



Medição de Velocidade Angular Usando PLL: Medidas de Alta Resolução Usando Encoders de Baixa Resolução

José G. N. de Carvalho Filho¹, Elyson A. N. Carvalho^{1,2}, Lucas Molina^{1,3}, Eduardo O. Freire¹ e Raimundo C. Silvério Freire²

¹ Núcleo de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe – NEL/UFS, São Cristóvão-SE, Brasil,
j.gilmar@click21.com.br; ecarvalho@ufs.br; lmolina@ufs.br; efreire@ufs.br

² Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – DEE/UFCG, Brasil, rcsfreire@ufcg.edu.br

³ COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ Rio de Janeiro-RJ, Brasil

Resumo: Neste artigo é apresentada uma visão geral sobre os métodos clássicos de medição de velocidade angular, bem como é proposto um sistema de medição de velocidade usando PLL. Também são apresentados uma análise do método proposto do ponto de vista metrológico, os resultados teóricos e experimentais obtidos e um estudo detalhado dos problemas do método proposto.

Palavras chave: medição de velocidade angular, *encoders* ópticos, PLL, odometria.

1. INTRODUÇÃO

Uma das áreas de bastante interesse da metrologia é a da medição de velocidade, sendo necessária em muitas das aplicações de automação, controle, instrumentação eletrônica, etc. Todavia, neste artigo serão abordados apenas métodos para medição de velocidade angular de motores utilizando *encoders* ópticos.

Nestes métodos utiliza-se um disco acoplado ao eixo do motor e um par emissor/receptor infravermelhos. O disco contém perfurações que permitem que os feixes de luz infravermelha passem. Como o eixo do motor gira, a luz infravermelha é bloqueada e não bloqueada sequencialmente, resultando em uma onda quadrada com frequência proporcional à velocidade do rotor.

Os métodos de medição de velocidade baseados no uso de *encoders* ópticos são amplamente utilizados, sobretudo por serem, em geral, de baixo custo e fácil implementação. Porém, estes métodos possuem alguns problemas em comum, tais como a necessidade de *encoders* de alta resolução, a relação de dependência entre a exatidão e precisão da medida e a velocidade do rotor, etc[1][2].

Apesar destes problemas, os métodos baseados em *encoders* ópticos possuem grande aplicação em áreas de tecnologia de ponta, como a robótica. Nesta área, sua principal aplicação é em odometria, onde estes métodos são utilizados para estimar o deslocamento de um robô móvel, por exemplo. Como em odometria a informação de

velocidade é integrada a fim de determinar o deslocamento, o erro inerente a cada medição de velocidade é acumulado[1][2].

Para diminuir o erro na medição da velocidade e, conseqüentemente na medição do deslocamento são utilizados, em geral, *encoders* de alta resolução, o que acaba aumentando significativamente o custo de implementação destes métodos.

Neste artigo são apresentados resultados teóricos e experimentais de um sistema de medição de velocidade angular baseado em PLL, além de um estudo detalhado dos problemas relativos à medição da velocidade zero e à detecção de inversão o sentido de rotação, apontados previamente em [1].

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*. Os mais comuns são: Método M [6], Método T [6], Método M/T [6] e o Método S [5-6].

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). A partir de m_e e T_s é possível calcular a velocidade angular do rotor [6]. Este método 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 . Então, em baixas velocidades, a exatidão da medição é deteriorada.

No método T, o tempo entre dois pulsos (T_e) é medido e a velocidade do rotor é calculada a partir de T_e e do deslocamento angular do rotor durante T_e [6]. Assim como o método M, o T também é de fácil implementação e não necessita do modelo do motor. Por outro lado, a exatidão da medição e o tempo de resposta são inversamente dependentes da velocidade angular do motor.

O método M/T resulta da combinação dos métodos M e T. Neste método, adota-se um limiar para dividir a faixa de velocidades em outras duas (baixas e altas velocidades).

Quando a velocidade que está sendo medida está na faixa das baixas velocidades, o método M/T usa a mesma abordagem utilizada pelo T para medir a velocidade, e quando a velocidade está na faixa das altas velocidades, este método usa a mesma abordagem utilizada pelo M [6]. 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 T. No entanto, para aumentar a faixa de velocidades em que pode ser aplicado, a curva de velocidade é segmentada e então calcula-se a velocidade em cada segmento como se tivesse começado a partir do zero. A velocidade real é dada pela soma da velocidade relativa ao segmento com a velocidade máxima de cada segmento anterior. Dessa forma, a exatidão obtida em baixas velocidades é estendida para outras mais altas. Porém, ainda há dependência entre a exatidão, a o tempo de resposta e a velocidade angular do motor [5-6].

3. MÉTODO PROPOSTO

Em [1] foi proposto um sistema analógico para medição da velocidade angular de um motor usando *encoders* ópticos de baixa resolução e foram apresentados os resultados de vários experimentos feitos por simulação com este sistema. Na Fig. 1 é mostrado o esquema do método proposto.

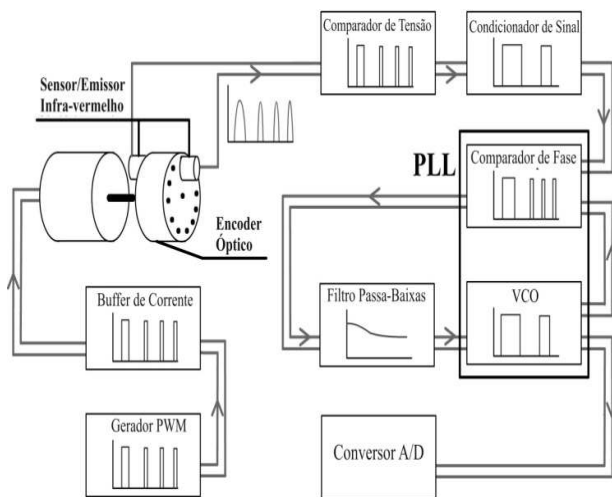


Fig. 1: O método Proposto

Neste sistema, um PLL (*phase-locked loop*) 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 de 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 frequência angular do *encoder*.

Uma vez que foi gerado um nível de tensão proporcional à frequência do sinal de saída do *encoder*, pode ser utilizado um conversor A/D para converter este nível de tensão analógico em um sinal digital.

No sistema proposto é utilizado um filtro passa-baixas, o qual deve promover 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 a relação apresentada na eq. 1

$$f_{vmax} < f_c < f_{emin} \quad (1)$$

As frequências f_{vmax} e f_{emin} são a frequência máxima de variação e a menor frequência do sinal de saída do *encoder*, respectivamente. Essas frequências limites são mostradas na Fig. 2.

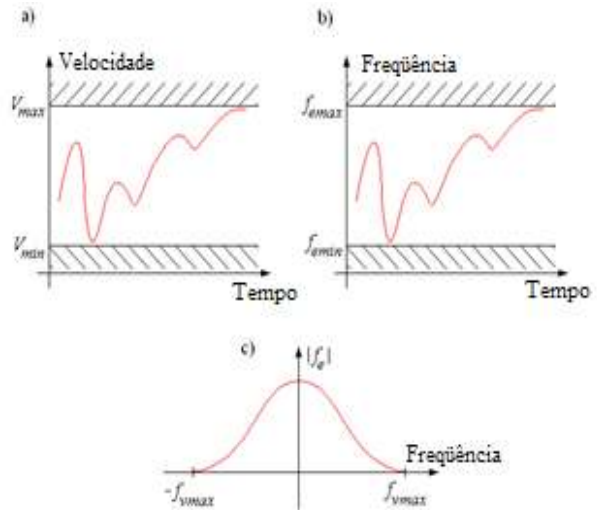


Fig. 2. a) Limites de velocidade do motor b) Limites de frequência da saída do *encoder* c) Limites da variação de frequência do *encoder*.

Na Fig.2.c é apresentada a frequência máxima de variação, a qual representa a maior componente de frequência do espectro de amplitude do sinal f_e , que correspondente à variação da frequência do *encoder* no tempo (aceleração máxima do motor admitida). A frequência f_{vmax} é calculada usando os parâmetros do modelo cinemático do motor.

De eq.1 nota-se que o sistema não está apto a medir as velocidades angulares entre $2\pi f_c$ e zero, uma vez que estas velocidades não atendem à eq. 1.

Para solucionar este problema, o método T (adequado para medição de baixas velocidades) foi incorporado ao método proposto de forma que a velocidade medida é 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 fig. 3.

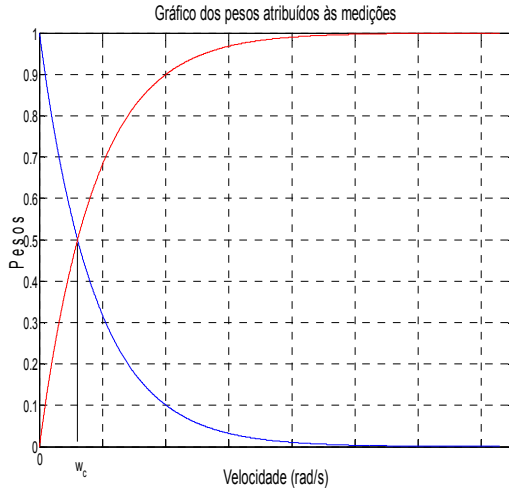


Fig. 3. Peso dado às medições do método proposto (vermelho) e peso dado às medições do método T (azul)

Na fig. 3, $w_c = 2\pi f_c$, onde f_c é a frequência de corte do filtro utilizado.

O cálculo da velocidade é feito a partir da equação eq.2:

$$V = \frac{P_P \times V_P + P_T \times V_T}{P_P + P_T} \quad (2)$$

Onde 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 a velocidade medida pelo método proposto e P_T é a velocidade medida pelo método T.

Optou-se por usar o método T em conjunto com o proposto pelo fato de o T ser de fácil implementação e por funcionar bem para baixas velocidades.

Em [1] também é mencionado o fato de o sistema proposto não detectar o sentido da rotação do motor. Para solucionar este problema foi proposta a utilização de um segundo par de emissor/receptor infravermelhos e de um circuito lógico para detectar o sentido da rotação. Na Fig.4 são mostradas as saídas do *encoder* e o circuito utilizado para detectar o sentido de rotação.

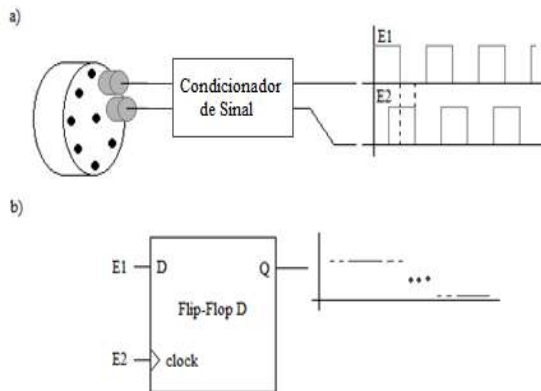


Fig. 4. a) *Encoder* com o segundo par de emissor/receptor infra-vermelhos
b) Circuito utilizado para detectar o sentido da rotação

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 (caso mostrado na figura 4.a) e nível lógico “0” quando ocorre o oposto. Desta forma, é possível saber o sentido de rotação do rotor através do sinal de saída de Q.

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

4. MODELAGEM DO MOTOR/ENCODER

A dinâmica de funcionamento do conjunto motor/*encoder* foi modelada de modo a fornecer um parâmetro de comparação para os resultados obtidos com o sistema proposto.

Para modelar o conjunto motor/*encoder*, mediu-se a resposta deste conjunto a uma entrada degrau a partir dos métodos M e T.

Como o método T é indicado para medir baixas velocidades e o M para altas velocidades, foram dados pesos diferentes às medições de cada método. Esses pesos são mostrados na Fig.5.

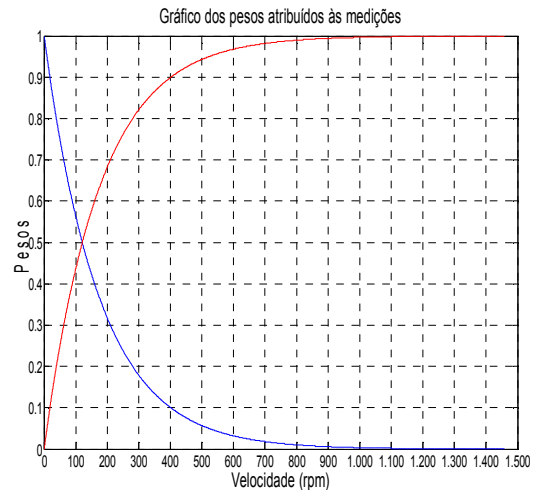


Fig. 5. Peso dado às medições do método M (vermelho) e peso dado às medições do método T (azul)

Na Fig.5 são mostrados os gráficos dos pesos dados às medições de cada um dos métodos em função da velocidade medida. Em vermelho está o gráfico do peso dado às medições do método M (P_M) e em azul o peso dado ao T (P_T).

O cálculo da velocidade foi feito a partir de eq.3:

$$V = \frac{P_M \times V_M + P_T \times V_T}{P_M + P_T} \quad (3)$$

Onde V é a velocidade estimada a partir das duas medições; V_M é a velocidade medida pelo método M e V_T é a velocidade medida pelo método T.

Foram realizados vários ensaios de medição da velocidade do conjunto motor/*encoder* e o gráfico da velocidade média medida nos ensaios é mostrado na Fig.6.

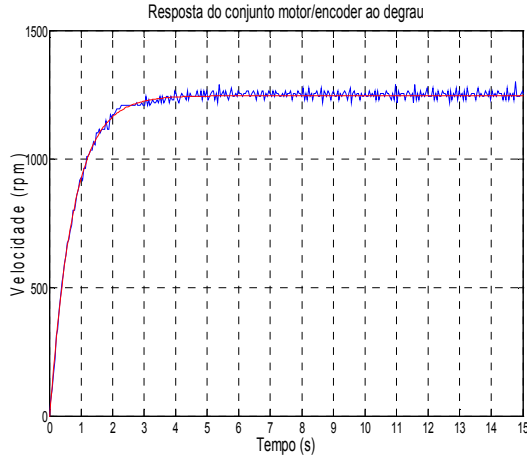


Fig. 6. Resposta média ao degrau

A partir do gráfico de velocidade versus tempo obtido, a dinâmica do conjunto motor/encoder foi modelada por uma função de transferência de primeira ordem, a qual é mostrada na equação 4:

$$V(S) = \frac{-198,2S + 1894,4}{S + 1.3984} \quad (4)$$

5. RESULTADOS

Depois de obtido o modelo do sistema cuja velocidade está sendo medida, foi desenvolvido um protótipo do sistema de medição de velocidade angular proposto.

Foram realizados vários experimentos com este protótipo a fim de obter as respostas deste sistema a três diferentes tipos de entrada. Estas entradas foram: Um degrau, duas ondas quadradas com frequências diferentes, uma onda triangular e uma onda senoidal. Cada uma destas entradas representa um sinal de controle de velocidade, enviado ao motor por um algum sistema de controle hipotético.

Na fig. 7 são mostrados cada um dos sinais de controle usados e a resposta do modelo do conjunto motor/encoder a estes sinais.

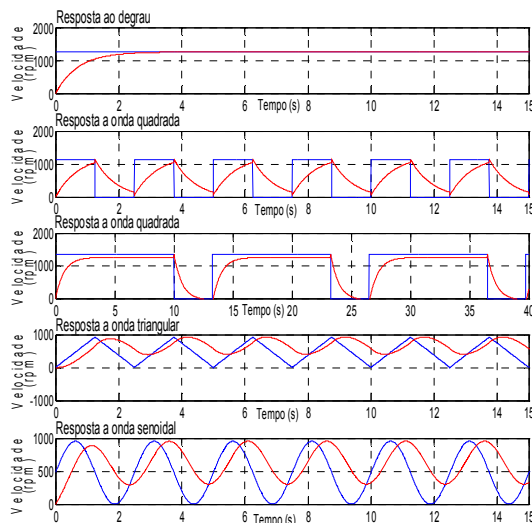


Fig. 7. Sinal de controle (azul) e velocidade "real" do rotor (vermelho)

Para ilustrar a alta resolução obtida pelo método proposto quando são utilizados *encoders* de baixa resolução, o *encoder* utilizado durante os experimentos possui apenas 38 furos.

Encoders de baixa resolução são facilmente encontrados, devido ao seu baixo custo e fácil fabricação. Uma das principais aplicações de *encoders* de baixa resolução é na fabricação de *mouses*. Em robótica, o uso de *encoders* de baixa resolução é muito limitado devido ao fato de que muitos dos métodos utilizados para medição de velocidade são extremamente dependentes da resolução do *encoder*.

Na Fig. 8 são apresentados cada um dos sinais de controle utilizados e a sua respectiva medição de velocidade, realizada usando a abordagem proposta.

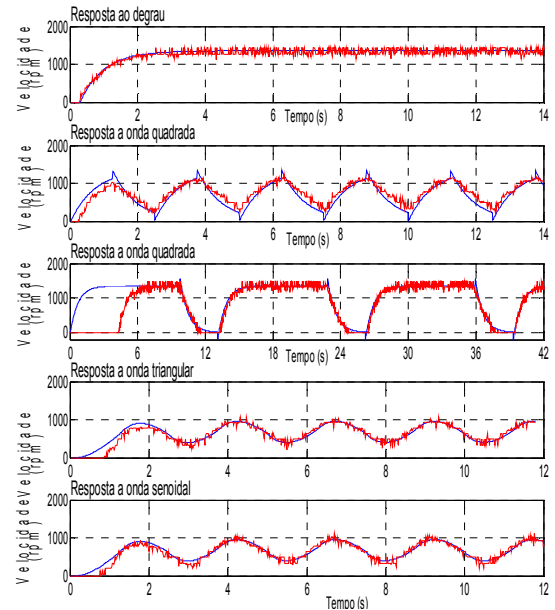


Fig. 8. Velocidade "Real" (azul) e velocidade medida pelo método proposto (vermelho)

A correlação entre a velocidade angular "real" do motor, obtida através do modelo do conjunto motor/encoder, e a velocidade medida pelo protótipo foi utilizada como parâmetro para avaliar o sistema.

Outro parâmetro que foi utilizado o erro absoluto percentual, o qual foi obtido pela eq. 5.

$$J = \frac{\sum_{n=1}^N |V_r(n) - V_M(n)|}{N * (V_{Max} - V_{Min})} \quad (5)$$

Onde V_r é a velocidade real do motor, V_M é a velocidade medida, V_{Max} é a maior velocidade que o sistema pode medir, V_{Min} é a menor velocidade que o sistema pode medir e N é o número de pontos medidos.

O valor de $(V_{Max} - V_{Min})$ adotado foi 1400 rpm, que corresponde a maior diferença de valores medidos durante todo o experimento.

Os valores obtidos para tais parâmetros são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Correlação entre a velocidade medida e a esperada e erro J .

Sinal de Controle	Correlação	J (%)
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

6. CONCLUSÃO

O artigo é focado na análise do método de medição de velocidade proposto em [1]. Este método foi aperfeiçoado, de forma que fosse possível medir toda a faixa de velocidade e o sentido do movimento do motor, e implementado em um protótipo. Vários experimentos foram realizados com este protótipo e foram obtidos bons e promissores resultados.

O sistema proposto possui um baixo custo de implementação e pode ser facilmente adaptado para medir a velocidade angular de qualquer motor, sendo necessário apenas o ajuste dos valores de alguns resistores e capacitores, uma vez que não é necessário conhecer o modelo do motor.

Em [1] é apontada uma importante desvantagem do método, que é o fato de ele não medir a velocidade zero.

A partir dos estudos realizados e dos resultados obtidos nos experimentos, percebeu-se que o sistema é capaz de detectar a velocidade zero, porém os valores de velocidades medidos entre $2\pi f_c$ e zero possuem uma grande imprecisão, uma vez que o sistema não é apto a medir este intervalo de velocidade. Como esse é um caso isolado, pode ser detectado e tratado por outra abordagem. Neste artigo foi proposto o uso do método T em conjunto com o método proposto como solução para este problema.

Outro problema apontado em [1] é o fato de o método não determinar o sentido da rotação do rotor. No protótipo desenvolvido foi incorporado outro par de emissor/receptor infravermelhos e o circuito apresentado em Fig. 4.b.

Durante os experimentos verificou-se que as soluções propostas para ambos os problemas foram mais que satisfatórias, de forma que não foi necessário buscar outro método para determinar o sentido de rotação.

Um problema importante observado durante os experimentos é que as imperfeições do *encoder* afetam mais o método proposto que os clássicos, tal como 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_{vmax}), a medição feita pelo sistema torna-se pouco 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.

Vale ressaltar que o método T também é suscetível a este problema e que, assim como o sistema proposto, pode ser utilizado com *encoders* de baixa resolução. Estes por sua

vez, por serem de fácil fabricação, dificilmente apresentam um espaçamento entre furos tão irregular a ponto de interferir de forma significativa na medição do sistema proposto.

Trabalhos futuros consistem na realização de experimentos usando um protótipo a bordo de um robô móvel.

REFERÊNCIAS

- [1] Carvalho-Filho, J. G. N.; Carvalho, E. A. N.; Molina, L.; Freire, E. O.; Luciano, Benedito, L. A.. "High Resolution Analogical Measurement of the Angular Velocity of a Motor Using a Low Resolution Optical Encoder". Workshop Robocontrol'08. Bauru, dezembro de 2008.
- [2] J. Borenstein e L. Feng, "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, Outubro, 1996.
- [3] G. Lakemeyr e B. Nebel. "Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium," Elsevier Science & Technology Books – Morgan Kaufmann, Primeira Edição, 2002.
- [4] H. Nagatomi e K. Ohnishi. "Acceleration Estimation Method for Motion Control System With Optical Encoder," IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT, 2006.
- [5] T. Tsugi e H. Kobayshy. "Robust Acceleration Control Based on Acceleration Measurement," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, 2007.
- [6] T. Tsugi e M. Mizuochi. "A velocity Measurement Method for Acceleration Control," 31st Annual Conference of IEEE, Industrial Electronics Society, IECON 2005.
- [7] J. Fiene and G. Niemeyer. "Toward Switching Motor Control," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006.
- [8] N. Matsui and M. Shigyo. "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors," IEEE Transactions on Industry Applications. 1992.
- [9] H. A. Secchi. "Control de Vehículos Autoguiados con Realimentación Sensorial," Masters Thesis. National University of San Juan. 1998.