

Avaliação de Eletrodos para Aquisição de Sinais de Eletromiografia de Superfície e Proposição de um Novo Modelo de Eletrodo Vestível

"Evaluation of Electrodes for Surface Electromyography Signal Acquisition and Proposal of a New Wearable Electrode Model"

L. C. A. V. de Biassio¹, T. S. Dias², J. J. A. Mendes Junior³

RESUMO

Neste estudo, foram avaliados quatro tipos de eletrodos para aquisição de sinais de Eletromiografia de Superfície (sEMG) com foco na potência do sinal (RMS), na complexidade do sinal (WL) e relação sinal ruído (SNR). Os eletrodos testados incluíram modelos descartáveis de cloreto de prata (AgCl), eletrodos secos de prata, eletrodo de silicone-carbono e um eletrodo vestível de tecido condutivo, proposto neste trabalho. A avaliação foi realizada durante movimentos de fechamento da mão com uma carga constante. Os resultados indicaram que os eletrodos de AgCl apresentaram a melhor clareza de sinal, enquanto os eletrodos secos de prata e o eletrodo de tecido condutivo demonstraram desempenho promissor. Os eletrodos de silicone-carbono apresentaram as menores SNR, porém, podem ser utilizados para determinadas aplicações. Este estudo destaca o potencial do eletrodo de tecido condutivo como uma opção viável, especialmente para aplicações vestíveis devido à sua facilidade de uso e conforto.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrodos, Eletromiografia de Superfície, Tecido Condutivo

ABSTRACT

In this study, four types of electrodes were evaluated for Surface Electromyography (sEMG) signal acquisition, focusing on signal power (RMS), signal complexity (WL), and signal-to-noise ratio (SNR). The tested electrodes included disposable silver chloride (AgCl) models, dry silver electrodes, silicone-carbon electrodes, and a wearable conductive fabric electrode proposed in this work. The evaluation was carried out during hand closing movements with a constant load. The results indicated that AgCl electrodes provided the clearest signal, while dry silver electrodes and the conductive fabric electrode showed promising performance. Silicone-carbon electrodes had the lowest SNR but may still be suitable for specific applications. This study highlights the potential of the conductive fabric electrode as a viable option, especially for wearable applications due to its ease of use and comfort.

KEYWORDS: Electrodes, Surface Electromyography, Conductive fabric

INTRODUÇÃO

Dentro do campo da engenharia biomédica, há uma crescente busca por maneiras mais eficazes de medir os diversos biopotenciais disponíveis. Isso implica na necessidade de aprimorar a aferição, reduzindo ruídos, aumentando a velocidade e proporcionando maior conforto aos usuários ou pacientes durante a aquisição de biopotenciais (ACAR, 2019). Nesse esforço de melhoria, muitas vezes, os eletrodos, que representam o

¹ Bolsista da CAPES. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: lorenzobiassio@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 0947263554165454.

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: tsimoesdias@gmail.com. ID Lattes: 9937150277348072

³ Docente no Departamento de Eletrônica (DAELN). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: jjjunior@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920188611669631.

primeiro ponto de contato entre os seres humanos e a eletrônica, acabam sendo relegados a um segundo plano, enquanto os principais focos de atenção recaem sobre o desenvolvimento de novos circuitos eletrônicos e novos sistemas de filtragem e classificação via software.

Dentro os biopotenciais, se destaca a eletromiografia de superfície (sEMG). Esta técnica está relacionada com a aquisição, processamento e aplicação dos sinais obtidos pelos músculos esqueléticos (MENDES, 2020), e possui aplicações voltadas para reconhecimento de gestos, verificação de atividade muscular, sistemas de reabilitação, entre outros. Entretanto, quando são feitas aquisições de sinais de sEMG em trabalhos nessa linha de pesquisa, geralmente são utilizados eletrodos descartáveis. Além disso, muitas vezes o modelo, a construção e o tipo do eletrodo não são mencionados.

Nessa premissa, este trabalho apresenta um estudo sobre o desempenho de diferentes tipos de eletrodos de superfície voltados para a aquisição de sinais de sEMG. A comparação desenvolvida foca-se em verificação em clareza do sinal, presença de ruído e informação carregada pelo sinal de sEMG. Além disso, neste trabalho é proposto um novo tipo de construção de eletrodo vestível para aplicações envolvendo aquisições de sinais eletromiográficos. Este trabalho baseia-se nos estudos anteriores relacionados ao desenvolvimento do sistema de aquisição de biopotenciais (MENDES, 2023) e do sistema sem fio para aquisição de sinais eletromiográficos sem fio (BIASSIO 2022), previamente testados e validados em suas respectivas publicações.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram considerados quatro modelos de eletrodos, alguns com a presença de gel condutor. Os modelos de eletrodos empregados são apresentados na Figura 1, com as suas vistas superiores e inferiores. As seguintes configurações foram testadas: modelo adesivo descartável comercial de Prata/Cloreto de Prata (Ag/AgCl, Figura 1a); eletrodo seco de prata (Figura 1b); eletrodo de silicone-carbono (Figura 1c), empregado em protocolos de eletroestimulação em fisioterapia; e um eletrodo vestível construído utilizando tecido condutivo (Figura 1d).

Figura 1 - Eletrodos utilizados no teste, sendo (a) eletrodo descartável, (b) eletrodo seco de prata, (c) eletrodo de silicone-carbono, (d) eletrodo vestível usando tecido condutivo.



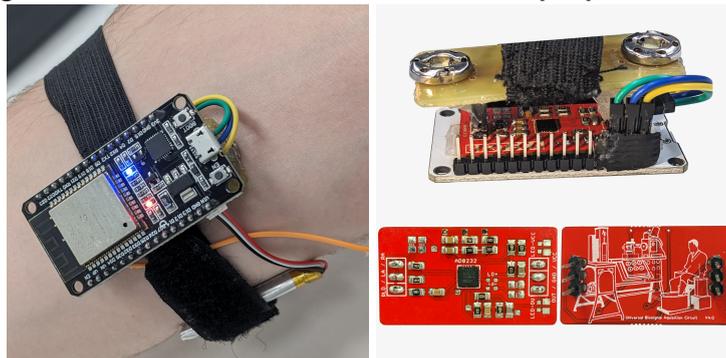
Fonte: Autoria própria

O eletrodo adesivo de Ag/AgCl (Marca Solidor, tamanho 44x32mm) foi escolhido como sinal de controle por ser amplamente utilizado em diversas aplicações de coleta de biopotenciais. Os outros eletrodos foram testados em com variações: o eletrodo seco de prata foi testado nas configurações com e sem gel condutor (Gel Condutor Mercur ®), o eletrodo de silicone-carbono foi utilizado em 2 tamanhos distintos, sendo de 10 por 10 mm

e 15 por 15 mm, apenas na configuração sem gel condutor para evitar condução eletrônica, e o eletrodo vestível foi testado sem a presença de gel condutor. Os eletrodos de silicone-carbono foram fabricados a partir de uma chapa maior de mesmo material, costurados aos botões de pressão utilizando fio de cobre exposto, costurados de tal forma que o cobre não interferisse na coleta. Os fios foram arrematados com solda de estanho para garantir mais durabilidade como observado em destaque na Figura 1b. Os eletrodos de tecido condutivo foram costurados à uma braçadeira elástica com fio condutivo de costura, e então costurados também aos botões de pressão.

Os eletrodos foram montados no sistema de aquisição apresentado nos trabalhos de (MENDES, 2023) e (BIASSIO, 2022), sendo apresentado na Figura 2. O circuito de aquisição utiliza como base o CI AD8232 e realiza a transmissão dos dados sem fio, isolando o usuário da rede elétrica e diminuindo a interferência do ruído da rede elétrica. Para realizar esta transmissão, bem como a conversão dos dados, de analógico para digital, e o empacotamento dos mesmos, foi utilizado o microcontrolador Espressif ESP32. Na interface dos eletrodos com o sistema de aquisição, foram utilizados botões de pressão de níquel (Figura 2), sendo este um método convencional para alocação dos eletrodos.

Figura 2 - Sistema de teste utilizado e destaque para o circuito



Fonte: Autoria própria

Para avaliação dos eletrodos, foi estabelecido o movimento de fechamento da mão utilizando uma carga constante equivalente a 10 kg para manter um sinal constante de ativação muscular. Dessa forma, o dispositivo foi alocado na região do antebraço sobre o músculo flexor profundo do braço (Figura 2), sendo feitos movimentos de abertura e fechamento da mão, sendo feita a aquisição de 25 movimentos para cada tipo de eletrodo para um voluntário. O eletrodo de referência foi alocado usando um eletrodo descartável na região do cotovelo. O desenvolvimento e o teste do sistema de aquisição possui aprovação pelo Comitê de Ética de Pesquisa em Seres Humanos da UTFPR (a coleta foi aprovada pelo Comitê de Ética sobre Seres Humanos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, número 2759577).

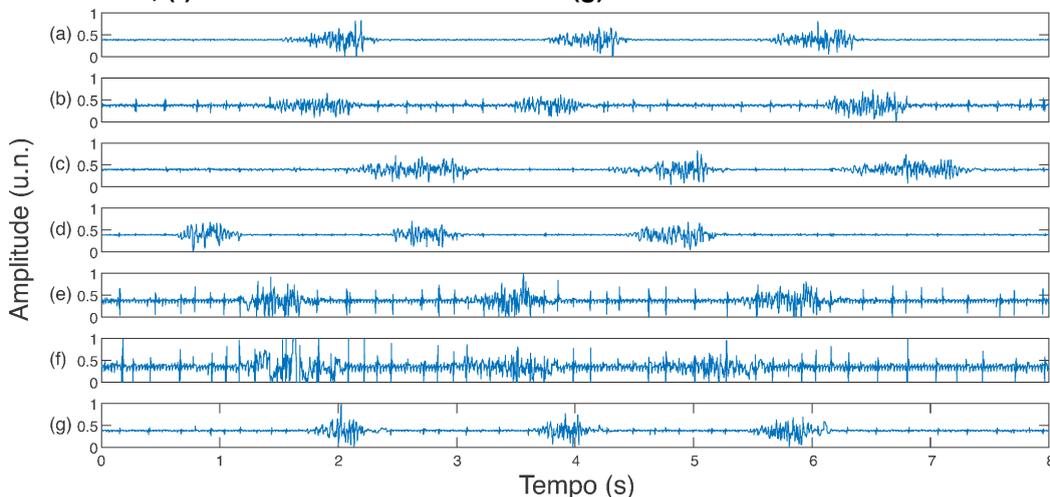
Os dados foram adquiridos por meio de um programa criado em ambiente LabVIEW. Após a aquisição de dados, os sinais foram segmentados (detectando o ativação de forma visual) e divididos em conjuntos de 300 amostras para cada sinal. Duas características foram extraídas: o valor da raiz quadrada média (*Root Mean Square*, RMS), que é um indicativo de potência do sinal de sEMG; e o valor do comprimento de onda (*Waveform Length*, WL), que mede a complexidade do sinal. Foi feito um teste

estatístico para cada grupo de características para verificar a sua similaridade, sendo este o teste de Friedman e posteriormente, o teste de multi-comparação de Tukey. Por fim, avaliou-se as relações sinal ruído (*signal noise ratio*, SNR) para todas as configurações de eletrodos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os sinais obtidos para cada uma das configurações dos eletrodos. Os eletrodos de AgCl (Figura 3a) apresentam nitidamente a maior clareza no sinal, e a menor quantidade de ruído. Isso valida a sua escolha como controle e o seu uso generalizado, como sendo a primeira escolha para a realização de uma coleta de sEMG. Um eletrodo que apresentou uma ótima clareza com baixo nível de ruído foi o eletrodo banhado em prata, na configuração seca (Figura 3 c). Pode-se notar que o gel condutor auxilia, de forma visual, na diminuição do ruído e que os demais eletrodos secos apresentam um ruído cíclico e específico. Entre os eletrodos secos e sem gel, destaca-se também o eletrodo proposto (Figura 3g) de tecido condutivo, que possui um baixo nível de ruído e aspecto semelhante ao eletrodo de controle (descartável de Ag/AgCl). Por sua vez, os eletrodos de silicone-carbono apresentaram os maiores níveis de ruído, porém, o sinal de sEMG ainda consegue ser percebido durante as contrações voluntárias.

Figura 3 - Exemplo de uma coleta envolvendo os sinais de sEMG adquiridos em unidades normalizadas (u.n.) para os eletrodos: (a) descartável de Ag/AgCl, (b) descartável de Ag/AgCl sem gel condutor, (c) seco de prata sem gel, (d) seco de prata com gel condutor, (e) Silicone-carbono de 10mm, (f) Silicone-carbono de 15mm e (g) eletrodo de tecido condutivo.

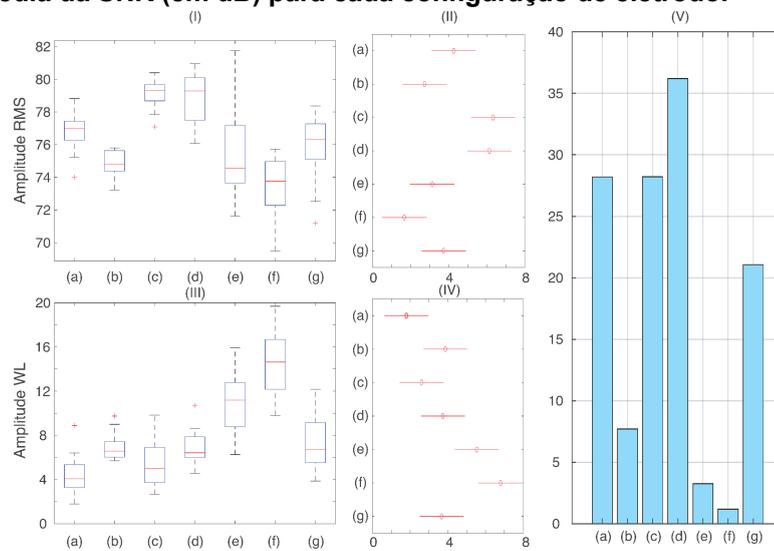


Fonte: Autoria própria

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos pelas análises do sinal de sEMG de uma forma quantitativa do que foi apresentado na Figura 3. Com relação ao parâmetro RMS, pode-se observar que as distribuições em (I) apresentaram semelhantes distribuições, com medianas próximas. Avaliando o teste estatístico (Figura 4 II), pode-se perceber que o eletrodo usado como sinal de controle (descartável de Ag/AgCl) possui distribuições semelhantes com os demais, exceto para o eletrodo de silicone-carbono de 15mm. Esse fato pode ser visto já que a distribuição em (a) não engloba os limites da

distribuição em (f). Os demais eletrodos possuíram a mesma distribuição que o sinal de controle, principalmente o modelo em tecido condutivo (proposto neste trabalho). Como RMS indica a potência do sinal de sEMG, isso significa que para aplicações envolvendo apenas a detecção do sinal de sEMG ou verificação de potência muscular, todos os demais eletrodos possuem relação com o sinal coletado pelo eletrodo descartável, excetuando o modelo em (g) devido a quantidade de ruído que apresentou.

Figura 4 - Resultados obtidos das análises, sendo (a) a (g) as configurações apresentadas na Figura 3: (I) e (III) são as distribuições envolvendo as características de RMS e WL, respectivamente, (II) e (IV) os resultados post-hoc de Tukey para teste de Friedman para as características RMS e WL; e (V) média da SNR (em dB) para cada configuração de eletrodo.



Fonte: Autoria própria

O elemento de complexidade do sinal, obtido por WL, foi o mais impactante para verificar as características específicas do sinal de sEMG. Nessa perspectiva, na Figura 4 - (III) e (IV) é perceptível uma sobreposição dos efeitos de todos os eletrodos com o sinal de controle, exceto para os eletrodos de silicone-carbono (em (e) e (f)). Ou seja, exceto estas duas configurações, todas as demais são capazes de adquirir o sinal em suas características complexas.

Os resultados apresentados na Figura 4 - (V) ressaltam que os eletrodos com a presença de gel possuem alta SNR em comparação com os modelos sem gel. Os modelos (d) e (g), que foram modelos sem gel, também apresentaram altas SNR, em especial (d), que apresentou a maior delas. O modelo descartável sem gel e os modelos de silicone-carbono apresentaram as menores SNR, o que fica perceptível nos sinais apresentados na Figura 3. Em especial, o modelo de eletrodo proposto (g) possuiu uma SNR abaixo de 6 dB do eletrodo descartável, porém, é acima de 20 dB, o que representa uma distinção entre sinal e ruído de mais de 10 vezes, demonstrando a sua possibilidade de utilização como eletrodo para sinais de sEMG.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados obtidos e do cálculo dos indicadores estatísticos, pode-se afirmar que, em geral, todos os eletrodos testados são capazes de aferir o biopotencial de sEMG. Sobre as características físicas dos eletrodos, pode-se afirmar que

para a grande maioria dos eletrodos, a aplicação de gel condutivo melhora a intensidade e reduz o ruído do sinal coletado.

Sobre os eletrodos testados, ressalta-se o resultados dos eletrodos de prata secos apresentarem o melhor SNR, indicando a possibilidade de construção de dispositivos com esse eletrodo com qualidade do sinal igual ou superior aos descartáveis (Gel AgCl), podendo ser abordado em trabalhos futuros. Com relação aos eletrodos de silicone-carbono, que mesmo possuindo grande ruído, podem ser usados para aplicações em que se deseje verificar apenas a potência do sinal ou ativação muscular.

Um grande destaque foi em relação ao eletrodo proposto, de tecido condutivo, que apresentou, visualmente e estatisticamente, potência e complexidade semelhantes aos eletrodos descartáveis (sinal de controle). Este eletrodo forneceu indícios de alta viabilidade de uso para aplicações que prezam pelo conforto do usuário, principalmente em dispositivos vestíveis, visto a facilidade de uso fornecida pela sua natureza seca, e o seu conforto, sendo construído apenas com tecido e espuma. Suas configurações e respostas para outras condições serão testadas futuramente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária e Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil.

Disponibilidade de código

Os códigos desenvolvidos utilizados para realizar a coleta de dados sem fio e realizar a visualização dos mesmos em tempo real estão disponíveis na plataforma GitHub do autor, em: <https://github.com/lorenzobiassio>.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ACAR G, Ozturk O, Golparvar A, Yapici K. **Wearable and Flexible Textile Electrodes for Biopotential Signal Monitoring: A review**. Electronics 2019, 8(5), 479.

BIASSIO L.C.A.V., DIAS T.S., MENDES J.J.A., **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema Vestível e Sem Fio para a Aquisição de Eletromiografia de Superfície**. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR 2022.

MENDES J.J.A., CAMPOS D.P., BIASSIO L.C.A.V., PASSOS P., BRONIERA P., LAZZARETTI A., KRUEGER E., **AD8232 to Biopotentials Sensors: Open Source Project and Benchmark**. Electronics 2023, 12(4), 833.

MENDES J.J.A., Agostini E., Okida S., Stevan S.L. **Circuit Design for Surface Electromyography Data Acquisition IEEE Latin America Transactions**. in IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 10, pp. 3193-3200, Oct. 2015.