SISTEMA PARA CAPTAÇÃO DO MOVIMENTO DO BRAÇO E CONTROLE DE UM PROTÓTIPO DE BRAÇO MECÂNICO À DISTÂNCIA

ELECTRONIC SYSTEM FOR CAPTURE OF THE ARM MOVEMENT AND CONTROL OF A MECHANICAL ARM AT DISTANCE

João A. Marcolan[1], Joan M. Levandoski[2], Amauri F. Balotin[3]

Abstract *— This paper describes a system capable of measuring the movement of the human arm and control a prototype that plays such movements through step and servo motors. The signal acquisition system consists of sensors, conditioning circuits, wireless transmission and is powered by batteries. The reproduction system consists of a robotic arm prototype, which is controlled by two stepper motors and a servo motor, mounted in order to reproduce the movements read by the acquisition system. It may be noted that the motion capture system is mobile and can be attached directly to the individual's arm and communicates without data loss up to a distance of 10 meters and the battery had autonomy of 4 hours. At the end of the work it was possible to control the mechanical arm by reading a tri-axial accelerometer and faithfully reproduce the movements of the elbow and the movement of prono-supination of the forearm.*

Index Terms — Arm movement, Control, Mechanic arm, Movement reproduction.

INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, e com o desenvolvimento tecnológico e da saúde, a pessoas tem prolongado a média de anos de vida. Tal afirmação fica evidente quando se analisam os dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que mostram que a média de anos de vida na região Sul do Brasil tende aumentar em 14 anos no ano de 2030 quando comparada com a média de expectativa de vida que as pessoas tinham em 1980. [1]

Um dos problemas inerentes ao envelhecimento é a perda significativa da qualidade de vida, pois fica evidente que, anatomicamente, o ser humano perde suas capacidades locomotoras e cognitivas com o avançar de idade. Visto isso, o presente trabalho apresenta uma alternativa que pode possibilitar que pessoas em idade avançada consigam realizar atividades que fisiologicamente não seriam mais capazes e, além disso, com poucas modificações, esse mesmo sistema poderia ser utilizado com outros fins como, por exemplo, controlar braços robóticos em ambientes industriais ou em ambientes de alta periculosidade à distância.

Para o melhor entendimento o protótipo construído pode ser divido em duas partes: 1 - módulo responsável pela captação dos sinais de movimento dinâmico do braço do indivíduo e envio das informações via *bluetooth;* 2 – módulo reponsável pela recepção dos dados via *bluetooth* e a reprodução do movimento realizado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema proposto neste trabalho é constituído por duas partes distintas que comunicam-se via *link* de rádio frequência mas que funcionam de forma independente. Um diagrama de blocos simplificado do sistema está ilustrado na Figura 1.

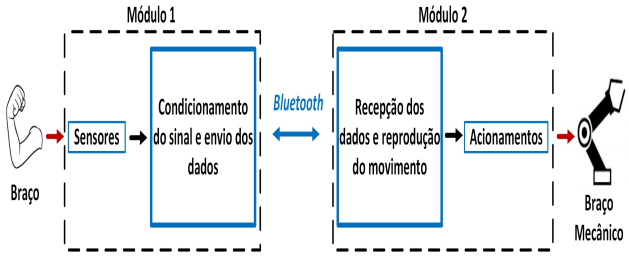

FIGURA. 1
DIAGRAMA EM BLOCOS SIMPLIFICADO DO SISTEMA PROPOSTO.

O módulo 1 é responsável pela captação dos sinais de movimento do braço do indivíduo e o condicionamento destes sinais para conversão analógico/digital (A/D). Os movimentos captados pelo sistema são o movimento de flexão e extensão do cotovelo (ângulo do antebraço com relação ao cotovelo), o movimento de prono-supinação do antebraço (giro do antebraço ou do pulso) e a abertura e o fechamento da mão [2]. A leitura dos sinais da variação angular do cotovelo e do giro do pulso é feita por meio de acelerômetros tria-axiais ADXL335 que possuem uma variação de 300mV por g, e para a detecção da abertura e do fechamento da mão foi utilizado um potenciômetro deslizante de 10k(Ω) adaptado a um flexor de punhos (*hand grip*).

[1] João A. Marcolan, Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Passo Fundo, 86387@upf.br
[2] Joan M. Levandoski, Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Brasil joan@upf.br
[3] Amauri F. Balotin, Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Brasil amauribalotin@upf.br

DOI 10.14684/ICECE.9.2015.155-159
© 2015 COPEC

A alimentação de todos os circuitos deste módulo foi realizada por meio de uma bateria de 9V, uma vez que todo este circuito é acoplado ao braço do indivíduo e é necessário que o mesmo possua liberdade para realizar toda a amplitude dos movimentos. Sendo assim, o usuário não fica ligado fisicamente a uma fonte de alimentação por meio de cabos. A Figura 2 apresenta um diagrama em blocos detalhando todos os elementos contidos no módulo de aquisição.

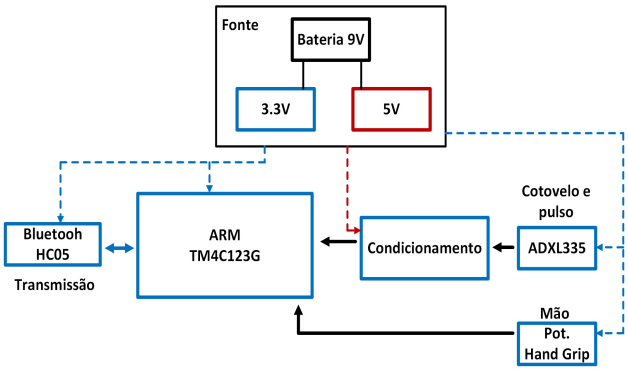

FIGURA. 2

DIAGRAMA EM BLOCOS DETALHADO DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DOS MOVIMENTOS DO BRAÇO.

Para a implementação dos circuitos de condicionamento foram utilizados amplificadores operacionais LM358 na configuração diferencial. Este circuito realiza a amplificação do sinal de saída do acelerômetro e também um deslocamento de corrente contínua (CC) para que os valores lidos pelo conversor A/D estejam entre 0 e 3V. Cabe ressaltar que o condicionamento de sinal foi realizado para que o acelerômetro ADXL335 operasse com maior sensibilidade no modo estático, apenas lendo a posição do braço. Para tanto ele lê apenas a aceleração gravitacional e não a aceleração do movimento do braço. Assim sendo, foi criado um condicionamento que satura ao exceder 1g de variação.

O microcontrolador utilizado foi o TM4C123GH6PM da família ARM córtex M4 que devido a sua arquitetura RISC e diversos periféricos permite a aplicações de controle de movimento e instrumentação médica [3], e para rápida implementação utilizou-se um kit de avaliação da *Texas Instruments* (*TIVA C Series Launch Pad Evaluation Kit*). Este dispositivo realiza a conversão A/D dos sinais do acelerômetro que está fixado no braço e da tensão CC do potenciômetro acoplado ao *hand grip*. A conversão A/D é realizada a uma taxa de 3200 amostras por segundo utilizando um timer para temporização da conversão e o conversor A/D de 12 bits do próprio microcontrolador.

Após realizar a conversão dos dados o microcontrolador envia estas informações via *bluetooth* ao módulo 2. Para comunicação sem fio utilizou-se um módulo *bluetooth* HC-05. O módulo HC-05 tem a vantagem de ser um módulo barato que pode ser configurado como mestre ou escravo e tem o alcance de até 10 metros. Ainda, o mesmo pode ser alimentado com uma tensão de 3.3V e é compatível com a lógica CMOS de 3.3V, facilitando a comunicação serial com o TM4C123G sem a necessidade de implementação de circuitos de ajuste de níveis de tensão. A comunicação entre o microcontrolador e o HC-05 é realizada via protocolo serial no padrão UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) com *baud rate* de 9600bps.

Para evitar o envio de informações redundantes foi implementado no *firmware* do microcontrolador um programa que identifica se os valores lidos são diferentes dos valores lidos e enviados anteriormente, caso sejam iguais ele não faz um novo envio.

A Figura 3 ilustra com detalhes todos os circuitos que constituem o módulo 2 o qual refere-se como módulo de reprodução do movimento.

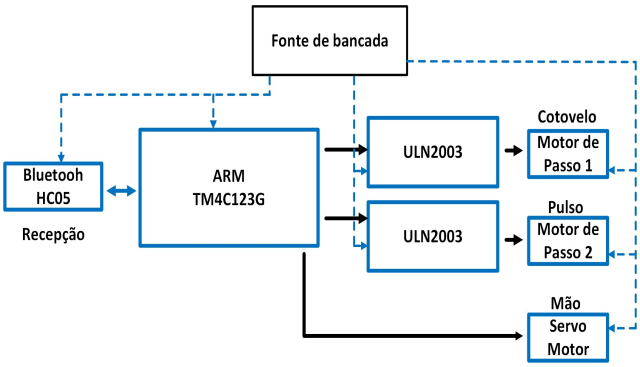

FIGURA. 3

DIAGRAMA EM BLOCOS DETALHADO DO MÓDULO DE CONTROLE DOS MOTORES E REPRODUÇÃO DO MOVIMENTO DO BRAÇO.

Neste módulo os dados são recebidos pelo HC-05 e lidos pelo microcontrolador. Estas informações são então processadas e utilizadas para realização do controle da posição dos motores de passo e do servo motor. Para o acionamento dos motores de passo foram utilizados circuitos integrados (CI's) ULN2003. O motor de passo 1 é o motor de passo Nema 23KM-C379V que possui as seguintes características: motor de passo hibrido, com resolução de 1.8º por passo, tensão de alimentação de 4V, corrente por fase de até 1.5 A e torque estático de 8Kgf.cm. Já o motor de passo 2 é um motor Mitsumi M42SP-5 que tem como características: um motor de passo unipolar, resolução de 7.5º por passo, alimentação de 24V CC, corrente por fase de até 800mA e torque estático 109 mN.m. O servo motor HS422 tem como características: torque de 3.3Kgf.m para a alimentação de 5V, velocidade angular de 0.21segundo para rodar 60º e pulso de comando realizado a cada 10ms.

Para verificação dos padrões de movimento foram realizadas três aquisições individuais dos sinais de saída do acelerômetro. Primeiramente o braço foi mantido estático na posição de cotovelo refletido e realizou-se a aquisição por cinco segundos. Na sequência o braço permaneceu na mesma posição e foram adquiridos cinco segundos porém realizou-se uma série de dez movimentos de prono-

supinação (giro do pulso) durante o tempo de aquisição. Por fim, realizou-se novamente a aquisição de cinco segundos realizando uma sequência de seis movimentos de flexão e extensão máxima do braço. A partir destas aquisições foi possível caracterizar o sinais de saída de cada eixo do acelerômetro individualmente, bem como os padrões de movimento.

RESULTADOS

Todos os circuitos que compõem o *hardware* do sistema foram montados e avaliados em *protoboard* e então, foram desenvolvidas placas de circuito impresso individuais para cada módulo. Para a aquisição dos sinais provenientes do movimento do braço humano foram confeccionadas quatro placas as quais são fixadas ao braço do indivíduo por meio fitas de velcro.

Cada uma das placas tem a seguinte função: 1 – Fonte e adaptador de bateria; 2 – Condicionamento do sinal do acelerômetro e adaptador do HC-05; 3 – Microcontrolador; 4 – Acelerômetro e entrada para o potenciômetro do *hand grip*. A Figura 4 mostra as placas acopladas ao braço do indivíduo.

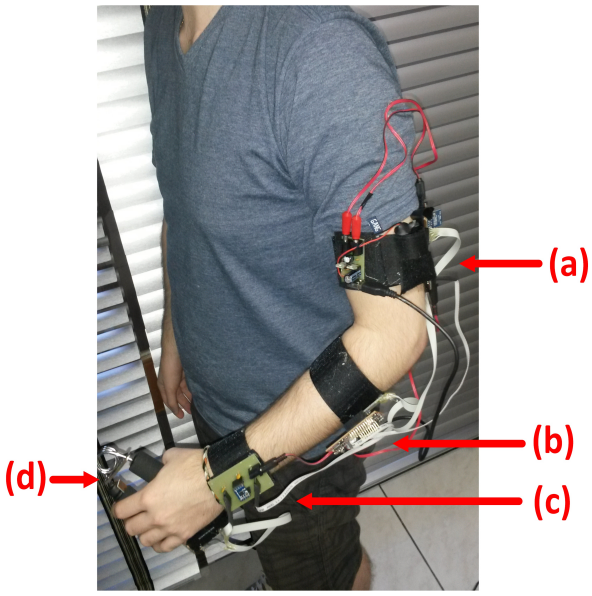

FIGURA. 4
FOTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO. A) PLACA DA FONTE E CONDICIONAMENTO E *BLUETOOTH*. B) PLACA DO MICROCONTROLADOR. C) ACELERÔMETRO. D) *HAND GRIP*.

Para o módulo de controle dos motores e reprodução do movimento foram construídas três placas: 1 – Fonte e reguladores de tensão; 2 – Adaptador para o microcontrolador e para o HC-05; 3 – *Driver's* para o controle e acionamento dos motores de passo. Estas placas foram fixadas a uma base de madeira construída para realizar o acoplamento dos motores aos seus respectivos circuitos.

Na Figura 5 está ilustrado o acoplamento dos motores do braço robótico. Foram acoplados os dois motores de passo, um para o movimento do cotovelo e outro para o movimento do pulso, e um servo motor em uma garra para simulação da abertura e do fechamento da mão.

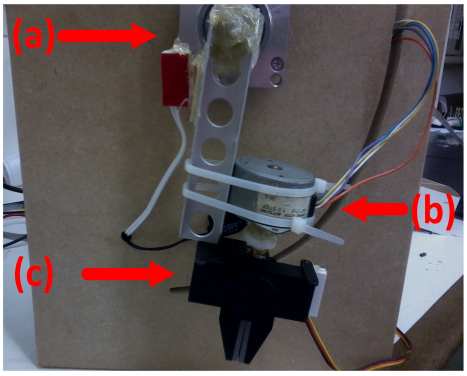

FIGURA. 5
FOTO DO BRAÇO MECÂNICO. A) MOTOR DE PASSO DO MOVIMENTO DO COTOVELO. B) MOTOR DE PASSO DO MOVIMENTO DO PULSO. C) SERVO MOTOR DA REPRODUÇÃO DO MOVIMENTO DA MÃO.

Os sinais captados pelo sistema de aquisição que são utilizados no controle do braço robótico foram captados e estão ilustrados nas Figuras 6, 7 e 8. Na Figura 6 está mostrado o sinal proveniente do acelerômetro com o braço em repouso na posição cotovelo refletido.

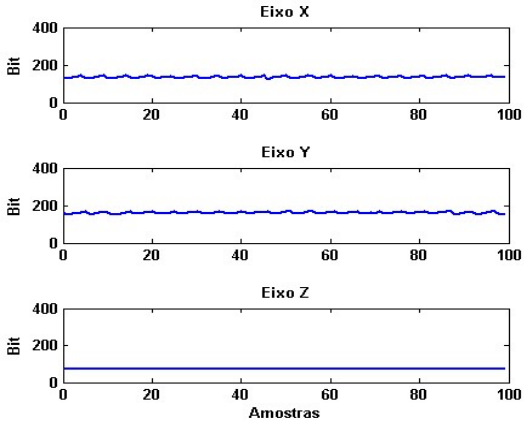

FIGURA. 6
VALORES CAPTADOS EM BITS DOS EIXOS X, Y E Z DO ACELERÔMETRO NA POSIÇÃO DE REPOUSO.

A Figura 7 ilustra os sinais de saída do acelerômetro, adquiridos pelo microcontrolador, do indivíduo realizando o movimento de prono-supinação com o cotovelo refletido.

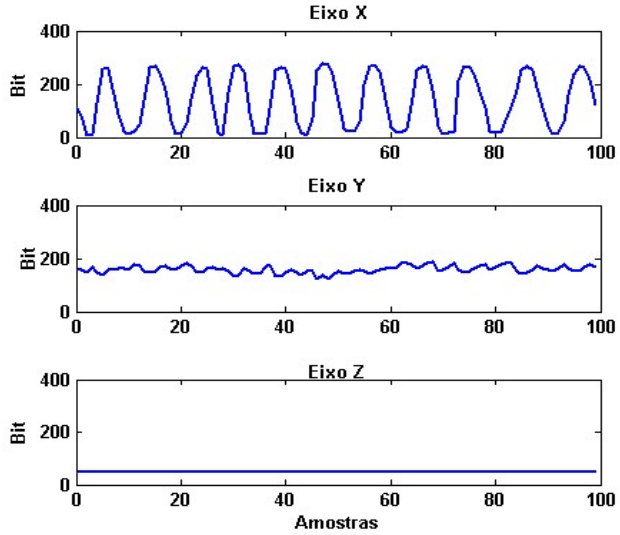

FIGURA. 7
VALORES CAPTADOS EM BITS DOS EIXOS X, Y E Z DO ACELERÔMETRO REALIZANDO O MOVIMENTO DE PRONO-SUPINAÇÃO (GIRO DO PULSO).

Por fim, a Figura 8 ilustra o sinal de saída proveniente do acelerômetro realizando-se o movimento de flexão e extensão máxima do cotovelo.

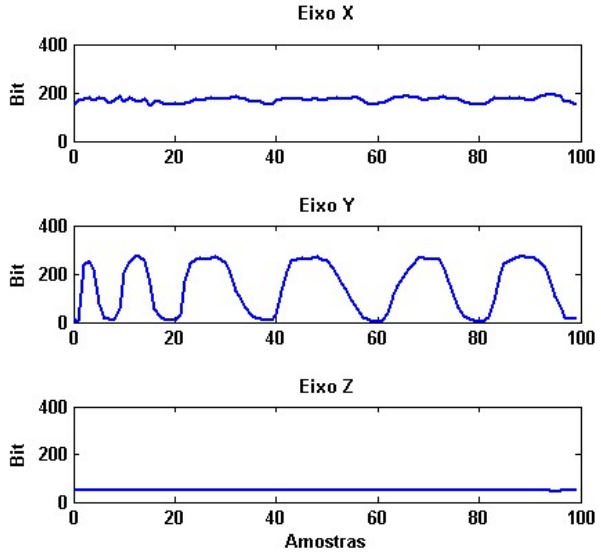

FIGURA. 8
VALORES CAPTADOS EM BITS DOS EIXOS X, Y E Z DO ACELERÔMETRO REALIZANDO O MOVIMENTO FLEXÃO E EXTENSÃO DO COTOVELO.

Através da Figura 7, mais especificamente por meio dos valores apresentados no eixo x, verifica-se que para cada movimento são gerados valores máximos e mínimos, que representam a máxima rotação do pulso em torno do seu próprio eixo. A Figura 8, por sua vez, apresenta um comportamento parecido porém no eixo y. Este comportamento representa a máxima extensão e flexão do braço. A partir da interpretação destes sinais realiza-se o dos motores de passo para reprodução do movimento.

Ainda, foram estimados os tempos totais que cada um dos motores leva para reproduzir os movimentos máximos. Com isso, o tempo total que o motor de passo, que realiza a reprodução do movimento do giro do pulso, leva para reproduzir um movimento de 180° de prono-supinação com cotovelo refletido é de 0,4 segundos. Já o motor de passo que reproduz o movimento de flexão e extensão do cotovelo leva 2 segundos para realizar um movimento de 180°.

Também foram medidos os valores de consumo de corrente para cada um dos módulos. O módulo de aquisição consome ao total 77 mA no pior caso, quando o HC-05 está transmitindo informações. Com isso, chegou-se a uma autonomia da bateria de aproximadamente 4 horas. O módulo de controle do braço mecânico consome aproximadamente 2A quando todos os motores e acionamentos estão funcionando simultaneamente.

DISCUSSÃO

Avaliando o protótipo desenvolvido foi possível verificar que o módulo de sensores é capaz de fornecer uma medida acurada e com poucos erros, tanto para as medidas do pulso e braço, quanto para as medidas da posição da mão. As medidas da posição do braço e do pulso ainda contam com a vantagem de possuir um circuito condicionador de sinal que faz com que o sistema de medição aproveite melhor os ranges dos conversores A/D. Estes circuitos fazem com que se delimite a leitura do acelerômetro para a função estática, que é a função desejada para determinar o ângulo.

O algoritmo de aquisição foi implementado de forma simples e eficaz. Com o desenvolvimento do algoritmo de envio com histerese, foi possível eliminar grande parte dos ruídos gerados por pequenos deslocamentos do braço como, por exemplo, devido a pequenos tremores. Desta forma, o sistema mecânico apresentou uma resposta mais precisa e rápida a mudanças de posição e ao movimento do braço humano.

O algoritmo que leva os motores de passo às suas respectivas posições realiza este controle simultaneamente, com isso os motores são reposicionados ao mesmo tempo. Isso acarreta em um sub uso da velocidade do motor de passo que reproduz o movimento do cotovelo, pois o motor que controla o pulso precisa de um tempo maior no intervalo de tempo entre cada novo pulso. Sendo assim, o sistema de reprodução fica limitado ao tempo necessário para realizar o movimento do pulso.

O servo motor atua reproduzindo o movimento de abertura e fechamento da mão, porém, o algoritmo de controle do *duty cicle* para o PWM limita o mesmo, o que faz com que seja possível reproduzir o movimento da mão em apenas algumas posições. O microcontrolador TM4C123G é extremamente versátil pois ele tem grande quantidade de memória, muitos periféricos iguais, muitas formas de interrupções, ótima velocidade e baixo consumo,

o que permitiu que o projeto fosse desenvolvido com rapidez.

CONCLUSÃO

Após a finalização do sistema foi possível verificar que o mesmo consegue realizar o monitoramento do movimento dinâmico do braço de um indivíduo, e realiza o controle do protótipo de braço mecânico desenvolvido. Uma vez acoplado ao braço foi possível controlar o sistema mecânico a uma distância de até 10 metros, e precebeu-se que fora deste intervalo a conexão via *bluetooth* é perdida.

Percebe-se que o trabalho obteve existo no sensoriamento, condicionamento, transmissão e recepção dos sinais via *bluetooth* e no controle dos motores e servo motores, porém verificou-se a necessidade de implementação de um sistema de controle em malha fechada além da detecção da posição inicial do braço mecânico. Tais medidas trariam maior estabilidade e precisão ao sistema que controla o sistema de reprodução do movimento (braço mecânico).

REFERÊNCIAS

[1] IBGE," Expectativa de vida na população sul do Brasil.". Acessado em 26/12/2014 em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000243.pdf>.

[2] Calais-Germain, B, "Anatomia para o Movimento", v. I, 2002, 1a. ed. Tamboré: Manole Ltda,

[3] Valvano, J, W, "Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers Embedded Systems", v. II, 2012, 3. ed. United States of America