

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES ATIVOS PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS ELETROMIOGRÁFICOS

ACTIVE SENSOR DEVELOPMENT FOR ELECTROMYOGRAPHIC SIGNAL ACQUISITION AND PROCESSING

Data de entrega dos originais à redação em: 08/05/2015
e recebido para diagramação em: 13/03/2016.

Alberto Mitio Tsuda ¹
Hugo Magalhães Martins ²
Ricardo Pires ³

Sinais eletromiográficos (EMG) são sinais gerados por atividade musculares e são adquiridos por circuitos eletrônicos através do uso de eletrodos. Esses sinais podem ser utilizados em: medicina para tratamento e reabilitação, na área esportiva para treinamento de atletas de alto desempenho e para aplicações em próteses. Neste trabalho, é apresentado o projeto de um sistema de aquisição de sinais EMGs de superfície na região do antebraço, com a finalidade de controle de prótese de mão. Com o objetivo de se maximizar a fidelidade nos sinais adquiridos, optou-se pelo desenvolvimento de eletrodos ativos com a utilização de amplificador de instrumentação de alta precisão INA128 da Burr-Brown. Para tratamento dos sinais, foi elaborada uma placa de condicionamento de três canais com filtros, amplificadores, ajuste de offset e retificação em cada um dos canais e mais o circuito de referência. Para digitalização dos sinais EMG, optou-se pela utilização da plataforma Arduino. Os resultados obtidos atenderam às expectativas, tanto no aspecto da precisão quanto no aspecto da repetibilidade dos sinais, com relação aos movimentos das mãos

Palavras-chave: Eletromiografia. EMG. Eletrodo Ativo. Prótese de Membro Superior.

Electromyographic (EMG) signals are generated by muscle activity, obtained by electronic circuits with the use of electrodes. These signals can be used in medicine for treatment and rehabilitation, in the sports area for training of high performance athletes and also for applications in prosthetics. This paper presents the design of an EMG signal acquisition system surface on the forearm, aiming at controlling hand prosthesis. In order to achieve greater fidelity in received signs, we have opted for the development of active electrodes by using INA128 instrumentation amplifier, Burr-Brown. For the treatment of the signs, we have prepared a conditioning board with three channels: filters, amplifiers, offset adjustment and rectification in each channel plus the reference circuit. For digitization of EMG signals, an Arduino platform was chosen. The results met the expectations both in the accuracy and in the repeatability aspects of the signals with respect to the hand movements.

Keywords: Electromyography. EMG. Active Electrode. Upper Limb Prosthesis.

1 INTRODUÇÃO

A Eletromiografia é o estudo das funções musculares através da análise dos sinais elétricos emitidos pelas fibras musculares. Esses sinais elétricos são gerados a partir da diferença de fluxo de íons através da membrana das células musculares, o que ocasiona diferença de potencial elétrico. Os sinais eletromiográficos (EMG) podem ser captados por meio de eletrodos colocados sobre da pele e esses sinais são de frequências baixas de até 500Hz e amplitudes variando entre 50µV a 5mV. Tais sinais são grosseiros devido à captação da soma das atividades de um grupo de músculos ou de todo o músculo além das interferências externas (ALMEIDA, 1985).

O estudo dos sinais EMG e suas aplicações no desenvolvimento de próteses é de fundamental importância na vida das pessoas que sofreram amputações dos membros superiores ou inferiores. A reabilitação dessas pessoas com a utilização desses equipamentos traz uma melhoria na sua qualidade de

vida e permite também a reinserção delas no mercado de trabalho.

O objetivo geral desse projeto é de desenvolver um sistema de captura de sinais EMG utilizando sensores ativos de superfície, com condicionamento dos sinais por meio de filtros ativos, associado a uma plataforma microcontrolada para atuar no controle de prótese de mão. Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram estabelecidas e cumpridas as metas relacionadas a seguir:

- a) Viabilizar a utilização de eletrodos circulares descartáveis acoplados diretamente à placa de circuito impresso, montados com componentes SMD (Surface Mount Device);
- b) Desenvolver três circuitos de aquisição de sinais, obtendo assim três canais de captação de sinais EMG;
- c) Desenvolver programas para a plataforma Arduino utilizando Open Source colaborativos, para processar

¹ - Mestre em Automação e Controle de Processos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. <albertotsuda@yahoo.com.br>
² - Mestre em Automação e Controle de Processos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.
³ - Professor do IFSP - Doutor em Sistemas Automáticos e Microeletrônicos pela Universidade de Montpellier II, França.

- os sinais EMG digitalizados para reconhecer padrões;
- d) Converter os sinais interpretados em comando para dispositivos atuadores.

O método aqui apresentado consiste em extrair as informações de controle dos sinais EMG, obtidos através do uso de sensores de superfície ativos, que após serem amplificados e filtrados, deverão passar por um processo de reconhecimento de padrões e convertidos em informações codificadas que irão acionar cada um dos atuadores da "mão".

Dentre as principais etapas deste projeto estão: a captação e o condicionamento dos sinais EMG com circuitos confeccionados e montados de forma personalizada, a digitalização e processamento dos sinais para reconhecimento de padrões e a identificação desses padrões de acordo com os movimentos desejados com o acionamento de sinalizadores para representação visual desses movimentos.

O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) possui um projeto no Laboratório de Robótica e Reabilitação (LABORE), que consiste no desenvolvimento de mão robótica utilizando de recursos de prototipagem rápida, que será capaz de executar a maioria dos movimentos de um membro original. Portanto o desenvolvimento deste trabalho contribuirá significativamente para o andamento do LABORE.

2 DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa deste projeto foi o desenvolvimento de um equipamento com maior qualidade na captação de sinais EMG em relação a trabalho realizado anteriormente na instituição (MARTINS, 2012). Esta etapa teve como proposta principal a confecção de um eletrodo ativo compacto, com realização de testes visando ao máximo de desempenho com mínimo de componentes.

Os eletrodos ativos, ao contrário dos passivos, possuem circuitos amplificadores, sendo que, nesses circuitos, normalmente, são utilizados amplificadores diferenciais de instrumentação e, portanto, os eletrodos nessa aplicação são bipolares. (DELSYS INC, 1996).

A etapa seguinte foi o desenvolvimento de um circuito condicionador de sinais, cujo objetivo foi o de obter sinal retificado, com amplitudes na faixa de 0 a 5V, livre de interferência de fontes externas e sem a presença de sinais de frequência fora da faixa de análise. Uma fonte de ruído muito comum que infelizmente se encontra dentro da faixa de frequência utilizada em eletromiografia é a interferência provocada pela rede elétrica. Para este problema foi desenvolvido um circuito de filtro tipo *Notch*.

Para a etapa de digitalização e processamento de sinais, optou-se pela utilização da plataforma Arduino, por ela ser amplamente conhecida e ter grande disponibilidade de recursos de *Software* e de *Hardware*, permitindo assim uma redução nos custos e aumento na utilização dos recursos disponíveis para essa plataforma.

A plataforma Arduino foi utilizada na etapa de conversão do sinal analógico para o digital, processo este conhecido como ADC (Conversor Digital Analógico).

O Arduino com amostragem de 10kHz, atende com sobras, aos requisitos do projeto quanto à velocidade de conversão A/D. Segundo teorema de Nyquist, para uma recuperação correta do sinal, a frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal. Portanto como os sinais EMG possuem uma faixa de frequência significativa de até 500Hz, o Arduino pode trabalhar com três canais AD ao mesmo tempo sem violar o teorema.

Após a digitalização, o processo de reconhecimento de padrões dos sinais foi realizado detectando-se os valores das suas amplitudes e acionando um LED para cada nível de tensão pré-estabelecido.

Esses níveis de tensão são obtidos com o uso de valores que são resultados da aplicação do algoritmo de filtragem apresentado na equação 1.

$$Y_2 = (0,1 * X) + (0,9 * Y_1) \quad (1)$$

Sendo: Y_1 Resultado anterior, Y_2 próximo resultado, X dado novo.

Para cada sensor, é feita uma média ponderada entre a última amostra e o conjunto das amostras anteriores, para atenuar variações rápidas. O gráfico da Figura 10 apresenta a curva em azul que representa as amostragens e a curva vermelha representa o comportamento da média ponderada.

2.1 ELETRODO ATIVO

O eletrodo ativo consiste em circuitos eletrônicos colocados junto à região de captação de sinais, onde é necessário um emprego mínimo de componentes e que eles tenham tamanho reduzido. Optou-se, portanto pela utilização de componentes com encapsulamento do tipo SMD. Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados eletrodos circulares descartáveis de uso comum em eletrocardiogramas e que são de fácil aquisição em lojas de materiais hospitalares. Foi adotada a distância entre os eletrodos de 20mm, de acordo com a recomendação do SENIAM - *Surface EMG for a Non-Invasive Assessment of Muscles* - conforme apresentado na figura 1.



Figura 1 - Distância recomendada pela SENIAM

2.2 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO

Para desenvolvimento e simulação dos circuitos, optou-se pela utilização do *Software Proteus* versão 7.7, da Labcenter Eletronics, e para o projeto da placa de circuito impresso foi utilizado o Ares também do mesmo fabricante. Para simulação do circuito pré-amplificador foi utilizado o software Multisim versão 11.0 da empresa National Instruments.

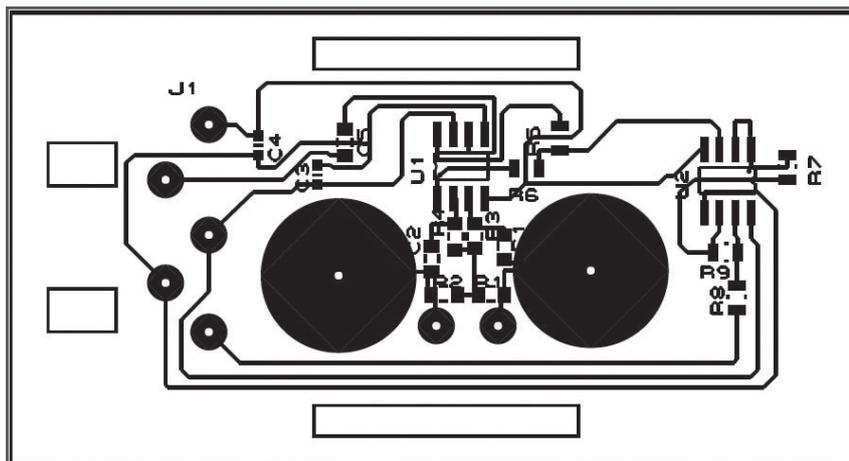


Figura 4 - Layout placa pré-amplificadora - versão final

2.3 DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Os circuitos eletrônicos deste projeto são constituídos por três partes: pré-amplificador, amplificador e microcontrolador. O pré-amplificador é formado por um amplificador de instrumentação e um circuito de referência. Associados ao amplificador estão os filtros ativos. No microcontrolador, são utilizados os recursos de conversão de analógico para digital e principalmente rotinas de programação para detectar padrões cujo objetivo é de reconhecer sinais que correspondam a movimentos pré-estabelecidos. Os padrões são determinados pelas características dos três sinais no momento do acionamento da mão. Para cada movimento, os conjuntos de valores médios capturados tornam-se referência para interpretação do movimento de cada indivíduo.

Nos eletrodos ativos, mostrado na figura 3, observa-se a presença de uma placa com circuito eletrônico junto a eles. Tal circuito tem a função de realizar uma pré-amplificação dos sinais EMG, o que permite uma maior imunidade ao ruído captado pelo próprio condutor.

Na confecção da PCI (Placa de Circuito Impresso) pré-amplificadora, optou-se pela elaboração de placa que pudesse acoplar os eletrodos nela própria. Por esse motivo, o *layout* da placa teve que ser criteriosamente estudado para obter uma perfeita distribuição dos componentes, permitindo a acomodação direta do eletrodo na placa respeitando o espaçamento e as dimensões recomendadas e também permitir uma conexão elétrica confiável. Na figura 4, tem-se o *layout* da placa versão final.

2.3.1 MONTAGEM DO PRÉ-AMPLIFICADOR

Podem-se comparar visualmente sistemas de eletrodo passivo e sistemas de eletrodo ativo, uma vez que os eletrodos passivos, apresentados na figura 1 não possuem nenhum circuito eletrônico acoplado, portanto existe apenas uma superfície metálica para aquisição dos sinais. Os sinais de baixa amplitude captados pelos eletrodos precisam percorrer toda a extensão do cabo até chegar à placa. Durante esse trajeto, o sinal EMG (Eletromiográfico) pode ser afetado por ruído captado pelo próprio condutor.

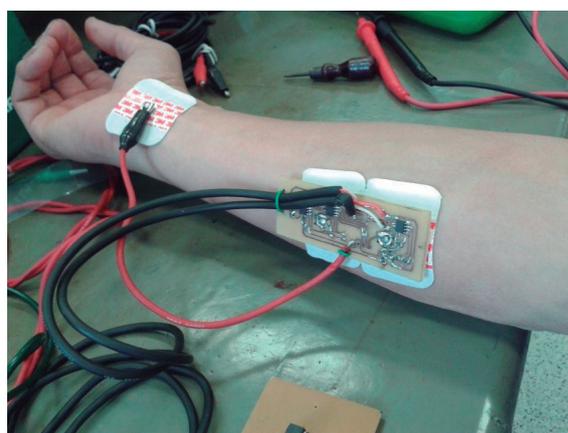


Figura 3 - Placa pré-amplificadora - primeira versão em teste

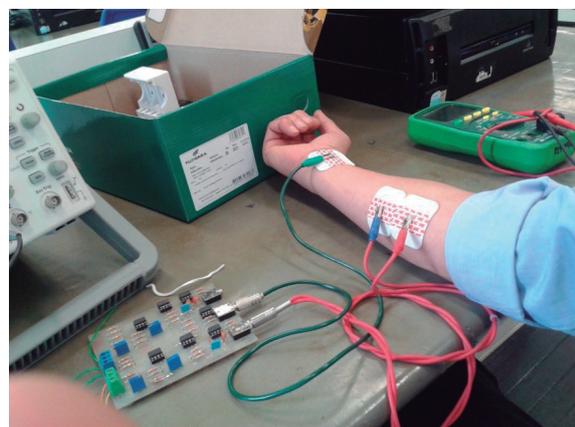


Figura 2 - Sistema de aquisição EMG passivo (MARTINS, 2012)

Na figura 5 tem-se o esquema elétrico de uma placa modificada, com a introdução de um circuito que tem a função de casar a impedância do circuito de entrada do pré-amplificador com a impedância composta pela pele e o gel condutor. Com a adoção desse circuito, obteve-se um sinal mais consistente (repetitivo).

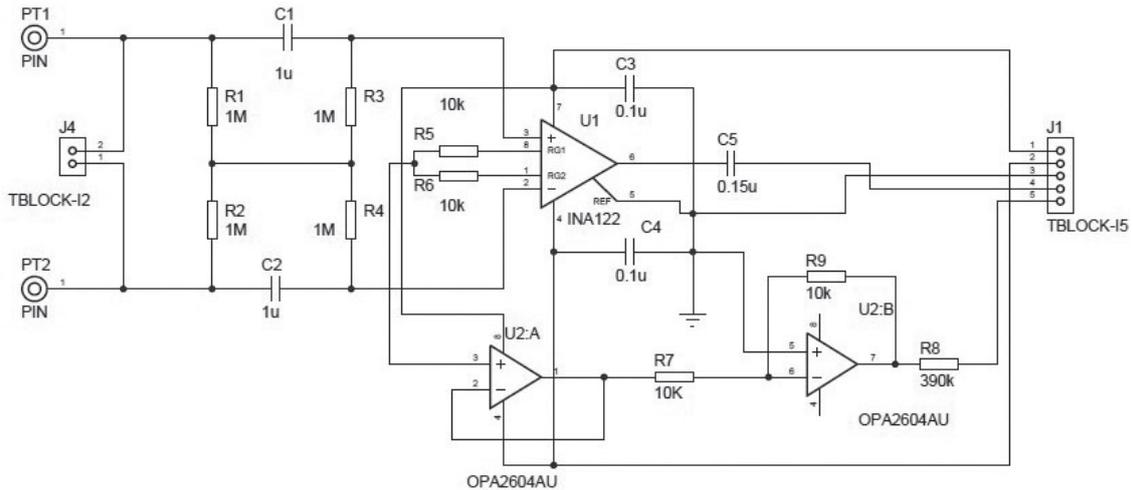


Figura 5 - Circuito Pré-Amplificador - versão final

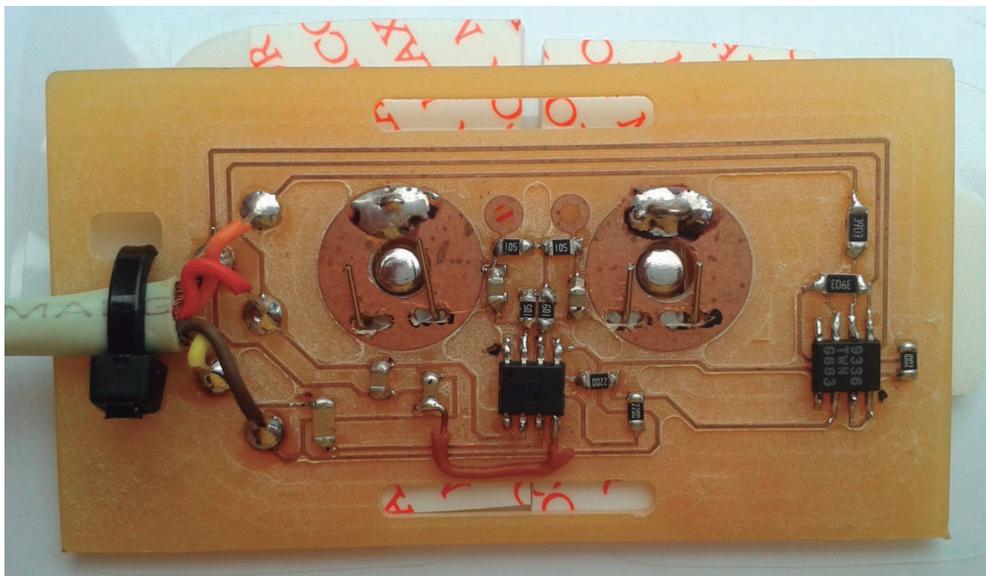


Figura 6 - Placa pré-amplificadora versão final

Na figura 6 é apresentada uma foto da placa pré-amplificadora montada com componentes SMD, onde pode ser vista com detalhes a fixação dos eletrodos descartáveis por meio de hastes de metal. A haste é dobrada ao meio e soldada na placa com as extremidades livres e a base do eletrodo é colocada sob pressão entre as duas barras da haste, para se obter um contato adequado entre a placa e o eletrodo.

Por se tratarem de testes iniciais, o músculo escolhido para esses testes foi o músculo flexor ulnar do carpo. O objetivo principal nesses testes foi de verificar a funcionalidade dos eletrodos ativos e realizar comparações com relação aos resultados das placas anteriores.

2.3.2 MONTAGEM DA PLACA CONDICIONADORA

Uma vez concluída a etapa de desenvolvimento dos sensores ativos, na próxima etapa decidiu-se pelo desenvolvimento da placa condicionadora.

A placa condicionadora é considerada a placa principal do sistema de aquisição de sinais EMG. Essa placa é constituída dos seguintes circuitos: filtro passa alta, filtro passa baixa, filtro Notch, amplificador, ajuste de *bias* ou *offset* e retificador.

Utilizando a figura 7 para identificação de cada estágio da placa amplificadora e filtro, têm-se os seguintes circuitos: primeiro estágio é o circuito de filtro ativo passa alta topologia Sallen Key, com frequência de corte de 24,87Hz, que é constituído pelo amplificador operacional U1A, com os capacitores C1 e C2 e resistores R1 e R2, o segundo estágio é o circuito de filtro ativo Sallen Key, passa baixa com frequência de corte de 603,17Hz, que é constituído pelo amplificador U1B, resistores R3 e R4 e capacitores C3 e C4, o terceiro estágio é o circuito denominado filtro *Notch*, com frequência de rejeição de 60Hz, constituído pelos amplificadores operacionais U1C e U1D, pelos *trimpot* RV3, RV4, RV5 e RV6 e pelos capacitores C5, C6, C7 e C8, o quarto estágio é o estágio

de amplificação que é constituído pelo amplificador operacional U2A, pelos resistores R8, R9 e R10 e pelo *trimpot* RV2, o quinto estágio é o circuito de ajuste de *bias* ou *offset* que é constituído pelo amplificador operacional U2B, pelos resistores R11 e R12 e pelo *trimpot* RV7, e finalmente o sexto e último estágio o circuito retificador constituído pelos amplificadores operacionais U2C e U2D, pelos resistores R14, R15, R16 e R17 e pelos diodos D1 e D2. A placa montada com três canais na sua versão final, é apresentado na Figura 7.

2.3.2 SISTEMA COMPLETO

Após o desenvolvimeto da placa condicionadora, montou-se um sistema completo com a utilização de uma plataforma Arduino Mega, cuja placa é baseada em um microcontrolador ATmega 2560, com 256K de memória de programa, e cristal oscilador de 16MHz, e uma placa com leds servindo como atuadores para permitir a visualização dos resultados, conforme apresentado na figura 8.

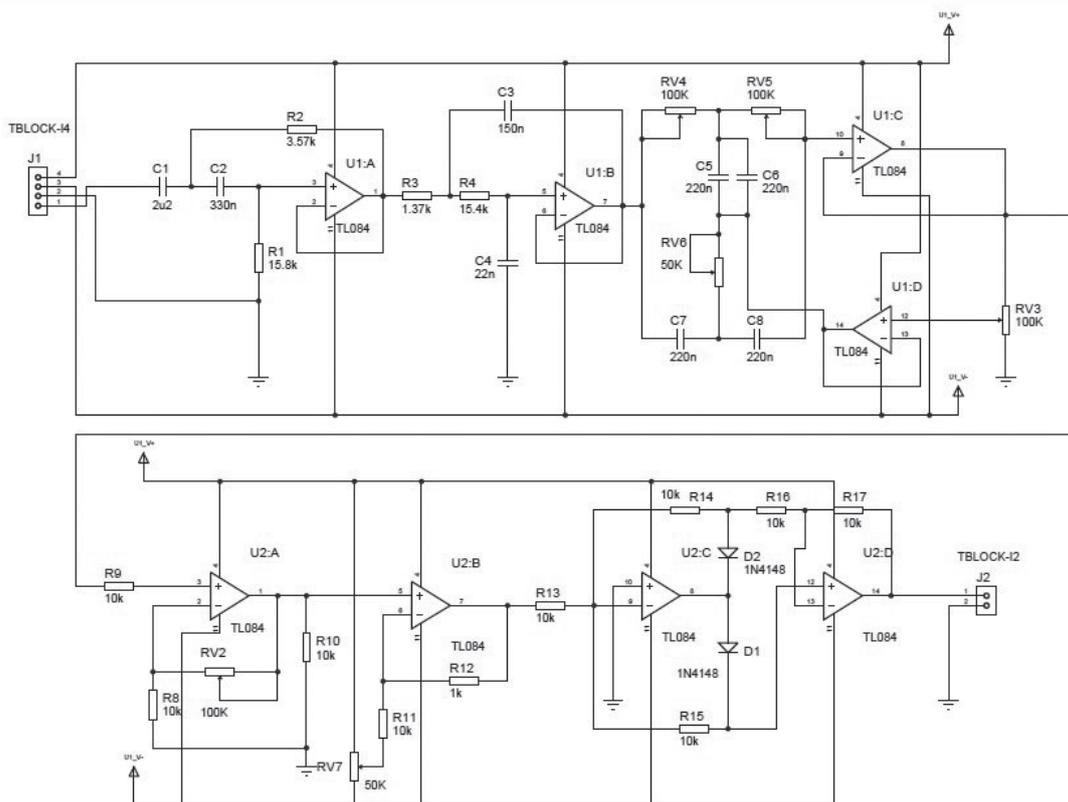


Figura 7 - Circuito amplificador com um canal – versão final

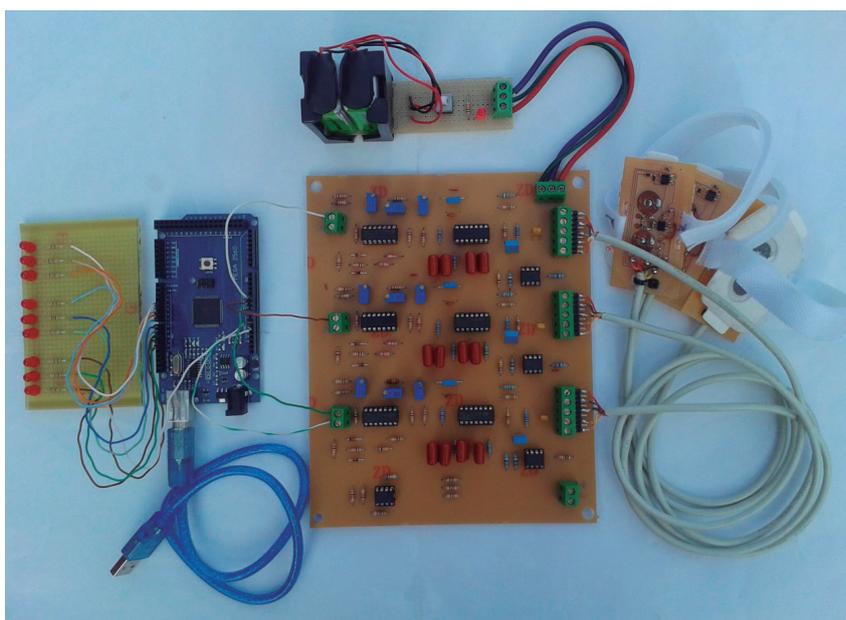


Figura 8 - Sistema completo

4 RESULTADOS

A fase de teste do sistema foi dividido em três etapas: primeira etapa, consistiu na verificação do funcionamento dos sensores ativos, a segunda etapa, na obtenção do sinal de acionamento dos atuadores (LEDs) por meio da utilização de algoritmos e na terceira etapa o mapeamento dos sensores no antebraço e monitoramento dos três canais simultaneamente.

Na etapa de verificação do funcionamento dos sensores ativos, os resultados são apresentados na figura 9.

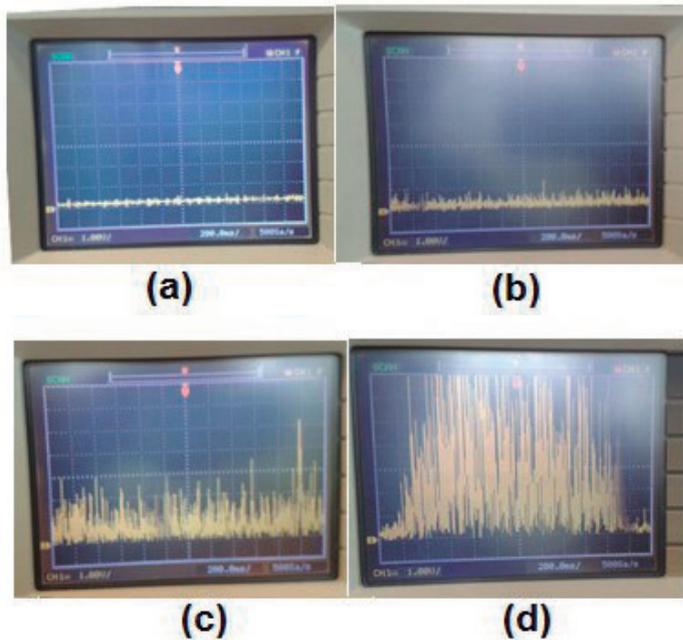


Figura 9 - Sinais EMGs no osciloscópio para ajuste de amplitude

- a) Representa o braço sem o acionamento.
- b) O braço está sendo acionado porém ainda sem resultar nos movimento das mãos.
- c) Indica a atuação da mão no movimento de fechamento.
- d) Corresponde a uma mão fechada e com esforço simulando o aperto de um objeto.

Esse ensaio foi realizado mais de 20 vezes obtendo as mesmas formas de onda em todos os testes realizados.

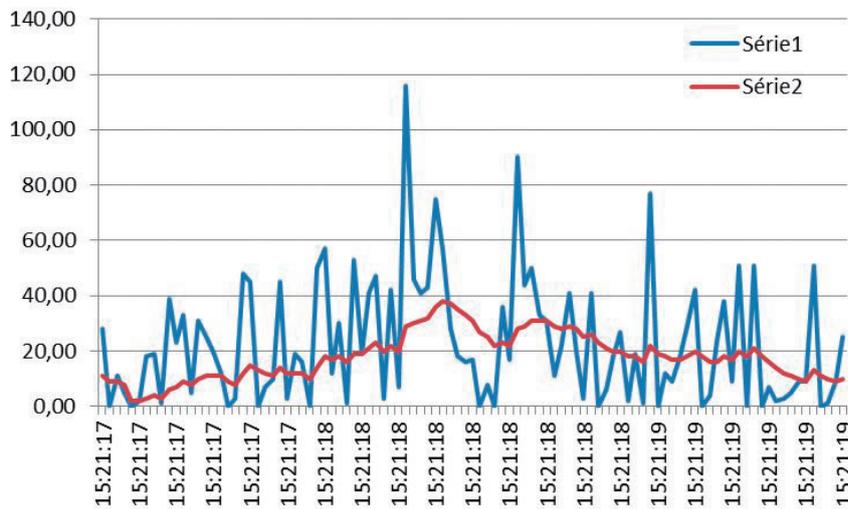


Figura 10 - Gráfico de simulação do algoritmo

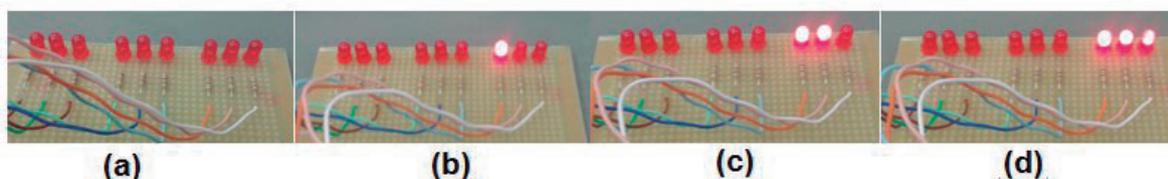


Figura 11 - Acionamento dos leds indicativos de amplitude dos sinais EMG

Na etapa de acionamento dos LEDs foi montado uma plataforma de teste com um conjunto de três LEDs para cada canal, conforme mostrado na figura 10 e foi desenvolvido um programa para o controle do acionamento dos LEDs, onde foi utilizado o algoritmo mostrado na equação 1, para obter a média dos valores, e com isso obter uma estabilidade maior nos resultados. Para o teste do algoritmo foi utilizado o programa PLX – DAC da empresa ParalLax Inc. com interface com Excel da empresa Microsoft, cuja tela de trabalho é apresentado em detalhes na Figura 9. Nesse gráfico eixo Y é representado em valores convertidos para o binário na faixa entre 0 a 1024, o eixo X representa a linha do tempo com intervalos aproximado de 10ms a cada amostragem. Os valores apresentados no eixo x correspondem a hora, minutos e segundos não aparecendo portanto os milissegundos. A curva azul representa os valores instantâneos obtidos diretamente do sinal EMG e convertido para o digital, e a curva vermelha representa a média dos valores obtidos com o uso do algoritmo. Analisando as duas curvas é possível concluir de que a curva da média corresponde a média do comportamento da curva azul e, além disso, apresenta uma estabilidade maior.

Com o sistema completo com três LEDs para cada canal montado na placa, foi realizado o ajuste de amplitude por meio do ajuste de ganho na placa amplificadora e no Arduino por meio da definição das três faixas para o acionamento dos LEDs. Este procedimento foi adotado em cada um dos três canais. A figura 11 apresenta no LEDs o resultado de quatro estados de acionamento dos músculos do braço:

Para visualizar as quatro situações, foi utilizado o Arduino com um programa que realiza a conversão dos sinais analógicos em digitais e seleciona os níveis por meio de três faixas de valores que foram ajustados para obter uma resposta compatível com os níveis apresentado no osciloscópio conforme mostrado na Figura 9. Foi realizado teste em apenas um dos canais, sendo que cada canal é composta de três LEDs. As letras abaixo das figuras indicam as mesmas situações descritas na figura 9.

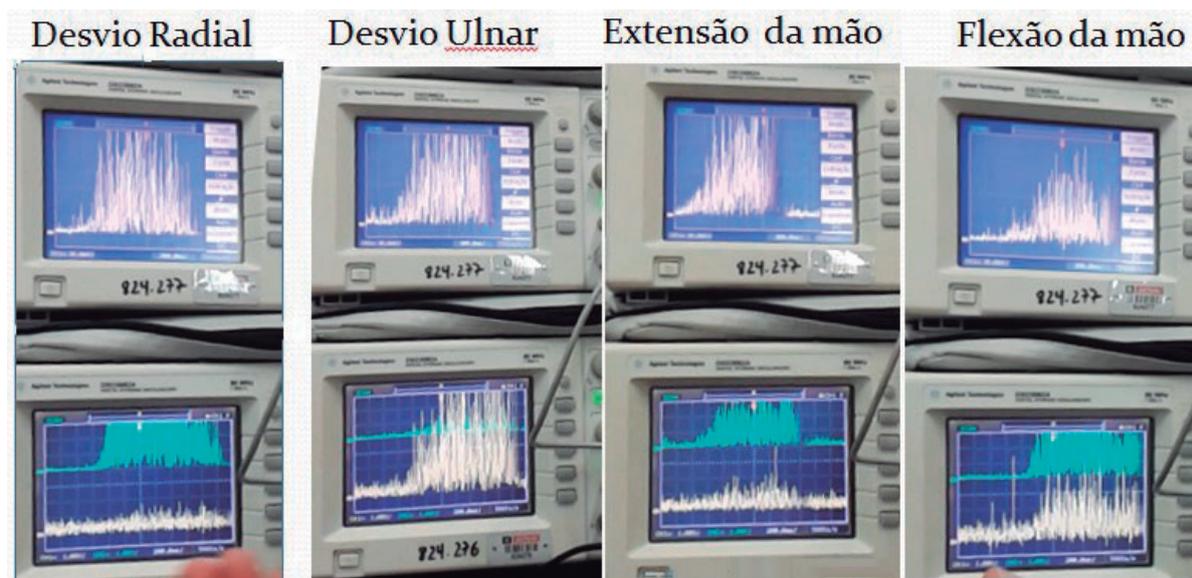


Figura 12 - Monitoramento simultâneo de três canais com diferentes movimentos

A figura 12 apresenta os ensaios realizados com os três canais sendo monitorado simultaneamente por meio de dois osciloscópios. No canal de baixo foi colocado o eletrodo no músculo flexor ulnar do carpo, no canal do meio (na cor verde) foi colocado o eletrodo na posição flexor radial do carpo, e no canal de cima foi colocado o eletrodo no músculo extensor dos dedos. Foi registrado o comportamento dos três canais (músculos) referente a quatro movimentos que estão indicados na parte superior da figura 12: Movimento desvio radial, onde se verifica atividades eletromiográficas intensas nos músculo flexor radial do carpo e extensor dos dedos. Movimento desvio Ulnar, onde se verifica atividades eletromiográficas intensas nos flexor ulnar do carpo e extensor dos dedos. Movimento extensão da mão, onde se verifica atividades eletromiográficas média no músculo flexor radial do carpo e intensa no extensor dos dedos. Movimento flexão da mão onde se verifica atividades intensas nos três músculos.

Para maior estabilidade mecânica no contato entre eletrodo e pele, na aquisição de sinais EMG, optou-se pela utilização de pulseiras de velcro o que permitiu obter uma melhor fixação das placas pré-amplificadoras, detalhe é mostrado na figura 13.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do projeto, verificou-se a uma grande quantidade de informações em artigos, livros, teses e sítios na Internet sobre a eletromiografia e controle de prótese de membro superior. Observou-se, porém, uma escassez de fabricantes no mercado nacional que produzam produtos voltados para essa área.

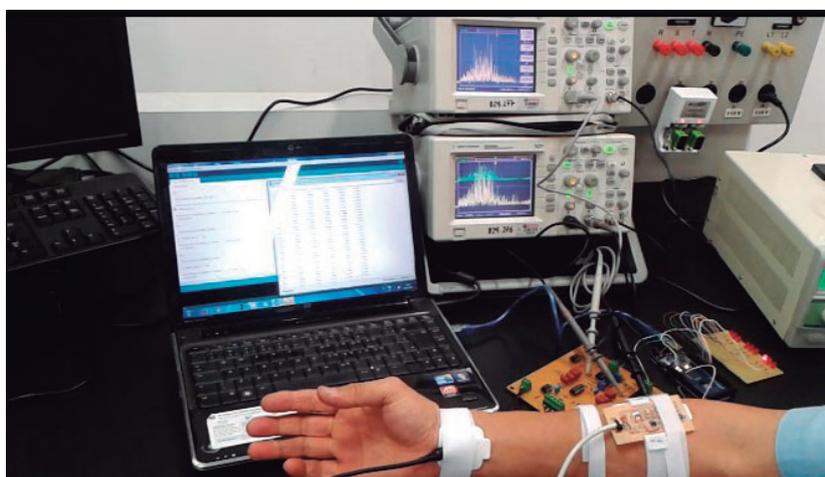


Figura 13 - Monitoramento simultâneo de três canais

Aplicando esses conhecimentos na prática, por meio desenvolvimento de circuitos eletrônicos, realizando testes e aplicando algoritmos para obtenção de padrões, constatou-se que vários fatores são importantes para chegar a um resultado satisfatório. Por exemplo, os cuidados com a superfície da pele, importante no sentido de diminuir a impedância de interface pele e eletrodo, também limpeza prévia do local de teste além da eventual depilação ou até mesmo a esfoliação.

Além desses cuidados, foi utilizado um circuito de casamento de impedância com o objetivo de se obter uma condição de máxima transferência dos sinais EMG entre a pele e a entrada do amplificador de instrumentação. Outro cuidado que se deve ter é o ruído provocado pela instabilidade de contato entre a placa, eletrodo e a pele. Para isso, deve-se ter o cuidado de se obter uma boa fixação do eletrodo na placa e também do conjunto eletrodo placa com a superfície da pele.

Os resultados deste trabalho, mostraram uma evolução em relação aos resultados obtidos com eletrodos passivos utilizados no trabalho anterior, ao qual este projeto dá seqüência, os eletrodos ativos

utilizando eletrodos descartáveis se mostraram como uma boa opção para coleta de sinais EMG. Para trabalhos futuros, pode-se desenvolver uma pesquisa para utilização de eletrodos de AgCL não descartáveis.

Os filtros e o amplificadores utilizados neste projeto foram calculados de tal forma que permitiram a obtenção de sinais compatíveis com a entrada AD do Arduino, isto é sinal original, retificado, com *offset* ajustado e a amplitude dentro da faixa TTL de 0V até 5V.

Os testes realizados para a identificação de padrões por meio do monitoramento dos três canais simultaneamente ficou dentro da expectativa, ou seja, a partir desta plataforma, poderão ser desenvolvidos trabalhos para o acionamento dos atuadores de prótese de mão.

Para trabalhos futuros, na etapa de reconhecimento dos padrões, poderão ser utilizados algoritmos implantados por controle não convencional, por exemplo, rede neural artificial (ANN) ou Lógica Fuzzy. Estes algoritmos poderão ser previamente simulados no MATLAB, para permitir que finalmente sejam implantados em um software supervisorio proprietário. Para sinais de entrada, poderá ser considerada a integral da envoltória dos sinais EMGs e espectro de frequência, cujo método permitirá obter informações mais consistentes para o controle da mão artificial.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A. F. **Filtragem Digital de Sinais Biomédicos**. Florianópolis. Dissertação (Mestrado) Programa de Pos-

Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

DELSYS Inc. **Tutorials & WhitePapers**: A discussion on Surface Fundamental Concepts in EMG Signal Acquisition, Disponível em: < www.Delsys.com >. Acesso em: 1996.

DELSYS Inc. Technical Note 101, EMG Sensor Placement, 2002.

DE LUCA, C. J., **Detection and Recording**, Delsys Incorporated, 2002.

DE LUCA, C. J., **Electromyography**, Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation, John Wiley Publisher Ed., 98-109, 2006.

ENGLEHART K. H. B. P. P. and Stevenson M., **Time-Frequency Representation For Classification of Transient Myoelectric Signals**, Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

MARTINS, H. M. **Plataforma de Estudos de Sinal Eletromiográfico Destinado ao Acionamento de Prótese de Mão**. Dissertação (Mestrado), Instituto Federal de São Paulo. São Paulo, 2012.

SENIAM (**Surface EMG for a Non-Invasive Assessment of Muscles**), Disponível em: < www.seniam.org >. Acesso em: 24 ago. 2014.