

CONTROLE IMPLEMENTADO EM DSP PARA CADEIRA DE RODAS ACIONADA POR SOPRO E SUÇÃO

EDNO GENTILHO JUNIOR*, JULIO E. A. ROSA FILHO*, ANDERSON R. BIAZETO*, MÁRCIO R. COVACIC*, APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO†, MARCELO C. M. TEIXEIRA†, MARCELO AUGUSTO SANCHES‡, RENAN F. KOZAN†, MARCOS V. N. JUNQUEIRA†, RUBERLEI GAINO*

*Rod. Celso Garcia Cid, Pr 445 Km 380, 86057-970

Laboratório de controle Avançado, Robótica e Engenharia Biomédica, Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Estadual de Londrina Centro de Tecnologia e Urbanismo Londrina, Paraná, Brasil

†Av. Brasil, 56, 15385-000

Laboratório de Pesquisa em Controle, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" Campus Ilha Solteira Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

‡Rua Francisco Braga, 414, 16050-560

Unioleto: Campus Universitário Araçatuba, São Paulo, Brasil

Emails: edno.gentilho@hotmail.com, julio.estefano@yahoo.com.br, anderson_biazeto@hotmail.com, marciocovacic@yahoo.com.br, aac@dee.feis.unesp.br, marcelo@dee.feis.unesp.br, sanches840@yahoo.com.br, renankozan@hotmail.com, marcosvnj@yahoo.com.br, ruberlei.gaino@gmail.com

Abstract— This paper proposes the implementation in Digital Signal Processor (DSP) of a control system for wheelchair, using PID control for engines and an interface by blowing and sucking air to the user directing it. A mathematical analysis, simulation software and control system implementation in the prototype were made.

Keywords— DSP, wheelchair, PID

Resumo— Este artigo propõe a implementação em Processador Digital de Sinais (DSP) de um sistema de controle para cadeira de rodas, utilizando controle PID para os motores e uma interface por sopro e sucção de ar para o usuário dirigi-la. Uma análise matemática, simulação em software do sistema de controle e implementação em protótipo foram realizadas.

Palavras-chave— DSP, cadeira de rodas, PID

1 Introdução

Com o grande interesse de muitas organizações em desenvolver cadeiras de rodas que possam suprir as necessidades de locomoção de pessoas com alguma deficiência física, torna-se muito interessante o estudo de um controle para uma cadeira controlada por sopro e sucção para ajudar pessoas que por algum motivo não podem dirigi-la por um comando manual (Mazo et al., 1995), (Sobrinho et al., 2003) e (Espinosa et al., 2001). O usuário pode dirigir a cadeira através de comandos de sopros ou sucções em um sensor de fluxo de ar localizado próximo à boca. A cadeira possui 2 rodas dianteiras livres e 2 rodas traseiras ligadas aos motores de corrente contínua que são equipados com sensores do tipo encoder para medição de velocidade de rotação. Os sensores encoder são responsáveis por ler e enviar a velocidade dos motores para o controlador, que mantém a estabilidade sistema, controlando a velocidade da cadeira. A lógica de acionamento do sensor de fluxo (Sobrinho et al., 2003) e o projeto do controle de motores baseado em (Teixeira et al., 2007) foi implementado

em um Processador Digital de Sinais (DSP) *Texas Instruments* e os resultados podem ser vistos nos gráficos da seção 5.3.

2 Modelo Matemático Linear da Cadeira de Rodas

Um modelo mecânico eficiente é necessário para se obter um controle eficaz. A figura 1 mostra um modelo mecânico simplificado da cadeira de rodas que pode ser usado, nele é possível obter as velocidades linear (V) e angular (Ω). R é o raio das rodas motorizadas, D a distância entre elas e "u" é a posição instantânea da cadeira (Sobrinho et al., 2003), dado a relação

$$\frac{du}{dt} = V$$

, então:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{R}{D} \int_0^t (\omega_l - \omega_r) dt \quad (1)$$

$$V = \frac{du}{dt} = \frac{R}{2} (\omega_l + \omega_r) \quad (2)$$

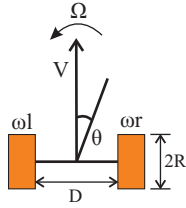


Figura 1: Modelo linear da cadeira

A velocidades linear e angular da cadeira são dadas por (3) e (4) respectivamente:

$$V = \frac{R}{2}(\omega_l + \omega_r) \quad (3)$$

$$\Omega = \frac{R}{D}(\omega_l - \omega_r) \quad (4)$$

Essas expressões são mostradas graficamente na Figura 2:

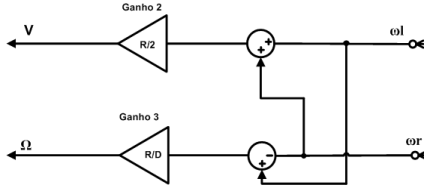


Figura 2: V e Ω em função de ω_l e ω_r.

2.1 Sistema de Controle Proposto

A figura 3 adaptada de Mazo et al. (1995) mostra as variáveis do sistema de controle, V e Ω são as velocidades linear e angular respectivamente da cadeira.

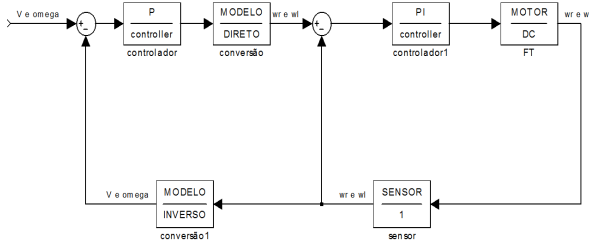


Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de controle

O bloco “modelo direto” converte V e Ω em ω_l e ω_r, conforme a equação 5. O bloco “modelo inverso” converte ω_l e ω_r em V e Ω, conforme a equação 6.

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{D}{2R} \\ \frac{1}{R} & -\frac{D}{2R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{D} & \frac{-R}{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para o motor DC assumiu-se uma função de transferência simplificada onde ω é a velocidade angular, V é a tensão de armadura, K é o ganho, T é a constante de tempo do motor e m a relação entre o eixo do motor e da roda, tem-se então:

$$H(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K.m}{T.s + 1} \quad (7)$$

A Figura 4, mostra o diagrama de blocos completo:

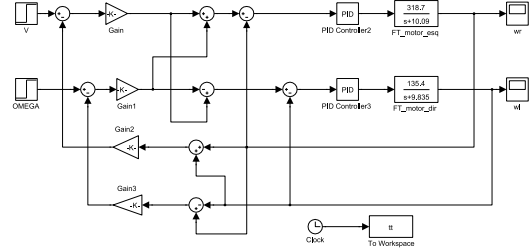


Figura 4: Diagrama de blocos do acionamento da cadeira

3 Ação do controle dos motores da cadeira de rodas

Em (Teixeira et al., 2007), foi descrito um programa desenvolvido em Matlab para determinar a faixa de valores de k que torna estável com um controlador proporcional k e realimentação negativa. Neste caso, o polinômio característico d(s, k) é o denominador da função de transferência de malha fechada. Este programa também determina a região de estabilidade de um sistema com um controlador PID, proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), entre outros.

3.1 Estabilidade de Polinômios com Dependência Polinomial

A estabilidade é um item muito importante em um projeto de sistema de controle. Considere um sistema linear invariante no tempo, cujo polinômio característico d(s, k) é dado por:

$$d(s, k) = d_n(k)s^n + \dots + d_1(k)s + d_0(k), \quad (8)$$

sendo d_n(k), d_(n-1)(k), ..., d₁(k) e d₀(k) polinômios em k, como descrito abaixo:

$$d_i(k) = d_{ib_i}k^{b_i} + \dots + d_{i1}k + d_{i0}, \quad (9)$$

para i = 0, ..., n, sendo b_i o grau do coeficiente d_i(k).

O sistema é estável se e somente se todas as raízes do polinômio característico d(s, k), apresentado em (8), tiverem parte real negativa. O Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz é uma ferramenta útil para determinar se o sistema é estável (Teixeira et al., 2007). Considere a Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de Routh.

linha n	s^n	$a_{n1}(k) = \frac{p_{n1}(k)}{q_n(k)}$	$a_{n2}(k) = \frac{p_{n2}(k)}{q_n(k)}$	$a_{n3}(k) = \frac{p_{n3}(k)}{q_n(k)}$	\dots
linha $(n-1)$	s^{n-1}	$a_{(n-1)1}(k) = \frac{p_{(n-1)1}(k)}{q_{(n-1)}(k)}$	$a_{(n-1)2}(k) = \frac{p_{(n-1)2}(k)}{q_{(n-1)}(k)}$	$a_{(n-1)3}(k) = \frac{p_{(n-1)3}(k)}{q_{(n-1)}(k)}$	\dots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
linha 2	s^2	$a_{21}(k) = \frac{p_{21}(k)}{q_2(k)}$	$a_{22}(k) = \frac{p_{22}(k)}{q_2(k)}$		
linha 1	s^1	$a_{11}(k) = \frac{p_{11}(k)}{q_1(k)}$			
linha 0	s^0	$a_{01}(k) = \frac{p_{01}(k)}{q_0(k)}$			

Os termos da linha n são dados por $a_{n1}(k)$, $a_{n2}(k)$, \dots , sendo:

$$p_{n1}(k) = d_n(k), \quad p_{n2}(k) = d_{(n-2)}(k), \quad \dots$$

$$q_n(k) = 1. \quad (10)$$

Os termos da linha $(n-1)$ são dados por $a_{(n-1)1}(k)$, $a_{(n-1)2}(k)$, \dots , sendo:

$$p_{(n-1)1}(k) = d_{(n-1)}(k), \quad p_{(n-1)2}(k) = d_{(n-3)}(k), \quad \dots$$

$$q_{(n-1)}(k) = 1. \quad (11)$$

Os termos da linha j , $j = n-2, \dots, 1, 0$, são dados por $a_{ji}(k) = p_{ji}(k)/q_j(k)$, sendo:

$$p_{ji}(k) = p_{(j+1)1}(k)p_{(j+2)(i+1)}(k) - p_{(j+2)1}(k)p_{(j+1)(i+1)}(k),$$

$$q_j(k) = q_{(j+2)}(k)p_{(j+1)1}(k), \quad (12)$$

$$j = n-2, n-1, \dots, 1, 0, \quad i = 1, 2, \dots$$

Os elementos não-nulos $p_{ji}(k)$ e $q_j(k)$, $j = n, n-1, \dots, 1, 0$, $i = 1, 2, \dots$, são polinômios em k . De acordo com o Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz, o polinômio $d(s, k)$ é Hurwitz para um dado valor de $k = k_o$, isto é, todas as raízes de $d(s, k_o)$ têm parte real negativa, se e somente se todos os elementos da primeira coluna da tabela de Routh apresentam o mesmo sinal.

3.2 Estabilidade de Sistemas com Realimentação Estática da Saída

Considere uma planta controlável e observável, $G_{ol}(s) = n(s)/d(s)$, com:

$$n(s) = n_n s^n + n_{(n-1)} s^{n-1} + \dots + n_1 s + n_0, \quad (13)$$

$$d(s) = d_n s^n + d_{(n-1)} s^{n-1} + \dots + d_1 s + d_0 \quad (14)$$

e $d_n \neq 0$.

É proposto o seguinte problema: determine a faixa de valores de k , se existirem, tais que o sistema realimentado da Fig. 5, com $G_c(s) = k$, é estável, utilizando o Critério de Estabilidade de Routh.

A função de transferência do sistema de malha fechada $G_{cl}(s)$ é dada por:

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{kG_{ol}(s)}{1 + kG_{ol}(s)} = \frac{kn(s)}{d(s) + kn(s)}. \quad (15)$$

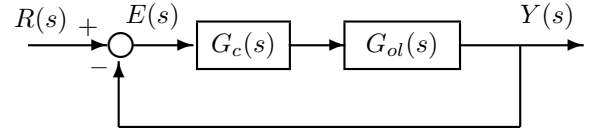


Figura 5: Sistema realimentado com controlador $G_c(s)$.

Os pólos do sistema são as raízes do polinômio característico $d(s, k) = d(s) + kn(s)$. Substituindo (13) e (14) em (15), obtém-se o polinômio característico do sistema de malha fechada. Assim, por meio do Critério de Estabilidade de Routh, podem-se obter os valores de k tais que todas as raízes do polinômio característico $d(s, k)$ tenham parte real negativa, caso existam.

3.3 Estabilidade de Sistemas com Controladores PID e PI

Para o desenvolvimento do projeto, o primeiro passo é escolher o tipo de controlador a ser usado. Dentre os vários tipos de controladores existentes, o Proporcional-Integral-Derivativo (PID) mostra-se muito eficaz para esse tipo de controle, haja vista que a sua baixa complexidade deixa o sistema com menor custo.

A ação de controle de um controlador PID é baseada na combinação dos três controladores: controle proporcional, controle integral e controle derivativo, mantendo sempre as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle. O controle PID é definido por (Ogata, 2010):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (16)$$

A função de transferência de um controlador PID é dada por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s.$$

Um controlador PID possui um pólo em $s = 0$ e dois zeros, cujas posições dependem de K_p , K_i e K_d , que são ajustáveis. Para a implementação do controlador PID, é necessário determinar, para um dado processo, os ganhos proporcional, integral e derivativo.

Considere o sistema realimentado na Fig. 5, sendo $G_c(s)$ um controlador PID. A função

de transferência do sistema de malha fechada $G_{cl}(s) = Y(s)/R(s)$ é dada por:

$$G_{cl}(s) = \frac{(K_p s + K_i + K_d s^2)n(s)}{sd(s) + (K_p s + K_i + K_d s^2)n(s)}.$$

Os pólos do sistema são as raízes do polinômio característico $r(s, K_p, K_i, K_d) = sd(s) + (K_p s + K_i + K_d s^2)n(s)$.

Um caso particular de controlador PID é o controlador PI, que é obtido a partir do controlador PID, com $K_d = 0$. O controlador PI é descrito por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

e a função de transferência do sistema de malha fechada $G_{cl}(s)$ é dada por:

$$G_{cl}(s) = \frac{(K_p s + K_i)n(s)}{sd(s) + (K_p s + K_i)n(s)}.$$

Os pólos do sistema são as raízes do polinômio característico $r(s, K_p, K_i) = sd(s) + (K_p s + K_i)n(s)$.

Para o controlador PID, fixando-se os valores de dois parâmetros (por exemplo, K_i e K_d), é possível determinar a faixa de estabilidade do terceiro parâmetro (no caso, K_p), utilizando-se o Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz. Atribuindo-se, então, um conjunto de valores, definido por um valor inicial, um valor final e um valor de incremento, para cada um dos dois parâmetros fixos, pode-se obter um esboço da região de estabilidade do sistema da Fig. 5 realimentado com um controlador PID.

Para o controlador PI, a análise da estabilidade é obtida fixando-se um dos dois parâmetros e determinando-se a faixa de estabilidade do segundo parâmetro, através do Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz.

4 Identificação da Função de Transferência dos Motores

A área do conhecimento que determina modelos matemáticos a partir de dados captados de sistemas dinâmicos chama-se identificação de sistemas (Aguirre, 2004) e (Ljung, 1987).

Com base nos princípios de identificação foi feito um modelo matemático para cada motor corrente contínua da cadeira de rodas. Para a coleta de dados foi utilizado o software *LabView*, que apresenta ferramentas de aquisição de dados. A aquisição dos dados foi feita utilizando-se de um sinal degrau no motor, com amplitude de 7V. Com esses dados captou-se a velocidade angular dos motores com tempo de amostragem de 1ms. Como os dados reais apresentam imperfeições, aplicou-se um filtro passa-baixa com frequência de corte de 50Hz nestes dados. Para melhorar a qualidade

dessas amostras foi utilizado o software *MatLab* e a toolbox *Fdatool* pertencente à esse software.

Auto-regressão é uma representação matemática de comportamento do processo através de um modelo que pode ser utilizado para predeterminar o comportamento futuro. Com isso foi utilizado o modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX) definido na equação 17 (Aguirre, 2004).

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)v(k) \quad (17)$$

As funções de transferências 18 e 19 dos motores esquerdo e direito respectivamente são mostradas nas equações 18 e 19

$$\frac{318,7}{s + 10,09} \quad (18)$$

$$\frac{135,4}{s + 9,835} \quad (19)$$

A Figura 6 mostram os gráficos dos dados estimados pelo processo de identificação e os dados captados dos motores esquerdo e direito.

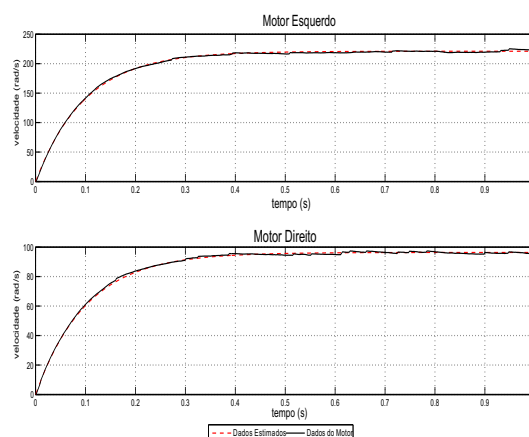


Figura 6: Resposta dos Motores

5 Implementação do Sistema

5.1 Esquema lógico para acionamento da cadeira de rodas com sensor de fluxo de ar

O sensor de fluxo de ar é um dispositivo capaz de detectar a quantidade de ar que percorreu interior por meio das de uma entrada e uma saída de ar, acionando um pequeno diafragma interno. Com base nesse dispositivo utilizou-se desta característica que é muito útil para esse tipo de projeto. Para a escolha de sensor de fluxo para acionar os comandos da cadeira, haja visto que o usuário pode acioná-la facilmente sem usar as mãos.

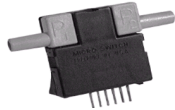


Figura 7: Sensor de fluxo de ar - AWM2100V

Bom base nisso foi utilizado um sensor de fluxo de ar, modelo AWM2100, da *Honeywell* conforme Figura 7:

Esse sensor possui uma saída de tensão analógica que varia proporcionalmente com a quantidade de fluxo de ar que passa através dele. Essa variação de tensão na sua saída pode ser positiva ou negativa, sendo diferenciada pelo sentido do fluxo de ar como mostra a Figura 8 (Ferreira, 2008).

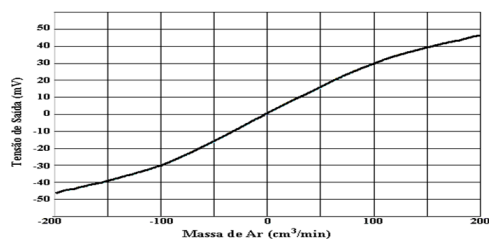


Figura 8: Curva característica do sensor

Como os níveis de tensão da saída do sensor é baixo, o fabricante propõe 3 circuitos auxiliares para facilitar a leitura do mesmo. Então implementou-se os seguintes circuitos: circuito de controle de temperatura, circuito de sensibilidade e amplificador de instrumentação para adequação do sinal em níveis TTL (Ferreira, 2008).

Para o acionamento da cadeira utilizou-se um único sensor responsável por fazer todos os movimentos necessários. A figura mostra o diagrama de blocos da lógica de acionamento:



Figura 9: Diagrama de blocos da lógica de acionamento

O bloco principal da Figura 9 possui a seguinte lógica interna:

- Sopro por 1s → movimento para frente
- Sopro por 1,5s → movimento para trás
- Sopro por 0,5s → sem movimento (parado)
- Sucção por 1s → movimento para esquerda

- Sucção por 1,5s → movimento para direita
- Sucção por 0,5s → sem movimento (parado)

Onde o Sopro ou Sucção acionam a saída do sensor de fluxo e dependendo do comando dado pelo usuário, manipula as Saídas V e Ω fazendo com que o controle seja acionado como mostra a Figura 10

5.2 Implementação no DSP

Processadores Digitais de Sinais DSP possuem alto desempenho e são maleáveis para desenvolvimento de softwares embarcados. O DSP *Texas Instruments TMS320F28335* é processador poderoso para implementações de algoritmos de controle e possui uma interface muito amigável e fácil de trabalhar (Kozan, 2012). Por esses motivos foi escolhido para implementação do algoritmo da cadeira de rodas.

O ambiente de programação IDE *Code Composer Studio* é eficiente e versátil, possibilitando a escrita do código fonte nas linguagens Assembly ou C. A linguagem C foi escolhida para o desenvolvimento do código fonte devido a sua menor complexidade de escrita comparando-se com Assembly.

A Figura 10 mostra do diagrama de blocos do sistema no qual o usuário aciona o sensor de fluxo por sopro ou sucção. O sinal do sensor entra no bloco lógico e de acordo com o tipo de acionamento o bloco aplica nas saídas V e Ω valores para o controlador. O bloco controlador aciona os blocos de PWM que estão ligados às ponte-H de potência e aciona os motores. Os motores são equipados com sensores encoder para captar a rotação do eixo. Encoders possuem a função de ler a rotação do eixo dos motores e fornecer essa informação para realimentar o bloco controlador, que por sua vez mantém o sinal de acionamento do bloco PWM a para manter o sistema estabilizado.

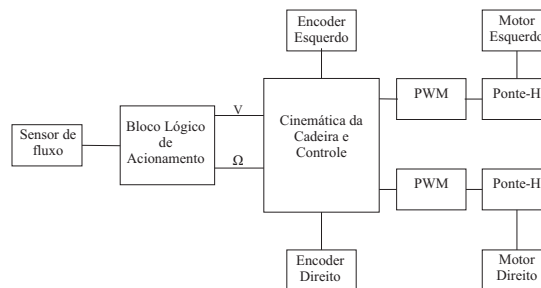


Figura 10: Diagrama de blocos do sistema de controle implementado

A Figura 11 mostra o protótipo usado para implementação, o teste em escala menor é verificado pela fácil mobilidade, e após isto transferida a cadeira (Ferreira, 2008).

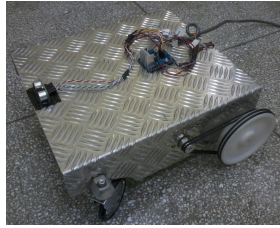


Figura 11: Protótipo implementado

5.3 Resultados Obtidos

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados obtidos dos motores em movimento linear e angular respectivamente após a implementação do sistema de controle.

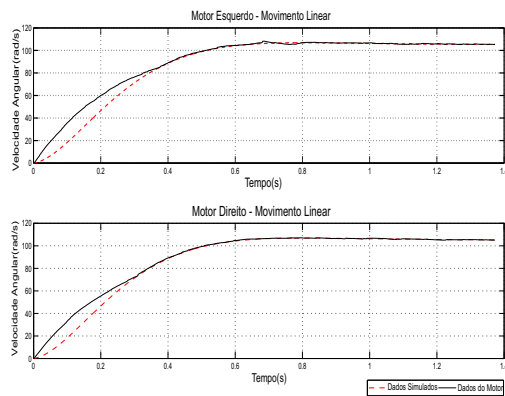


Figura 12: Comparação da simulação e dados captados dos motores em movimento linear

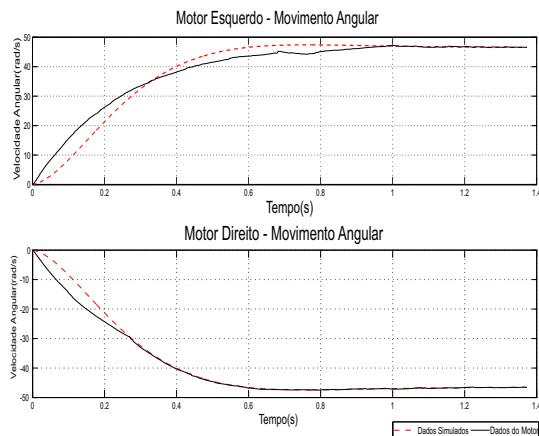


Figura 13: Comparação da simulação e dados captados dos motores em movimento angular

6 Conclusões

Entre as principais vantagens pode-se citar a baixa complexidade computacional de implementação do sistema de controle e a grande utilidade para pessoas que possuem deficiências físicas que as impedem de dirigir uma cadeira usando um comando

manual, ou seja, esse sistema pode ajudar pessoas a realizar tarefas de locomoção do dia a dia sem a necessidade de ajuda, como por exemplo, os paraplégicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos colaboradores da UNESP-Ilha solteira e ao apoio financeiro da Capes, Fundação Araucária do Estado do Paraná, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e do CNPq.

Referências

- Aguirre, L. A. (2004). *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*, editora UFMG.
- Espinosa, F., López, E., Mateos, R., Mazo, M. and García, R. (2001). Advanced and intelligent control techniques applied to the drive control and path tracking systems on a robotic wheelchair, *Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands* **11**: 137–148.
- Ferreira, C. L. L. (2008). *Interface de sopro e sucção para controle de cadeira de rodas*, Master's thesis, Universidade Estadual de Londrina.
- Kozan, R. F. (2012). *Controle da posição da perna de pessoas hígidas utilizando um controlador pid*, Master's thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Ilha Solteira.
- Ljung, L. (1987). *System identification: theory for the user*, Prentice-Hall information and system sciences series, Prentice-Hall.
- Mazo, M., Rodriguez, F. J., Lázaro, J. L., Ureña, J., Garcia, J. C., Santiso, E. and Revenga, P. A. (1995). Electronic control of a wheelchair guided by voice commands, *Control Engineering Practice* **3**: 665–674.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, Vol. 5, Pearson Prentice Hall, São Paulo.
- Sobrinho, A. S. F., Suzuki, I., Germanovix, W. and Gaino, R. (2003). Implementação e análise do controle de uma cadeira de rodas através de sopros e sucções, *VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru* pp. 1–4.
- Teixeira, M. C. M., Assuncao, E. and Covacic, M. (2007). Proportional controllers: Direct method for stability analysis and matlab implementation, *Education, IEEE Transactions on* **50**(1): 74–78.