

## **CONTROLE TELEOPERADO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PELA ESTIMAÇÃO DOS MOVIMENTOS DO BRAÇO E DA MÃO, UTILIZANDO SENSORES INERCIAIS, ELETROMIOGRAFIA E LÓGICA FUZZY**

**Gabriela Lúcia Reis, Universidade Federal de São João del-Rei, gabireis10@yahoo.com.br**  
**Marcos Antônio Abdalla Jr., Universidade Federal de Minas Gerais, marcosabdalla@yahoo.com.br**  
**João Daniel Nolasco, Universidade Federal de São João del-Rei, joaodani@hotmail.com**  
**Luis Fernando Freire Sousa, Universidade Federal de São João del-Rei, lmandoffs@hotmail.com**  
**Márcio Falcão Santos Barroso, Universidade Federal de São João del-Rei, barroso@ufsj.edu.br**  
**Eduardo Bento Pereira, Universidade Federal de São João del-Rei, ebento@ufsj.edu.br**

**Resumo.** *Com o avanço da tecnologia, a interação homem-robô para a realização de tarefas tem se tornado cada vez mais interessante e, com isso, há um aumento da demanda por formas mais intuitivas e naturais de se controlar os robôs. Esses estudos são muito promissores no auxílio a pessoas com deficiência e na melhoria das condições de trabalho, sobretudo em ambientes perigosos ou em atividades que envolvem esforços inadequados ao ser humano. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de instrumentação para o controle teleoperado de um manipulador robótico com dois graus de liberdade, por meio de sensores inerciais e eletromiografia. As posições angulares do braço referentes aos movimentos de arfagem e guinada são estimadas pela fusão dos sensores inerciais, por meio do filtro de Kalman, para controle das juntas do robô. Por outro lado, os gestos realizados pela mão de abrir e fechar, são identificados por meio da eletromiografia para o controle do efetuador, visando a utilização do dispositivo tanto por pessoas sem deficiência quanto para aquelas que tenham sofrido uma amputação transradial. O controlador fuzzy convencional é utilizado para controle de posição angular das juntas do manipulador. Resultados experimentais mostraram um erro máximo na medição das posições angulares do braço de 1,3° e uma acurácia na classificação da mão entre 93,4% e 100% para o pior e o melhor caso, respectivamente, em testes realizados com vinte voluntários.*

**Palavras chave:** *Interação homem-robô, Sistema inercial, Eletromiografia, Controle fuzzy.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente, é grande o número de pessoas com deficiência motora e de idosos que precisam de auxílio para a realização de atividades cotidianas. Segundo o último CENSO realizado no Brasil em 2010, “considerando a população residente no país, 23,9% possuíam pelo menos uma das deficiências investigadas: visual, auditiva, motora e mental ou intelectual” Oliveira (2010). A deficiência motora apresentou a segunda maior ocorrência, afetando 7% da população, ou seja, mais de 13 milhões de pessoas. Dentre os motivos relacionados a esse tipo de deficiência podem-se destacar problemas de má formação, acidentes de trânsito, acidentes de trabalho, erros médicos e complicações no parto.

Algumas dessas pessoas estão fora do mercado de trabalho ou do convívio social. Por isso, tecnologias assistivas são importantes para permitir a reintegração dessas pessoas à sociedade e ao emprego. Neste contexto, uma área muito promissora é a robótica. A interação homem-robô tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos nos últimos anos e tem se tornado cada vez mais importante (Garcia, 2007).

Paralelo a isso, há também um aumento da demanda por formas mais naturais e intuitivas de se controlar os robôs, por meio de técnicas que captam a intenção de movimento. Esses estudos, além de buscar promover a inclusão de pessoas com deficiência, podem proporcionar a melhoria da ergonomia e das condições de trabalho, sobretudo em ambientes perigosos ou em atividades que envolvem a manipulação de cargas que requerem um esforço físico inadequado ao ser humano. Além disso, essas técnicas têm sido muito utilizadas ainda em áreas como a fisioterapia (Dyer, 2013), no estudo de patologias (Go, 2014) e em técnicas de treinamento desportivo (Croft, 2013).

Tendo em vista todos esses aspectos, nota-se que o estudo desses mecanismos é de extrema importância. As inúmeras aplicações revelam aspectos ainda inexplorados e a necessidade de se ter sistemas cada vez mais eficientes que possam processar os sinais provenientes dos sensores e reconhecer a intenção de movimento em tempo real.

Neste sentido, este trabalho apresenta o uso de duas técnicas para detectar movimento: a eletromiografia (EMG) e um sistema inercial (SI), visando o controle teleoperado de um manipulador robótico. O sistema inercial é usado para medir os movimentos do braço para o controle das juntas do robô e a EMG foi aplicada para classificar o gesto realizado pela mão, a fim de controlar o efetuador em dois estados: aberto ou fechado.

Sistemas como esse podem ser usados por pessoas sem deficiência e por pessoas que tenham sofrido uma amputação transradial. Entretanto, vale salientar que embora o propósito do trabalho seja voltado para o controle de um robô teleoperado por meio dos movimentos do braço humano, o sistema não se restringe apenas a esse tipo de aplicação. Com as devidas modificações, tal sistema poderia ser proposto, por exemplo, para o controle de uma cadeira-de-rodas,

com a utilização dos sensores inerciais para medir os movimentos da cabeça da pessoa e, assim, controlar o sistema de acionamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O manipulador robótico utilizado neste trabalho é um robô montado com peças do kit LEGO® modelo *Mindstorms*, que possui um efetuator em forma de pinça e dois graus de liberdade, sendo capaz de realizar os movimentos de guinada e arfagem, como mostra a Fig. (1).

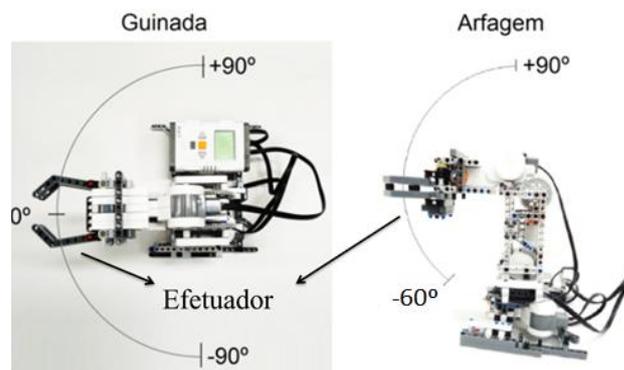


Figura 1. Manipulador robótico utilizado.

O sistema inercial desenvolvido é constituído por três sensores triaxiais: um acelerômetro MMA7361, um giroscópio L3G4200D e um magnetômetro HMC5883. A fusão dos dados desses sensores para o cálculo das posições angulares de arfagem e guinada foi feita utilizando o filtro de Kalman (Kalman, 1960).

O eletromiógrafo de um canal construído é constituído de um circuito para aquisição, amplificação, filtragem e retificação do sinal eletromiográfico (sEMG) por meio de um sistema de prototipagem rápida. A captação deste sinal é feita por meio de três eletrodos de superfície. Para a classificação do sEMG foi utilizada a média dos valores de tensão obtidos a cada dez amostras. A Fig. (2) mostra uma voluntária coordenando a ação do robô, com destaque para o sistema inercial, o manipulador robótico e a disposição dos eletrodos.



Figura 2. Voluntária controlando o robô.

Neste trabalho, optou-se pelo controlador fuzzy convencional para controle das posições angulares das juntas do robô, devido ao fato deste controlador possuir uma fase de elaboração do projeto simples. O diagrama mostrado na Fig. (3) mostra a estratégia utilizada neste tipo de controlador

A trajetória a ser seguida é imposta pelas medições realizadas pelo sistema inercial e a realimentação do sistema de controle é feita por meio das medições provenientes dos *encoders* de cada motor. As entradas do controlador, seguindo o modelo proposto por Mamdani, são o erro ( $e$ ), ou seja, a posição angular desejada menos a posição angular medida pelo encoder, e a variação do erro ou desvio do erro ( $de$ ), que consiste no erro atual menos o erro anterior. A saída do controlador deverá ser o valor de tensão a ser aplicado no motor. As funções de fuzzyficação e defuzzyficação, bem como as regras de inferência fuzzy foram definidas com base em (Ying e Siler, 1993) e (Leite *et al.*, 2010), e podem ser vistas em (Reis, 2014).

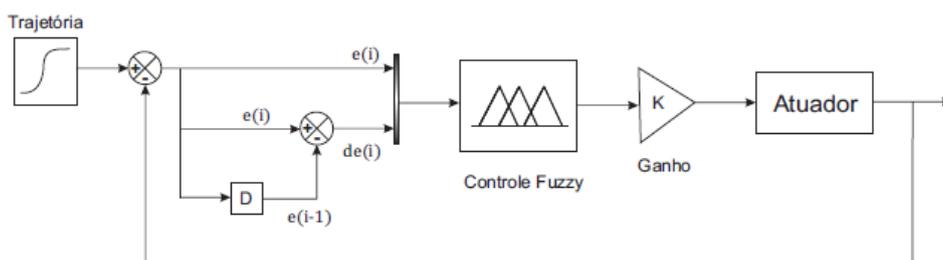


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de controle implementado.

### 3. RESULTADOS

A fim de verificar a acurácia do sistema de medição e do sistema de controle propostos foram realizados diversos testes, cujos principais resultados são mostrados a seguir.

#### 3.1. Desempenho do sistema inercial

Para verificar o desempenho do SI, foram realizados cinco testes para diferentes valores de referência das posições angulares de arfagem e guinada. Os resultados desses testes são mostrados na Tab. (1), na qual é possível visualizar o valor médio das medições realizadas e o desvio padrão. Pela Tab. (1), nota-se que o maior erro médio obtido foi de 1,3°.

Tabela 1. Desempenho do Sistema Inercial utilizando o Filtro de Kalman

Posição Angular	Arfagem		Guinada	
	Erro Médio	Desvio Padrão	Erro Médio	Desvio Padrão
-90°	0,1°	± 0,9°	0,3°	± 0,4°
-60°	0,3°	± 0,5°	0,2°	± 0,5°
-30°	0,1°	± 0,7°	0,1°	± 0,8°
0°	0,3°	± 0,3°	0,2°	± 0,2°
30°	0,2°	± 1,0°	0,5°	± 0,4°
60°	0,2°	± 0,8°	0,3°	± 0,8°
90°	<b>1,0°</b>	± 1,1°	<b>1,3°</b>	± 1,0°

#### 3.2. Desempenho do eletromiógrafo

Para análise do sistema proposto foram realizados testes com 20 indivíduos adultos, sem deficiência, de ambos os sexos e com idades entre 19 e 40 anos. Para testar a classificação do sEMG, foi feita uma interface que indicava os gestos que o voluntário deveria realizar, seguindo a sequência mostrada na Fig. (4).

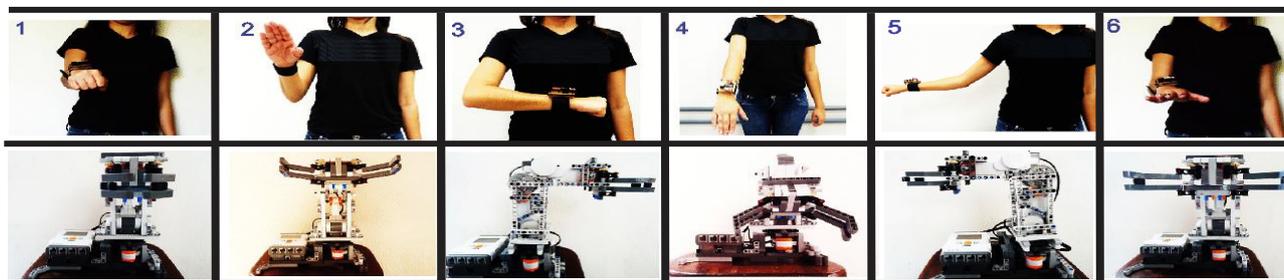


Figura 4. Gestos definidos para o protocolo de testes.

Foram realizados 5 testes para cada voluntário, com duração de 60 segundos, sendo que os gestos alternavam nos testes a cada 10 segundos. A Tab. (2) mostra a média de acertos obtida para cada indivíduo. Nota-se que no pior resultado obtido, a média de acertos foi de 93,4%.

Tab. 2 Taxa de acertos na classificação do gesto da mão.

Indivíduo	Média de Acertos	Indivíduo	Média de Acertos
I1	99,29%	I11	97,31%
I2	99,21%	I12	99,53%
I3	98,74%	I13	98,66%
I4	99,45%	I14	98,81%
I5	97,87%	I15	95,26%
I6	99,53%	I16	98,74%
I7	97,94%	I17	98,50%
I8	100,00%	I18	99,13%
I9	98,97%	I19	99,05%
I10	93,44%	I20	97,94%

### 3.3. Desempenho do controle fuzzy

Por fim, para verificar o desempenho do controlador fuzzy proposto, foram realizados dois testes, variando-se os movimentos de arfagem e guinada, com o sistema inercial no braço. A Fig. (5) mostra o desempenho de tal controlador para algumas das trajetórias propostas.

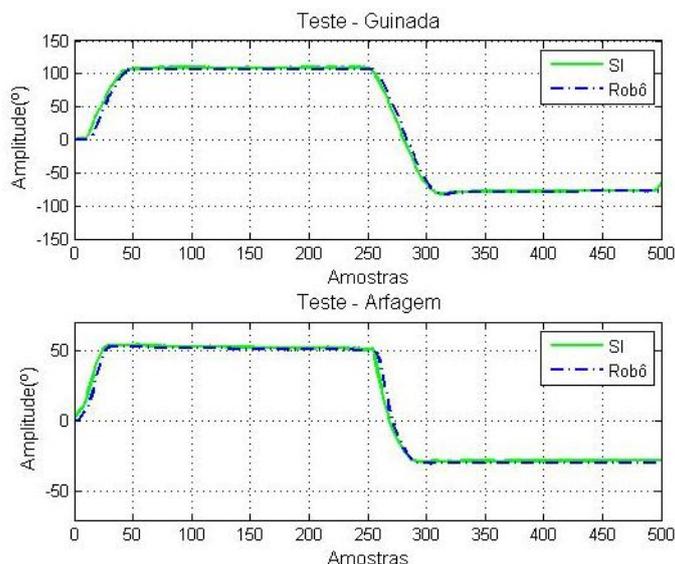


Figura 5. Desempenho do controle fuzzy proposto.

Nota-se que o sistema de controle proposto atende às expectativas deste projeto, uma vez que as trajetórias propostas são seguidas com baixo tempo de acomodação e não ocorrem oscilações em torno das posições angulares desejadas. O erro obtido pelo sistema de controle implementado foi menor que 1°, o que pode ser admitido nessa aplicação devido às imprecisões da estrutura do robô e as folgas das engrenagens, apresentando assim um resultado satisfatório, tendo-se em vista o propósito deste trabalho.

## 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o projeto de um sistema para o controle teleoperado de um manipulador robótico com dois graus de liberdade, utilizando sensores inerciais e eletromiografia. O objetivo do trabalho foi construir um sistema por meio do qual o usuário fosse capaz de controlar o robô de maneira natural e intuitiva, pelos gestos realizados pelo braço e que pudesse ser utilizado tanto por pessoas sem deficiência, quanto por pessoas que tenham sofrido uma amputação transradial.

Com a implementação do filtro de Kalman para fusão dos dados dos sensores inerciais, o maior erro obtido entre a posição angular de referência e a média dos valores medidos foi de aproximadamente 1,3°, o que não compromete o controle do robô em várias atividades que não exigem grande precisão.

Assim como os sensores inerciais, o uso da eletromiografia também apresentou um desempenho satisfatório, possibilitando o controle dos movimentos do efetuador, por meio de um eletromiógrafo de apenas um canal. A média de acertos oscilou entre 93,4% e 100%, utilizando para a classificação apenas a média do sinal eletromiográfico.

Outro ponto a ser destacado no trabalho é a simplicidade do controlador fuzzy que surpreende pelos resultados apresentados, os quais qualificam estes tipos de controladores para aplicações de uso geral, onde pequenos desvios não comprometem a eficiência do sistema de controle.

Desta forma, os sistemas de medição e de controle propostos permitiram aos voluntários o controle do robô de maneira intuitiva em pequenas atividades, como, pegar uma garrafa de água ou uma latinha de refrigerante.

Para trabalhos futuros, pretende-se aumentar o grau de complexidade do sistema, acrescentando mais dois graus de liberdade, tanto para o manipulador quanto para o sistema inercial desenvolvido, a fim de que os movimentos do braço e do antebraço possam ser medidos. O uso de um classificador de padrões e a construção de mais canais para o eletromiógrafo, também são propostas futuras para melhorar ainda mais a acurácia na classificação do gesto da mão. Além disso, será feito o estudo de outros tipos de controladores, para fins de comparação e a realização de testes com pessoas que tenham sofrido uma amputação transradial.

### 3. REFERÊNCIAS

- Croft, H. and Ribeiro, D. C. (2013). Developing and applying a tri-axial accelerometer sensor for measuring real time kayak cadence. *Procedia Engineering, Elsevier*, 60(1), p.16-21.
- Dyer, C. A. E.; Harris, N. D. and Jenkin, E.; Langlely-Johnson, C.; Lewis, R.; Taylor, G. J.; Gruffydd-Jones, K. (2013). Activity levels after pulmonary rehabilitation – what really happens? *Physiotherapy, Elsevier*, 99(3), p. 228-232.
- Garcia, E. Jimenez, M. A.; Santos, P. G. and Armada, M. (2007). The Evolution of Robotics Research: From Industrial Robotics to Field and Service Robotics. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 14(1), p. 90-103.
- Go, S. A.; Coleman-Wood, K. and Kaufman, K. R. (2014). Frequency analysis of lower extremity electromyography signals for the quantitative diagnosis of dystonia. *Electromyography and Kinesiology. Elsevier*, 24(1), p.31-36.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Fluids Engineering*, 82(1):35–45.
- Leite, M. S., Fileti, A. M. F., e Silva, F. V. (2010). Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e convencional em um bioprocesso. *Controle & Automação*, 21(2):147–158.
- Oliveira, L. M. B. (2012). Cartilha do Censo 2010: Pessoas com Deficiência. Disponível em: <http://www.pessoacomdeficiencia.gov.br/app/sites/default/files/publicacoes/cartilha-censo-2010-pessoas-com-deficiencia-reduzido.pdf>. Acesso em: 22 de janeiro de 2014.
- Reis, G. L.; Abdalla Jr., M. A.; Nolasco, J. D.; Barroso, M. F. S. e Pereira, E. B. (2014). Controle de posição de um manipulador robótico utilizando sensores inerciais e eletromiografia. XX Congresso Brasileiro de Automática.
- Ying, H. e Siler, B. (1993). A non-linear fuzzy controller with fuzzy rules is a sum of global multilevel relay and local pi controller. *Automatica*, 26(3):499–505.

### 4. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e ao Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI) pelo apoio financeiro, à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) pelo apoio logístico e infraestrutura física e ao Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica (PPGEL).

### 5. ABSTRACT

With the advancement of technology, the human-robot interaction to accomplish tasks has become increasingly interesting and, thus, there is an increasing demand for more intuitive and natural ways of controlling robots. These studies are very promising in helping people with disabilities and the improvement of working conditions, especially in hazardous environments or activities that involve improper to human efforts. In this context, this work aims at the development of an instrumentation system for teleoperated control of a robotic manipulator with two degrees of freedom by means of inertial sensors and electromyography. The angular arm positions concerning pitch and yaw movements are estimated by fusion of inertial sensors by means of the Kalman filter, for controlling the joints of the robot. On the other hand, the gestures made by the hand to open and close, are identified by electromyography to control end-effector, aiming to use the device for both people without disabilities and for those who have experienced a transradial amputation. The conventional fuzzy controller is used to control the angular position of the joints of the manipulator. Experimental results showed a maximum error in measuring the angular positions of the arm and a 1.3° accuracy in the classification of hand between 93.4% and 100% for the worst and the best case, respectively, in tests conducted with twenty volunteers.

### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.