções de correlação de duas janelas consecutivas, existem muitas operações comuns. Para cada  $\tau$  todos os termos do somatório são os mesmos à excepção do primeiro produto da correlação anterior e último produto da correlação actual. Assim, a correlação para uma nova janela (n+1) pode ser obtida a partir da da janela anterior (n) conforme descrito em (11).

$$R_{xy}(n+1, \tau) = \begin{cases} R_{xy}(n, \tau) - x_{n-\tau}y_n + x_{n+N}y_{n+N+\tau} & \tau < 0 \\ R_{xy}(n, \tau) - x_ny_{n+\tau} + x_{n+N-\tau}y_{n+N} & \tau \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Para além do cálculo recursivo da função de correlação, os requisitos de capacidade cálculo foram ainda mais reduzidos através da limitação dos valores de  $\tau$  para os quais a função de correlação era efectivamente calculada. Por exemplo, se o valor máximo absoluto para a ITD corresponde a um desfasamento de 8 amostras, não adianta calcular a correlação para  $|\tau| > 8$ , poupando assim muito tempo de processamento.

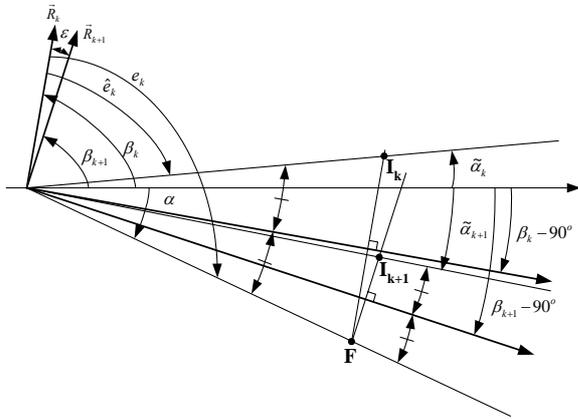
### IV. INDEFINIÇÃO FRENTE-TRÁS

A utilização de apenas dois microfones para determinar a direcção de uma fonte sonora com base na IDT não permite distinguir entre uma fonte localizada à frente e outra localizada atrás da linha que une os microfones. Assim, se um farol acústico F se encontrar localizado atrás da linha dos microfones o robot verá a imagem virtual I localizada à frente dessa linha.

Contudo, como a informação azimutal obtida a partir da IDT é utilizada para orientação do robot, causando um determinado movimento angular em direcção à fonte sonora detectada, o robot acaba sempre por se orientar para o farol acústico real. Este facto, aparentemente estranho, deve-se ao algoritmo de orientação baseado na

minimização do erro angular entre a posição da fonte sonora detectada e a orientação do robot e é explicado abaixo.

Na exposição que se segue considera-se que o robot usa controlo diferencial de direcção e que os microfones se encontram sobre a linha que une as rodas do robot, linha esta perpendicular à respectiva orientação.



Fi

g. 5 – Geometria do problema de orientação do robot para o farol F.

Na figura 5 o robot, num dado instante  $t_k$ , está orientado na direcção  $R_k$  com um ângulo  $\beta_k$  relativamente a um eixo de referência genérico (linha horizontal). A recta que une os dois microfones, perpendicular à orientação do robot, faz então um ângulo de  $\beta_k - 90^\circ$  com esse eixo. As expressões (12) permitem obter os erros angulares relativo ao farol  $F$  ( $e_k$ ) e relativo à imagem  $I_k$  ( $\hat{e}_k$ ), para esse instante de amostragem. Dada a simetria da imagem e do farol relativa à linha dos microfones, os dois erros são complementares, i.e.  $e_k + \hat{e}_k = \pm 180^\circ$ .

$$e_k = \alpha - \beta_k \tag{12}$$

$$\hat{e}_k = \tilde{\alpha}_k - \beta_k = [2(\beta_k - 90^\circ) - \alpha] - \beta_k = \pm 180 - e_k$$

O erro angular efectivamente medido pelo robot está compreendido entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ , de modo que entre o farol real e a imagem, o robot detecta o que estiver à sua frente. Na situação descrita na figura 5 o farol  $F$  está atrás do robot e a imagem  $I_k$  à frente pelo que o erro medido é o relativo à imagem  $\hat{e}_k$ .

Utilizando um algoritmo de controlo que minimize o erro medido pelo robot, este efectuará um movimento angular correctivo  $\varepsilon_k$  na direcção do erro  $\hat{e}_k$  (ou  $e_k$  se o farol estiver à frente). Assim, no instante seguinte  $t_{k+1}$ , o robot encontrar-se-á orientado segundo  $R_{k+1}$ , com um ângulo  $\beta_{k+1} = \beta_k + \varepsilon_k$ . Os erros relativos ao farol real  $e_{k+1}$  e à imagem  $\hat{e}_{k+1}$  são dados pela expressões (13). A nova posição da imagem é dada por  $I_{k+1}$ .

$$e_{k+1} = \alpha - \beta_{k+1} = \alpha - \beta_k - \varepsilon_k = e_k - \varepsilon_k \tag{13}$$

$$\hat{e}_{k+1} = \tilde{\alpha}_{k+1} - \beta_{k+1} = \pm 180 - e_{k+1} = \hat{e}_k + \varepsilon_k$$

Tendo em atenção que  $e_k$ ,  $\hat{e}_k$  e  $\varepsilon_k$  têm sempre o mesmo sinal, facilmente se vê pelas expressões (13) que o erro relativo ao farol real diminui, enquanto o erro relativo à

imagem aumenta. De facto, enquanto  $e_k$  tende para 0,  $\hat{e}_k$  tende para  $180^\circ$ . O movimento de orientação para o farol real faz com que a respectiva imagem se afaste para a traseira do robot. É interessante, ainda, reparar que quando o robot se orienta para imagem virtual do farol o erro aumenta em módulo. Contudo, assim que o farol real passa para a frente, i.e. a partir do ponto onde  $e_k = \hat{e}_k = \pm 90^\circ$ , o robot começa a orientar-se por este e o erro diminui até 0.

Numa situação limite em que o robot se encontre perfeitamente alinhado com o farol mas em direcção oposta (i.e.  $\hat{e}_k = 0$  e  $e_k = 180^\circ$ ), é possível que o algoritmo de orientação não funcione e que o robot siga a imagem do farol, afastando-se deste. No entanto, ao menor desvio deste alinhamento o robot orientar-se-á rapidamente para o farol real pelo que a situação referida dificilmente ocorrerá na prática.

### V. OUTRAS QUESTÕES PRÁTICAS

Para além das questões relacionadas com cada método específico de detecção de uma fonte sonora, bem como com a indefinição frente-trás exposta na secção anterior, existem outras questões relacionadas com a construção prática do robot que merecem ser referidas. Em particular, abordaremos o compromisso entre resolução e aproximação de *far field* bem como outras fontes de erro e limitações inerentes ao funcionamento e construção do robot *Goodears*.

No que diz respeito ao primeiro aspecto, a resolução obtida na orientação do robot para o farol acústico é limitada pelo facto de haver um número discreto de ângulos que podem ser medidos. Este número está directamente relacionado com a distância entre os microfones. À medida que esta aumenta, também aumenta o atraso temporal entre os respectivos sinais. Quanto maior for este atraso mais amostras temos para representar esta diferença de tempo. Cada amostra tirada neste período representa um ângulo discreto. Para pequenas distâncias, ficamos com um número insuficiente de amostras para representar os ângulos, logo, com uma resolução muito pobre. Por outro lado, se aumentarmos muito a separação dos microfones, aumenta a resolução mas também aumenta a distância mínima da fonte sonora para que possamos usar a aproximação de *far-field*. Esta aproximação corresponde a desprezar a curvatura das ondas sonoras, considerando que estas se propagam como uma onda plana, e é usada no cálculo da posição angular da fonte sonora a partir da ITD. Assim, a determinação da distância entre os microfones deve ser efectuada com base neste compromisso entre resolução e distância mínima do farol acústico.

Para além da limitação na resolução, qualquer dos métodos descritos neste artigo pode ainda ser negativamente influenciado por outros factores. Por exemplo, a existência de reverberações pode levar a consideráveis distorções no sinal sonoro original correspondendo à co-

existência de várias fontes idênticas mas com posições distintas.

Por outro lado, a precisão também é limitada pelo facto da velocidade do som aparecer como constante na fórmula de estimação do ângulo a partir da ITD, quando esta varia ligeiramente com factores ambientais.

Uma importante fonte de ruído está associada ao próprio funcionamento dos motores eléctricos de locomoção do robot. De facto, estes motores não só geram ruído eléctrico como também sonoro, dificultando a determinação da posição do farol acústico. Para evitar este problema, optou-se por fazer a aquisição de som e a locomoção alternadamente, sem sobreposição. Se, por um lado, se resolveram as questões de ruído gerado pelos motores, por outro o movimento obtido não é suave mas sim constituído por uma sequência de pequenas deslocações. Os tempos de imobilização para aquisição de som são, contudo, curtos, inferiores a 1 segundo, resultando num movimento quase contínuo.

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo descreve sucintamente o funcionamento do robot autónomo *Goodears*, sendo dada ênfase à sua capacidade de orientação para um farol acústico. Esta capacidade é conseguida à custa da detecção da posição angular de uma fonte sonora utilizando apenas dois microfones e informação de fase. Testaram-se dois métodos para efectuar a detecção angular da fonte sonora: o primeiro baseado em *matched filters* e utilizando um som pré-definido, um *chirp* de frequências (secção II); o segundo baseado na função de correlação cruzada reagindo a qualquer som com intensidade suficiente (secção III).

O desempenho obtido com o primeiro método foi considerado muito bom uma vez que o robot conseguia

seguir o farol acústico eficientemente, mesmo na presença de ruído e com intensidade imperceptível ao ouvido humano. Este bom desempenho fica a dever-se à exploração eficiente do conhecimento apriorístico do sinal emitido.

Com o segundo método, o desempenho obtido foi também positivo mas inferior ao do método anterior. De facto, o desconhecimento do som emitido aumenta substancialmente a complexidade do problema. Para alguns sons mais pobres em conteúdo espectral, o robot perdia-se frequentemente. Contudo, para sons com maior largura de banda, tipo palmas, pancadas secas com um objecto duro, etc., o robot conseguia normalmente encontrar a fonte sonora.

Um dos resultados colaterais mais interessantes foi a observação de que a indefinição frente-trás inerente à utilização de apenas dois microfones não afecta a capacidade de orientação do robot. Este facto é explicado neste artigo na secção IV.

Finalmente, o robot *Goodears* é completamente autónomo, funcionando a partir de um conjunto de pilhas NiCad pequenas, tipo AA. A autonomia obtida depende das movimentações efectuadas pelo robot mas é próxima dos 15 minutos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] James H. McClellan, Ronald W. Shafer e, Mark A. Yoder: "*DSP First A Multimedia Approach*", Prentice-Hall, 1998
- [2] Paul A. Lynn: "An introduction to the Analysis and Processing of Signals", 3ª ed., MACMILLAN PRESS LTD, 1989
- [3] Paul A. Lynn: "Introductory Digital Signal Processing", 2ª ed., Wiley, 1998
- [4] Roland E. Best: "Phase-Locked Loops", 3ª ed., McGraw-Hill, 1997