
MEDIÇÃO DE VELOCIDADE ANGULAR COM ALTA RESOLUÇÃO USANDO ENCONDERS DE BAIXA RESOLUÇÃO E PLL

Elyson A. N. Carvalho^{1,2*}

José G. N. de Carvalho Filho^{1*}

Lucas Molina^{1,2*}

Eduardo O. Freire^{1*}

Raimundo C. S. Freire^{2*}

Benedito A. Luciano^{2*}

*¹ Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe – DEL/UFS, São Cristóvão-SE – Brasil

†² Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – DEE/UFCG – Brasil

RESUMO

Neste artigo é apresentada uma nova abordagem para a medição de velocidade angular de motores baseada no uso de PLL (*Phase-Locked Loop*) que permite a obtenção de medições de alta resolução usando um *encoder* óptico de baixa resolução. Um sistema completo de medição foi desenvolvido com base na fusão do método proposto com o método clássico *T*, inclusive tornando possível medir velocidade nula e definir o sentido de rotação do eixo. A fim de validar a abordagem proposta, foram considerados alguns parâmetros de comparação entre o método proposto e um método clássico. Os resultados referentes a cada método são apresentados e discutidos, bem como as comparações entre os mesmos.

KEYWORDS: Medição de Velocidade Angular, *Encoders* Ópticos, PLL.

ABSTRACT

High Resolution Angular Velocity Measurement Using Low-Resolution Encoders and PLL

Artigo submetido em 17/10/2009 (Id.: 01061)

Revisado em 19/03/2010, 22/10/2010

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda

In this paper a new approach to perform angular velocity measurement of a motor is presented. The approach is based on the use of PLL (*Phase-Locked Loop*) and is able to perform high resolution measurements despite the use of a low resolution encoder. A complete measurement system was developed fusing the proposed approach and the classic *T* method, allowing even the measurement of zero velocity and the determination of the shaft rotation direction. In order to validate the proposed approach, some parameters were considered to compare its performance with the performance of a classical method. To validate the proposed approach and to compare it with the classical methods, some comparison parameters were considered. The results obtained using each method are presented and discussed, as well as the comparison between them.

KEYWORDS: Angular Velocity Measurement, Optical Encoders, PLL.

1 INTRODUÇÃO

A depender do sistema a ser analisado, diversas podem ser as variáveis de estado de interesse. Quando o sistema em questão é um motor, uma das principais grandezas a ser mensurada é a velocidade de rotação do eixo. Existem diferentes formas de obter a medição desta variável a depender do tipo de motor utilizado e do grau de

confiabilidade necessário. A medição de velocidade angular pode ser realizada de diversas formas, como por exemplo, usando sensores de contato (como uma chave), acionado pelo giro do eixo do motor, ou sensores de não-contato (Petukhov e Pruglov, 1984)(Kurfess e Hodgson, 2007).

Dentre os métodos mais utilizados para medição de velocidade angular em motores, destacam-se aqueles que utilizam *encoders* ópticos (Kurfess e Hodgson, 2007). Nestes métodos, um disco contendo perfurações igualmente espaçadas é acoplado ao eixo do motor e um par emissor/receptor de infravermelho é posicionado de modo a observar a variação entre as perfurações e as áreas não perfuradas do disco. Conforme o eixo do motor gira, a luz infravermelha emitida é bloqueada e não bloqueada sequencialmente, gerando no receptor um sinal com frequência proporcional à velocidade do rotor (Kurfess e Hodgson, 2007). Os métodos baseados em *encoders* são amplamente utilizados, sobretudo por serem de fácil implementação. Porém, esses métodos possuem alguns problemas em comum como, por exemplo, a relação de dependência entre a precisão da medida, a velocidade do rotor e a taxa de aquisição das medições (Borenstein e Feng, 1996)(Carvalho-Filho et al., 2008).

Quando o dispositivo considerado é um *encoder*, diferentes métodos podem ser utilizados na determinação da velocidade angular do motor a partir do sinal gerado no *encoder*. Dentre estes, destacam-se os métodos clássicos de medição, tais como os métodos *T* e *M* (Kirianaki et al., 2001 e suas referências), *M/T* (Ohmae et al., 1982), o método *S* (Tsugi e Mizuochi, 2005) e os métodos baseados na teoria de observadores (Capponi et al., 2006 e suas referências). Contudo, a depender da velocidade a ser mensurada e da taxa de aquisição, é necessária a utilização de *encoders* de alta resolução, cujo custo é bastante elevado. Dessa forma, a necessidade de tais dispositivos inviabiliza a sua utilização em projetos de baixo custo. Por outro lado, os *encoders* de baixa resolução podem ser facilmente encontrados e a custo acessível. No entanto, testes laboratoriais realizados em (Carvalho-Filho et al. 2008) indicam que a utilização desses dispositivos de baixa resolução juntamente com os métodos mais tradicionais pode comprometer a resolução da medição.

Neste artigo é proposto um novo método de medição de velocidade angular utilizando PLL e *encoders*. Esse método é adequado para altas velocidades (equivalente à faixa de ação do método *M*), fornecendo uma medida de alta resolução, mesmo quando utilizado com *encoders* de poucos furos. Esse método é posteriormente associado ao método *T*, através de uma simples soma ponderada, permitindo, assim, a medição de velocidades mais baixas, inclusive medição de velocidade nula.

Nesse ponto, é importante ressaltar que o sistema de medição proposto nesse trabalho não leva em consideração a excitação do motor, tampouco se propõe a exercer qualquer tipo de atuação sobre ele, o que o caracteriza como um sistema de medição em malha aberta. Essa característica é muito importante, pois torna o sistema de medição totalmente independente do modelo do motor e das variáveis que podem interferir nesse modelo como, por exemplo, as variações de carga.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são descritos os métodos clássicos para medição de velocidade angular utilizando *encoders* ópticos. O método proposto é descrito na seção 3. A seção 4 é dedicada à apresentação e discussão dos resultados obtidos por simulação, bem como à comparação entre o método proposto e o método clássico. Na seção 5 são apresentados os resultados experimentais e, finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 6.

2 MÉTODOS CLÁSSICOS

Vários métodos podem ser utilizados para determinar a velocidade angular de um motor a partir do sinal de saída de um *encoder*. Nessa seção, são apresentados apenas os métodos clássicos cujo funcionamento é independente do modelo do motor. Os mais comuns são: Método *T* e *M* (Nikolay et al., 2001 e suas referências), método *M/T* (Ohmae et al., 1982) e método *S* (Tsugi e Mizuochi, 2005) (Tsugi e Kobayshy, 2007).

O método *M* é o mais usado entre os métodos mencionados acima. Neste método, é contado o número de pulsos (m_e) durante um intervalo de tempo fixo (T_s) e a partir de m_e e T_s calcula-se a velocidade angular do rotor (Tsugi e Mizuochi, 2005). O método *M* é de fácil implementação e não necessita do modelo do motor, mas a exatidão da medição e o tempo de resposta são diretamente dependentes de T_s . Dessa forma, para baixas velocidades a exatidão da medição é deteriorada. A medição de velocidade angular pelo método *M* é dada por:

$$\bar{\omega} = 2\pi \frac{m_e}{T_s P} \quad (1)$$

em que $\bar{\omega}$ é a velocidade angular medida e P é a resolução (número de pulsos por revolução) do *encoder*.

No método *T*, o intervalo de tempo (T_e) entre um número fixo de pulsos (m_s) é medido e a velocidade do rotor é calculada a partir de T_e e do deslocamento angular do rotor referente a m_s (Tsugi e Mizuochi, 2005). Assim como o método *M*, o *T* também é de fácil implementação e não necessita do modelo do motor, além disso, o fato de sincronizar o cálculo da velocidade com a chegada de pulsos, aumenta a exatidão da medida. Por outro lado, esse

aumento da exatidão e o tempo de resposta são inversamente proporcionais à velocidade angular do motor, o que torna este método inapropriado para medir altas velocidades. A medição de velocidade angular pelo método T é dada por:

$$\bar{\omega} = 2\pi \frac{m_s}{T_e P} \quad (2)$$

em que $\bar{\omega}$ é a velocidade angular medida e P é a resolução do *encoder*, da mesma forma que em (1).

O método M/T resulta da combinação dos métodos M e T . Na sua forma mais simples, é adotado um limiar ω_{ref} para dividir a faixa de velocidades em outras duas (baixas e altas). Quando a velocidade que está sendo medida está na faixa das baixas velocidades, o método M/T usa a mesma abordagem do método T para realizar a medição, e quando a medição está na faixa das altas velocidades, usa-se a abordagem do método M (Tsugi e Mizuochi, 2005). As principais vantagens e desvantagens dos métodos M e T , de modo mais suave, são encontrados no método M/T .

O Método S baseia-se no mesmo princípio do método T . No entanto, para aumentar a faixa de velocidades em que o método pode ser aplicado, a curva de velocidade é segmentada e então calcula-se a velocidade em cada segmento como sendo uma medição independente da anterior. Assim, a velocidade real é dada pela soma da velocidade relativa ao segmento com a velocidade máxima de cada segmento anterior, obtendo maior exatidão tanto em velocidades baixas quanto em velocidades altas. Porém, ainda há dependência entre a exatidão, o tempo de resposta e a velocidade angular do motor (Tsugi e Kobayshy, 2007) (Tsugi e Mizuochi, 2005). A medição de velocidade angular pelo método S é dada por:

$$\bar{\omega}(i) = 2\pi \frac{\sum_{j=0}^{n_s-1} m_e(i-j)}{T_e P} \quad (3)$$

em que $\bar{\omega}(i)$ é a velocidade angular medida no i -ésimo período de amostragem, $m_e(k)$ indica a ocorrência ou não de um pulso no k -ésimo período de amostragem, com $k = i - j$, P é a resolução (número de pulsos por revolução) do *encoder* e T_e é o intervalo de tempo entre um número fixo de pulsos.

3 MÉTODO PROPOSTO

Em (Carvalho-Filho et al., 2008) foi proposto um sistema analógico para medição da velocidade angular de um motor usando *encoders* ópticos de baixa resolução, cujo esquema é mostrado na figura 1.

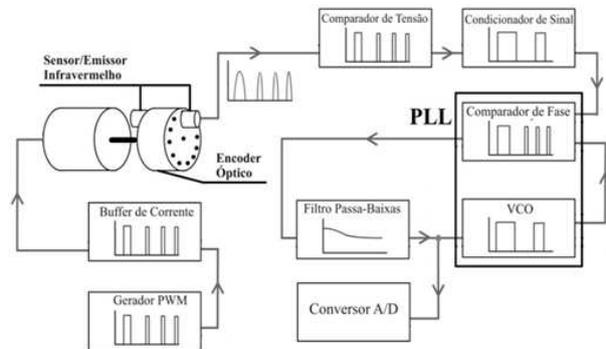


Figura 1: O método Proposto (Carvalho-Filho et al., 2008).

Neste sistema, um PLL é utilizado para gerar um sinal cujo valor de tensão é proporcional à frequência do sinal de saída do *encoder*.

Um PLL é um circuito que funciona através de uma estrutura realimentada na qual o sinal de entrada é comparado com um sinal gerado por um VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*). A frequência do VCO é ajustada de acordo com a tensão de realimentação, que é o resultado da diferença de fase entre aqueles dois sinais. Assim, o circuito faz uso da realimentação para tornar a frequência de oscilação da saída do VCO igual à frequência do sinal de entrada. Como o VCO faz uma transformação linear da tensão em frequência, o valor da tensão na entrada do VCO corresponde a uma medida da frequência de oscilação de seu sinal de saída que, por sua vez, é igual à frequência do sinal de saída do *encoder*. Portanto, a tensão de entrada do VCO é uma medida indireta da velocidade do rotor.

Gerado um nível de tensão proporcional à frequência do sinal de saída do *encoder*, utiliza-se um conversor A/D para converter este nível de tensão analógico em um sinal digital.

No sistema proposto é utilizado um filtro passa-baixas, cuja função é produzir uma atenuação forte da modulação gerada pela comparação entre o sinal de saída do *encoder* e o sinal gerado pelo VCO. Para isto, o filtro deve ser projetado de forma que sua frequência de corte (f_c) atenda à relação apresentada em (4).

$$f_{vmax} < f_c < f_{emin} \quad (4)$$

As frequências f_{vmax} e f_{emin} são a frequência máxima de variação da velocidade (aceleração) e a menor frequência do sinal de saída do *encoder* (velocidade mínima que pode ser medida usando somente o método baseado em PLL), respectivamente. Essas frequências limites são mostradas na figura 2. Na figura 2.c, é apresentada a frequência máxima de variação (f_{vmax}), a qual representa a maior componente

de frequência do espectro de amplitude do sinal f_e , que é correspondente à máxima variação da frequência do *encoder* no tempo (aceleração máxima do motor admitida). Para a determinação dessa aceleração máxima não é necessário conhecer o modelo dinâmico do motor, bastando para tanto observar a faixa de velocidades e aceleração que se deseja mensurar.

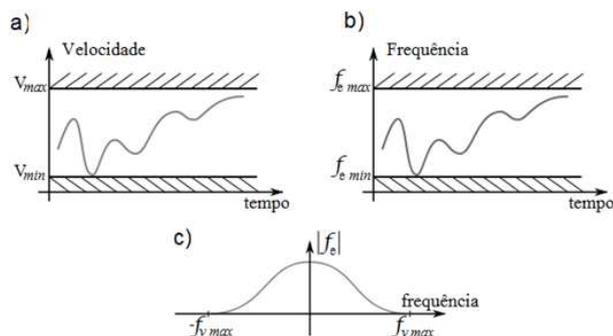


Figura 2: a) Limites de velocidade do motor; b) Limites de frequência da saída do *encoder*; c) Limites da variação de frequência do *encoder* (Carvalho-Filho et al., 2008).

Fora da faixa de medição indicada em (4), o método de medição baseado em PLL começa a perder precisão. No que tange às baixas velocidades, o método *T* foi incorporado ao método proposto de forma que a velocidade medida fosse dada pela soma ponderada dos valores medidos pelo método *T* e pelo método proposto. Os pesos atribuídos a cada medição dependem da velocidade angular do motor, mais precisamente da última velocidade medida, e variam de acordo com as curvas mostradas na figura 3. Nessa figura, $\omega_c = 2\pi f_c$, em que f_c indica a frequência de corte do filtro em Hertz.

O cálculo da velocidade é feito a partir de:

$$V = P_P \times V_P + P_T \times V_T \quad (5)$$

em que V é a velocidade obtida a partir das duas medições; V_P é a velocidade medida pelo método proposto; V_T é a velocidade medida pelo método *T*; P_P é o peso atribuído à medição do método proposto e P_T é o peso atribuído à medição do método *T*.

Para a detecção do sentido de rotação do motor é proposta a utilização de um segundo par de emissor/receptor infravermelhos e um circuito lógico. Na figura 4 são mostradas as saídas do *encoder* e o circuito utilizado para detectar o sentido de rotação.

O circuito mostrado na figura 4.b gera uma saída com nível lógico “1” quando o sinal E_1 está adiantado em relação a E_2

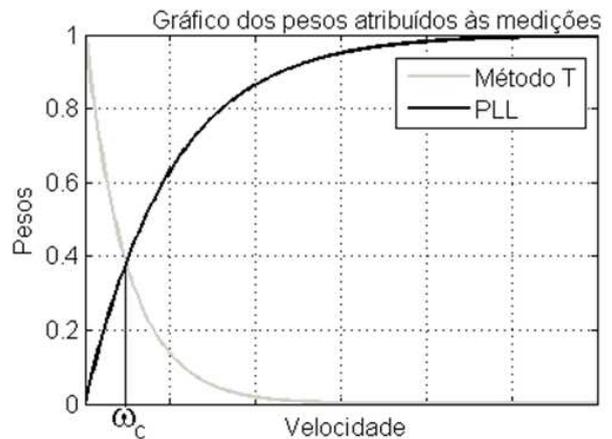


Figura 3: Peso dado às medições do método proposto e do método *T*.

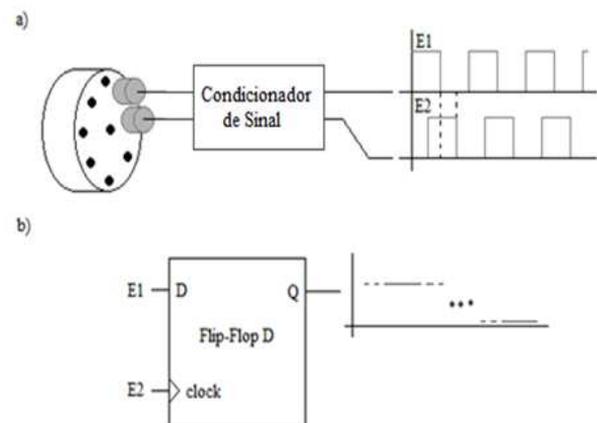


Figura 4: a) *encoder* com os dois pares emissor/receptor infravermelhos; b) Circuito utilizado para detectar o sentido da rotação.

(caso mostrado na figura 4.a), e nível lógico “0” do contrário. Desta forma, é possível saber o sentido de rotação do rotor através do sinal de saída Q do *flip-flop*.

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados em simulação para dois sistemas: um baseado no método desenvolvido (apresentado na seção 3) e outro baseado no método *M*, ambos modelados usando MATLAB/SIMULINK. O método *M* foi escolhido por possibilitar uma comparação entre o método desenvolvido e um método clássico que além de ser adequado para a medição de velocidades na mesma faixa, também não depende do modelo do motor. No experimento realizado, foram simuladas as respostas dos dois sistemas implementados a três diferentes tipos de entrada, quais sejam: (i) Uma onda quadrada; (ii) Uma onda triangular e; (iii) Uma onda senoidal com frequência crescente. Cada um desses sinais representa uma tensão de excitação que será aplicada ao motor durante os experimentos.

As simulações apresentadas nesse trabalho foram realizadas usando o *software* MATLAB/SIMULINK. Um diagrama de blocos é apresentado na figura 5 ilustrando o conjunto motor/*encoder*, em que a saída 1 representa a resposta simulada do motor à excitação de entrada e a saída 2 representa o sinal de resposta do *encoder*, nesse trabalho modelado por um VCO. Este último, é utilizado como entrada no diagrama da figura 6, que representa a simulação do método proposto.

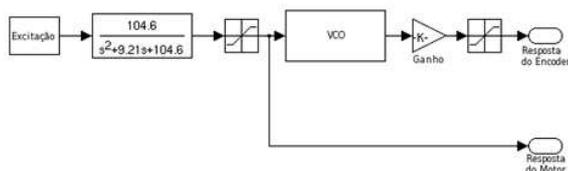


Figura 5: Diagrama de blocos do conjunto motor/*encoder* em SIMULINK.

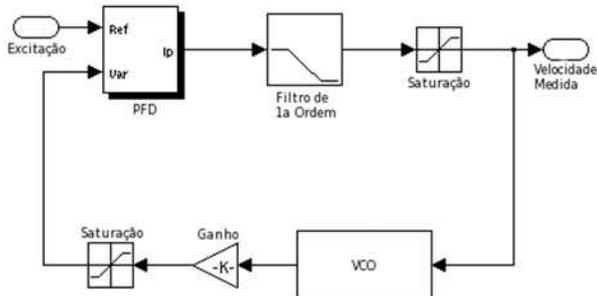


Figura 6: Diagrama de blocos do PLL em SIMULINK.

Para melhor contextualizar as simulações, foi considerado o caso da medição de velocidade angular das rodas de um robô móvel Pioneer 2-DX, fabricado pela Mobile Robots, e que é uma das plataformas de testes mais usadas por pesquisadores da área de robótica em todo o mundo. Dessa forma, na tabela 1 são apresentados os valores absolutos máximos dos parâmetros utilizados na simulação, retirados do *datasheet* do *Pioneer 2-DX*.

Tabela 1: Parâmetros do Pioneer 2-DX.

Parâmetros	Valores
Velocidade linear máxima	2,2 m/s
Aceleração máxima	4,0 m/s ²
Desaceleração máxima	-4,0 m/s ²
Diâmetro das rodas	18,5 cm

A resposta do motor ao sinal de referência pode ser modelada por uma função de transferência de segunda ordem, mostrada em (6), cujas constantes foram determinadas de maneira experimental. Na figura 7 são mostradas as respostas do motor a diferentes excitações.

$$H(s) = \frac{104,6}{s^2 + 9,21s + 104,6} \quad (6)$$

Na simulação do sistema baseado no método *M* foram considerados *encoders* com diferentes resoluções, sendo estas de 38, 128, 512, 1024, 2048 e 4096 furos. Por outro lado, para ilustrar a alta resolução obtida com o método proposto, será considerado que o mesmo foi implementado utilizando um *encoder* com resolução de apenas 38 furos.

Encoders de baixa resolução são mais facilmente encontrados e a custo mais acessível, porém, em robótica, o uso de tais *encoders* é limitado devido ao fato de que a maioria dos métodos utilizados para realizar a medição de velocidade são extremamente dependentes da resolução do *encoder*.

As velocidades angulares medidas para as excitações consideradas são apresentadas na figura 8. Nos primeiros 2 segundos de cada simulação podem ser observadas algumas oscilações da medida em torno do valor esperado. Foi constatado que essas oscilações ocorrem devido a limitações da plataforma de simulação. Para o caso da excitação senoidal, após dezoito segundos o sistema atinge uma aceleração angular de 12,67 rad/s², que corresponde a uma frequência de 0,71 Hz. Como o filtro passa-baixas foi projetado para uma frequência de 0,72 Hz, as medições a partir desse instante passam a ser imprecisas, mostrando o efeito da faixa de medição do sistema.

A resposta do motor a cada uma das excitações consideradas e a medição da velocidade angular realizada usando o método *M* com *encoders* de diferentes resoluções, são apresentadas nas figuras 9, 10 e 11.

A correlação (*r*) e o erro relativo médio (ϵ) entre a resposta simulada do motor à excitação e sua medição foram considerados como critérios de avaliação de desempenho da abordagem proposta e do método *M*. Os valores obtidos para esses parâmetros são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4, para uma excitação em onda quadrada, triangular e senoidal, respectivamente. Tais parâmetros são obtidos através das seguintes equações:

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N (V_r(n) - \bar{V}_r) (V_M(n) - \bar{V}_M)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N (V_r(n) - \bar{V}_r)^2\right) \left(\sum_{n=1}^N (V_M(n) - \bar{V}_M)^2\right)}} \quad (7)$$

$$\epsilon = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|V_r(n) - V_M(n)|}{V_r(n)} \right) \times 100 \quad (8)$$

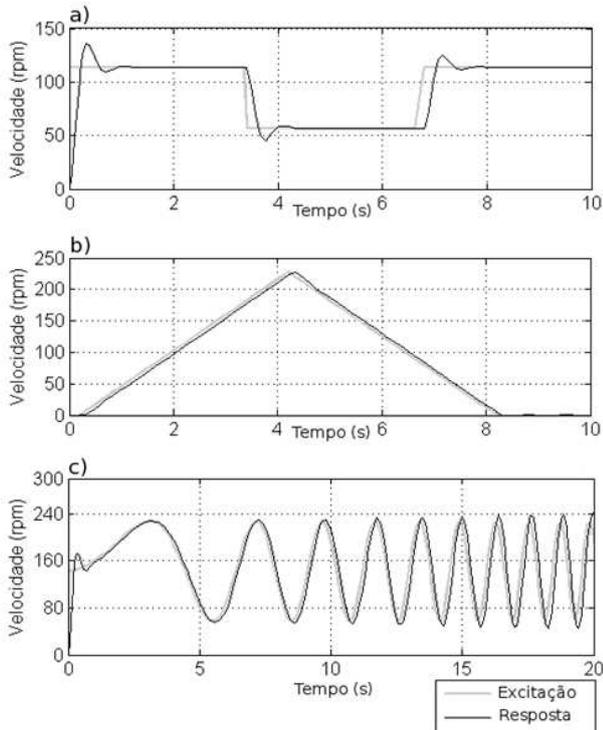


Figura 7: Resposta do motor, em simulação, às seguintes excitações: a) Onda quadrada; b) Onda triangular; c) Onda senoidal (Carvalho-Filho et al., 2008).

em que $V_r(n)$ é a n -ésima velocidade real do motor, $V_M(n)$ é a n -ésima velocidade medida, $\overline{V_r}$ é a média das velocidades reais no intervalo, $\overline{V_M}$ é a média das velocidades medidas no intervalo, e N é o número de pontos medidos.

As altas correlações entre as velocidades medidas com o sistema proposto e o valor teórico esperado, bem como o erro médio relativo entre eles próximo a zero, demonstram a alta resolução do sistema, mesmo com uso de *encoders* de baixa resolução (38 furos). Tal desempenho é comparável com o obtido usando o método M para um *encoder* de resolução de 2048 furos.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O resultados experimentais foram realizados considerando diferentes tipos de excitação que permitem observar a viabilidade do sistema proposto, sendo elas: um degrau, duas ondas quadradas com frequências e ciclos de trabalho diferentes, uma onda triangular e uma onda senoidal. Para ilustrar a alta resolução obtida pelo método proposto quando são utilizados *encoders* de baixa resolução, assim como nas simulações, o *encoder* utilizado durante os experimentos possui apenas 38 furos. O conversor A/D usado na realização

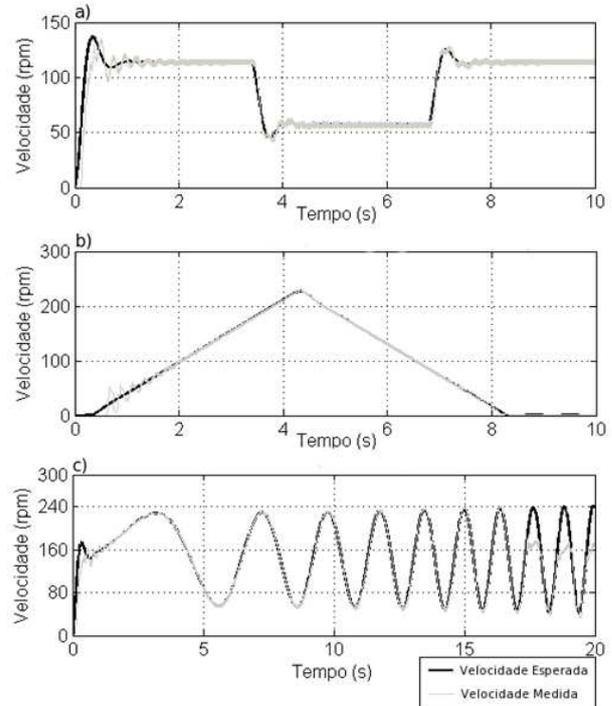


Figura 8: Resposta do motor, esperada e medida, utilizando o método proposto com um *encoder* de 38 furos para um excitação em: a) Onda quadrada; b) Onda triangular; c) Onda senoidal (Carvalho-Filho et al., 2008).

dos experimentos possui resolução de 10 *bits*.

As medições de velocidade angular obtidas pelo método proposto para cada uma das excitações consideradas e a resposta real do motor a cada uma delas são mostradas nas figuras 12, 13, 14, 15 e 16. A correlação entre a velocidade angular real do motor e a velocidade medida pelo método baseado em PLL foi utilizada como parâmetro para avaliar o sistema.

Como o sistema está apto a medir velocidade zero, o erro relativo médio não pode ser calculado segundo (8). Dessa forma, esse erro foi calculado usando a seguinte equação:

$$J = \frac{\sum_{n=1}^N |V_r(n) - V_M(n)|}{N(V_{max} - V_{min})} \quad (9)$$

Em que $V_r(n)$ é a n -ésima velocidade real do motor, $V_M(n)$ é a n -ésima velocidade medida, V_{max} e V_{min} são a maior e menor velocidades medidas pelo sistema, respectivamente e N é o número de pontos medidos.

A maior diferença de velocidades adotada ($V_{max} - V_{min}$) foi 1400 rpm, que corresponde à maior diferença de valores

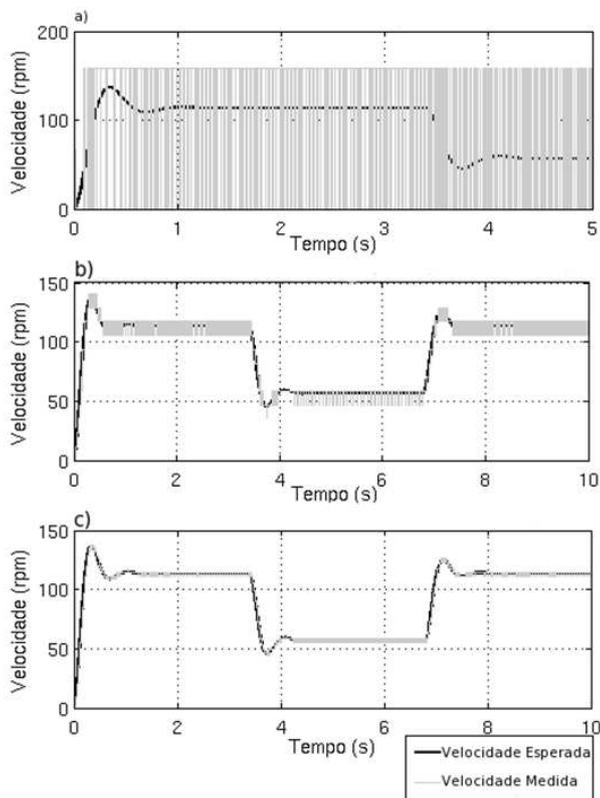


Figura 9: Resposta do motor, esperada e medida, para uma excitação em onda quadrada, utilizando o método M e um *encoder* de: a) 38 furos; b) 512 furos; c) 2048 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

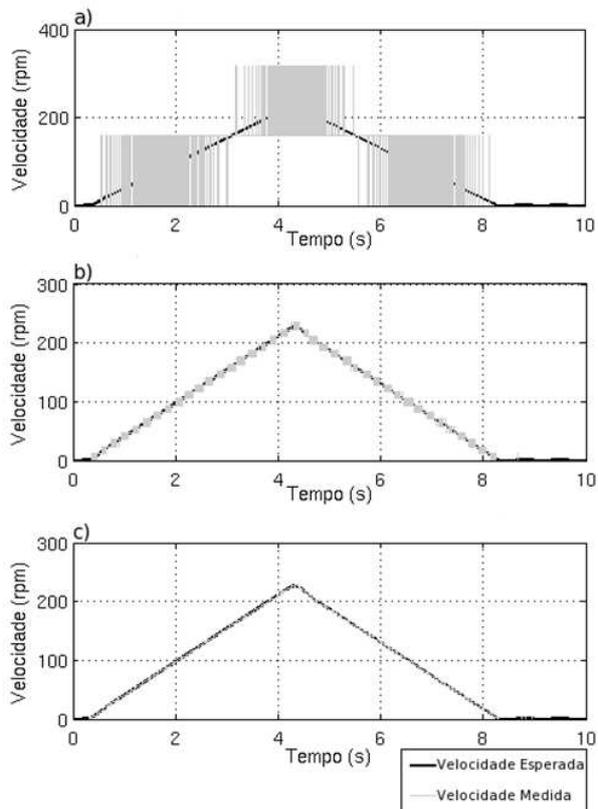


Figura 10: Resposta do motor, esperada e medida, para uma excitação em onda triangular, utilizando o método M e um *encoder* de: a) 38 furos; b) 512 furos; c) 2048 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

medidos durante todo o experimento.

Os valores obtidos de correlação e erro relativo médio para cada uma das excitações são apresentados na tabela 5.

Os resultados apresentados na tabela 5 demonstram que o sistema de medição proposto apresentou resultados bastante satisfatórios, obtendo valores de correlação próximos a “1” e erro relativo médio menor ou igual a 8% em todos os experimentos realizados.

6 CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentado um método de medição de velocidade angular baseado no uso de PLL. O sistema proposto é capaz de medir uma ampla faixa de velocidades angulares, o sentido do movimento do motor e a velocidade zero. Tal sistema foi implementado e vários experimentos foram realizados com o protótipo desenvolvido, obtendo-se bons e promissores resultados.

O sistema proposto possui baixo custo de implementação, é facilmente adaptado para medir a velocidade angular de qualquer motor (pois não depende do modelo), possui alta resolução e baixo tempo de resposta (ambos dependendo apenas do conversor A/D usado e do PLL).

A partir dos estudos realizados e dos resultados obtidos nos experimentos, verificou-se que as medições de velocidades angulares abaixo de $2\pi f_c$ são menos precisas, uma vez que a abordagem baseada em PLL não é a mais adequada para medir valores nesta faixa. Para solucionar este problema, foi proposta nesse trabalho uma fusão, baseada em uma média ponderada, entre o método *T* e o método baseado em PLL. Como a ponderação depende da medição corrente de velocidade, ruídos nesta variável podem afetar a precisão da medida. No entanto, nos experimentos realizados esse problema não foi verificado.

Para determinar o sentido de rotação do motor foi adicionado um segundo par emissor/receptor de infravermelho e um circuito lógico.

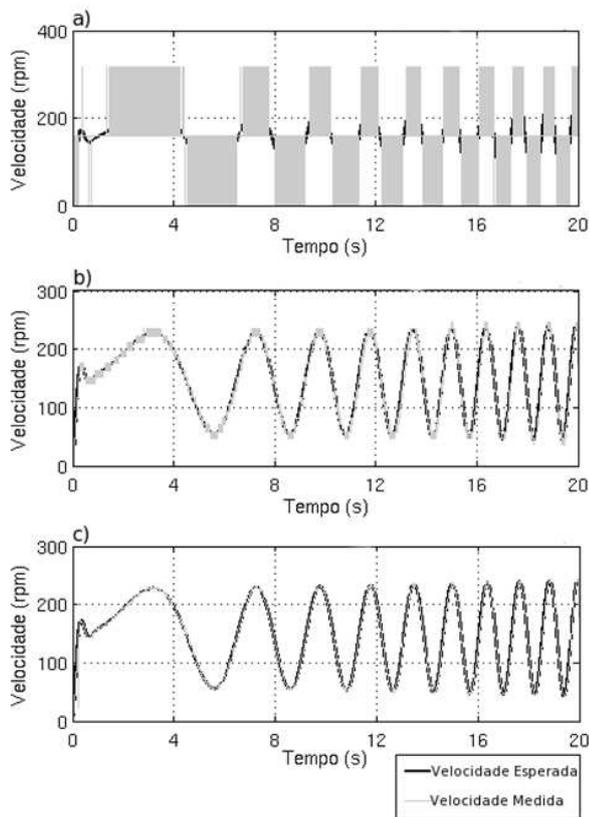


Figura 11: Resposta do motor, esperada e medida, para uma excitação em onda senoidal, utilizando o método M e um *encoder* de: a) 38 furos; b) 512 furos; c) 2048 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

Um problema importante observado durante os experimentos é que as imperfeições do *encoder* afetam mais o método proposto que o método *M*. O que ocorre é que, quando os furos do *encoder* não são regularmente espaçados, a frequência do sinal que chega ao *PLL* varia bastante e, caso essa variação seja maior que a suportada pelo sistema proposto ($f_{V_{max}}$), a medição feita pelo sistema torna-se menos precisa. Por outro lado, no caso do método *M*, este mesmo problema altera muito pouco a precisão da medida, uma vez que este método não mede diretamente a frequência do sinal e sim a quantidade de pulsos em um determinado período de tempo. No entanto, como o método proposto pode utilizar *encoders* de baixa resolução, e estes podem ser mais facilmente fabricados, dificilmente apresentam um espaçamento entre furos tão irregular a ponto de interferir de forma significativa na medição da velocidade angular.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Borenstein, J. e Feng, L. (1996). "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in

Tabela 2: Correlação e erro relativo médio, considerando os sistemas sob avaliação e a resposta do motor a uma onda quadrada (Carvalho-Filho et al., 2008).

Sistema	Número de furos	Correlação	Erro Relativo Médio (%)
<i>PLL</i>	38	0,9984	0,97
<i>M</i>	38	0,2804	78,51
<i>M</i>	128	0,7649	21,59
<i>M</i>	512	0,9798	4,65
<i>M</i>	1024	0,9940	2,82
<i>M</i>	2048	0,9985	1,31
<i>M</i>	4096	0,9993	0,80

Tabela 3: Correlação e erro relativo médio, considerando os sistemas sob avaliação e a resposta do motor a uma onda triangular (Carvalho-Filho et al., 2008).

Sistema	Número de furos	Correlação	Erro Relativo Médio (%)
<i>PLL</i>	38	0,9998	0,64
<i>M</i>	38	0,6498	38,47
<i>M</i>	128	0,9325	11,78
<i>M</i>	512	0,9949	2,91
<i>M</i>	1024	0,9987	1,49
<i>M</i>	2048	0,9997	0,74
<i>M</i>	4096	0,9999	0,50

Mobile Robots.", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, Outubro.

Capponi, F. G., De Donato, G., Del Ferraro, L., Honorati, O., Harke, M. C., e Lorenz, Robert D. (2006). "AC Brushless Drive With Low-Resolution Hall-Effect Sensors for Surface-Mounted PM Machines", *IEEE Transactions On Industry Applications*, VOL. 42, No. 2, P. 526 - 535.

Carvalho-Filho, J. G. N. e Carvalho, E. A. N. e Molina, L. e Freire, E. O. e Benedito, L. A. (2008). "High Resolution Analogical Measurement of the Angular Velocity of a Motor Using a Low Resolution Optical Encoder.", *Workshop Robocontrol'08*, Bauru, dezembro.

Carvalho-Filho, J. G. N. e Carvalho, E. A. N. e Molina, L. e Freire, E. O. e Freire, R. C. S. (2009). "Medição de Velocidade Angular Usando *PLL*: Medições de Alta Resolução Usando *Encoders* Ópticos de Baixa Resolução.", VIII SEMETRO – 8 Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. João Pessoa - PB.

Fiene, J. e Niemeyer, G. (2006). "Toward Switching Motor Control.", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.

Tabela 4: Correlação e erro relativo médio, considerando os sistemas sob avaliação e a resposta do motor a uma onda senoidal com frequência variável (Carvalho-Filho et al., 2008).

Sistema	Número de furos	Correlação	Erro Relativo Médio (%)
PLL	38	0,9988	1,54
M	38	0,6261	42,67
M	128	0,9472	10,23
M	512	0,9954	2,86
M	1024	0,9984	1,73
M	2048	0,9991	1,27
M	4096	0,9994	1,05

Tabela 5: Correlação e erro relativo médio entre a velocidade medida e a esperada.

Sistema de Controle	Correlação	Erro Relativo Médio (%)
Degrau	0,9126	5
Onda Quadrada (0,4 Hz)	0,9244	8
Onda Quadrada (0,08 Hz)	0,9435	6
Onda Triangular	0,9492	4
Onda Senoidal	0,9663	4

Kirianaki, N. V. e Yurish, S. Y. e Shpak, N. O. (2001). "Methods of dependent count for frequency measurements.", *Measurement*, Volume 29, Issue 1, pp. 31-50, ISSN 0263-2241.

Kirianaki, N. V., Yurish, S. Y. e Shpak, N. O. (2001). "Methods of dependent count for frequency measurements," *Measurement*, vol. 29, pp. 31-50.

Kurfess, T. R. e Hodgson, T. J. (2007). "Metrology, Sensors and Control". In: *Micromanufacturing*. Springer Netherlands. pp. 89-109.

Lakemeyr, G. e Nebel, B. (2002). "Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium". *Elsevier Science & Tecnology Books – Morgan Haufmann*, 1a Edição.

Matsui, N. e Shigyo, M. (1992). "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors.", *IEEE Transactions on Industry Applications*.

Nagatomi, H. e Ohnishi, K. (2006). "Acceleration Estimation Method for Motion Control System With Optical Encoder.", *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT*.

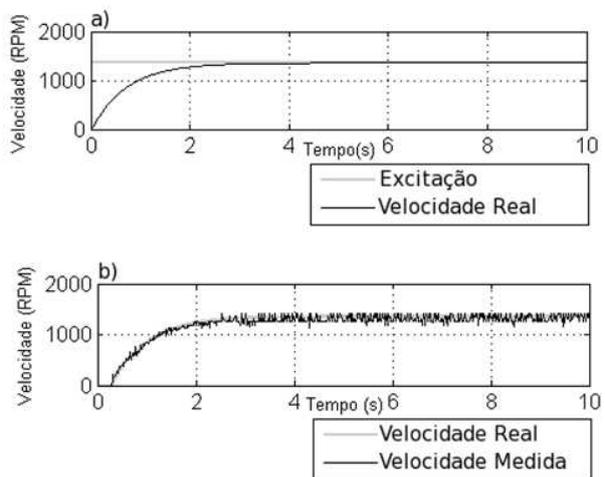


Figura 12: a) Resposta real do motor a uma excitação em degrau; b) Resposta real do motor e velocidade medida utilizando o método proposto e um *encoder* de 38 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

Ohmae, T. e Matsuda, T. e Kamiyama, K. e Tachikawa, M. (1982). "A Microprocessor-Controlled High-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives.", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 29, No. 3, pp. 207-211.

Petukhov, V. M., e Pruglov, F. G. (1984). "Linear and Angular Velocity Measurement for Effector Units". In: *Measurement Techniques*. Vol. 27, No. 4. pp. 325-327.

Secchi, H. A. (1998). "Control de Vehículos Autoguiados con Realimentación Sensorial.", *Masters Thesis*. National University of San Juan.

Tsugi, T. e Kobayshy, H. (2007). "Robust Acceleration Control Based on Acceleration Measurement.", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*.

Tsugi, T. e Mizuochi, M. (2005). "A velocity Measurement Method for Acceleration Control.", *31st Annual Conference of IEEE, Industrial Electronics Society, IECON*.

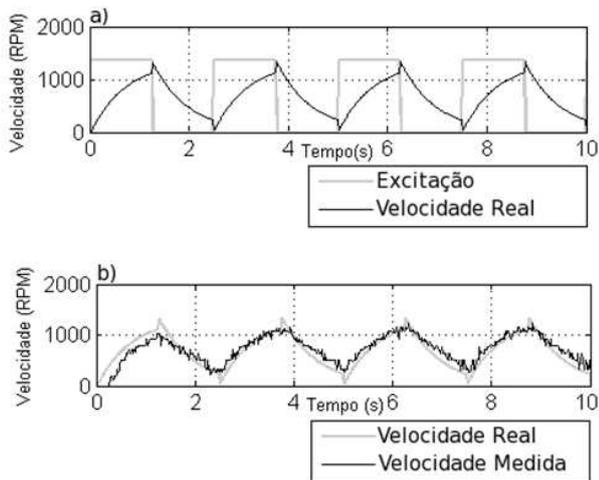


Figura 13: a) Resposta real do motor a uma excitação em onda quadrada de 0,4 Hz; b) Resposta real do motor e velocidade medida utilizando o método proposto e um *encoder* de 38 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

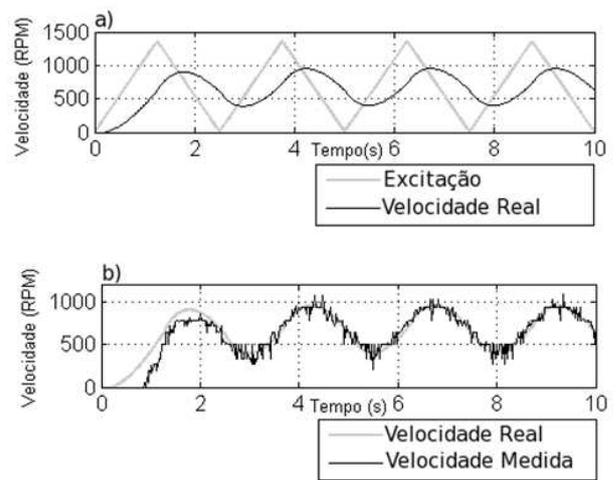


Figura 15: a) Resposta real do motor a uma excitação em onda triangular; b) Resposta real do motor e velocidade medida utilizando o método proposto e um *encoder* de 38 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

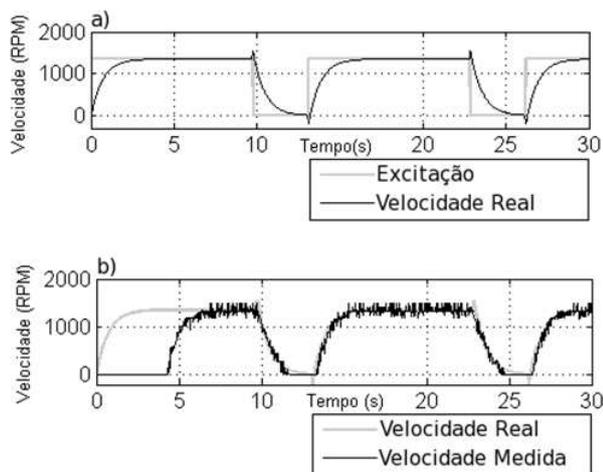


Figura 14: a) Resposta real do motor a uma excitação em onda quadrada de 0,08 Hz; b) Resposta real do motor e velocidade medida utilizando o método proposto e um *encoder* de 38 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).

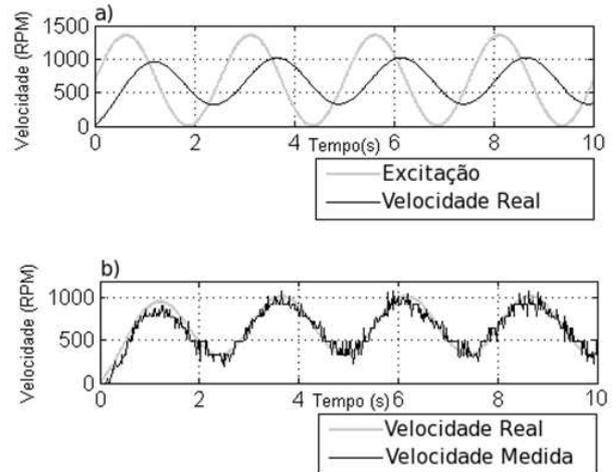


Figura 16: a) Resposta real do motor a uma excitação em onda senoidal; b) Resposta real do motor e velocidade medida utilizando o método proposto e um *encoder* de 38 furos (Carvalho-Filho et al., 2008).