

# Desenvolvimento de um Método e Software para Posicionamento Virtual de Eletrodos em Modelos Computacionais de ECG Baseados em Ressonância Magnética

Matheus Cardoso Faesy , Thaís de Jesus Soares ,  
Joventino de Oliveira Campos , Rodrigo Weber dos Santos

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

matheusfaesy@gmail.com, thais.soares@estudante.ufjf.br

joventino.campos@ufjf.br, rodrigo.weber@ufjf.br

**Abstract.** *Accurate virtual electrode placement is a key step in computational ECG modeling. In this work, we present a method and interactive software tool for positioning precordial electrodes (V1–V6) on MRI-derived three-dimensional torso meshes for ECG simulation. The proposed workflow integrates anatomical landmark registration, mesh visualization, and manual adjustment capabilities within a unified environment. To illustrate its application, we evaluated the impact of electrode positioning by comparing an automated pipeline with an expert-guided strategy in four patients with dilated cardiomyopathy. Using a common cardiac mesh and monodomain simulation framework, pseudo-ECGs were generated and analyzed through Euclidean distance, Pearson correlation, and relative root mean square error (rRMSE). The results demonstrate that geometric positioning differences, particularly in lateral electrodes, can produce non-uniform changes in ECG morphology and amplitude. These findings highlight the relevance of anatomically consistent virtual electrode placement in computational ECG workflows.*

**Resumo.** *O posicionamento virtual preciso dos eletrodos é etapa fundamental em modelos computacionais de ECG. Neste trabalho, apresentamos um método e uma ferramenta interativa para o posicionamento de eletrodos precordiais (V1–V6) em malhas tridimensionais de tórax derivadas de ressonância magnética. O fluxo proposto integra registro de marcos anatômicos, visualização de malhas e ajuste manual em um ambiente unificado. Como demonstração de aplicação, avaliamos o impacto do posicionamento comparando um pipeline automatizado com uma estratégia guiada por especialista em quatro pacientes com cardiomiopatia dilatada. Utilizando uma mesma malha cardíaca e o modelo monodomínio, foram gerados pseudo-ECGs analisados por meio de distância Euclidiana, correlação de Pearson e erro quadrático médio relativo (rRMSE). Os resultados indicam que diferenças geométricas, especialmente em eletrodos laterais, podem produzir alterações não uniformes na morfologia e amplitude dos sinais simulados, reforçando a importância do posicionamento virtual anatomicamente consistente em fluxos computacionais de ECG.*

## 1. Introdução

A eletrocardiografia (ECG) é amplamente utilizada na prática clínica e é sensível ao posicionamento dos eletrodos na superfície do tórax, podendo pequenas variações alterar a morfologia do sinal [Garcia et al. 2020].

Com o avanço da aquisição e segmentação de imagens médicas, tornou-se possível construir modelos torso-cardíacos personalizados a partir de ressonância magnética (MRI) ou tomografia computadorizada (CT), viabilizando simulações computacionais de ECG. Entretanto, o posicionamento virtual de eletrodos em malhas tridimensionais permanece um desafio devido às variações anatômicas e à necessidade de referências confiáveis.

Neste trabalho, apresentamos um método e uma ferramenta interativa para posicionamento virtual de eletrodos precordiais (V1–V6) em modelos derivados de MRI, integrados a um pipeline de simulação monodomínio. Como validação ilustrativa, avaliamos o impacto do posicionamento por meio da comparação com uma estratégia automatizada.

## 2. Métodos

Este estudo investiga duas abordagens distintas para o posicionamento de eletrodos em malhas tridimensionais de tórax, comparando seu desempenho por meio de simulações de ECG realizadas com o software MONOALG3D. As malhas foram geradas a partir da segmentação de imagens de ressonância magnética cardíaca de pacientes diagnosticados com cardiomiopatia dilatada.

**Caracterização dos Pacientes.** Foram incluídos quatro pacientes com cardiomiopatia dilatada (3 homens e 1 mulher), com idades entre 71 e 79 anos, fração de ejeção entre 20% e 34% e pesos de 54,0 a 119 kg (peso indisponível para P3).

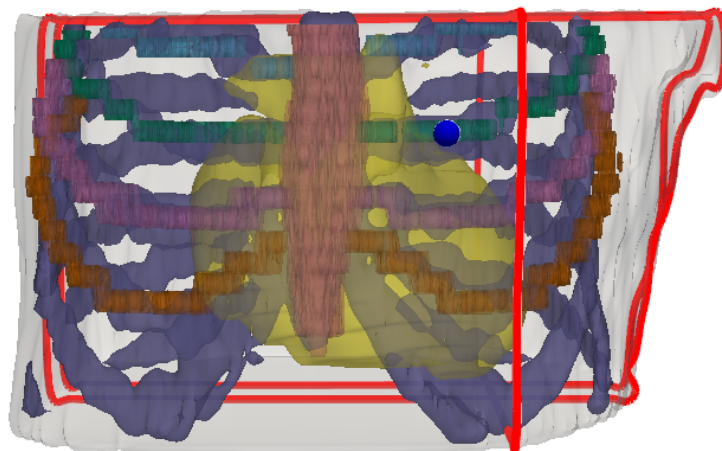
### 2.1. Posicionamento Manual dos Eletrodos

No fluxo manual, apenas o Paciente 1 possuía exame de tomografia computadorizada (CT), permitindo a segmentação da caixa torácica por meio do TOTALSEGMENTATOR [Wasserthal et al. 2023]. A caixa torácica (costelas e esterno) foram registradas ao MR utilizando o framework ELASTIX [Klein et al. 2010]. Linhas anatômicas de referência (hemiclavicular, axilar anterior e axilar média) também foram mapeadas para o MR por meio das mesmas transformações.

Para os demais pacientes, essas estruturas segmentadas foram propagadas para suas respectivas MR utilizando o mesmo pipeline de registro, fornecendo marcos anatômicos adicionais para auxiliar o posicionamento.

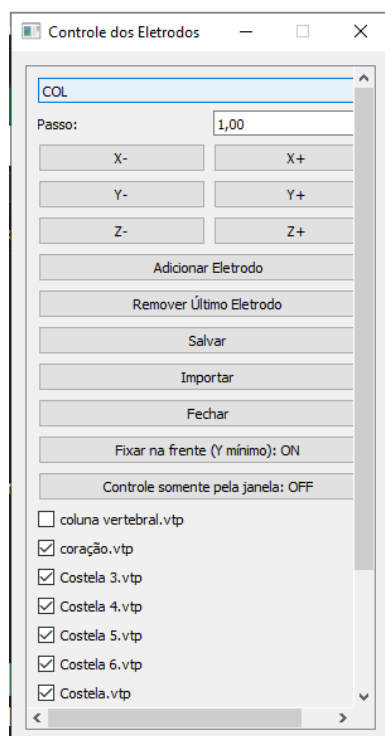
O ajuste final dos eletrodos foi realizado em uma aplicação interativa desenvolvida especificamente para este estudo, denominada *Eletrodo3D*. Implementado em Python, o software combina PyVista/VTK para visualização tridimensional e PyQt5 para construção da interface gráfica, oferecendo um ambiente integrado para inspeção anatômica e manipulação precisa das posições dos eletrodos.

A Figura 1 apresenta a janela principal da ferramenta, exibindo simultaneamente o torso segmentado, as estruturas ósseas registradas e o modelo cardíaco. Essa visualização integrada permite ao especialista avaliar as relações espaciais antes da definição das coordenadas.

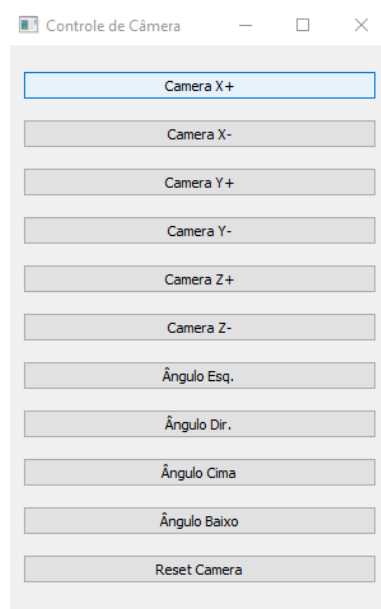


**Figura 1. Janela de visualização 3D do software, mostrando o torso segmentado, a malha óssea registrada, as linhas auxiliares e o coração.**

Além da cena tridimensional, o sistema inclui painéis auxiliares para controle dos eletrodos e navegação da câmera, conforme ilustrado na Figura 2. O painel de eletrodos permite adicionar, remover e editar posições associadas às derivações V1–V6, enquanto o painel de câmera facilita a inspeção anatômica em diferentes ângulos.



**(a) Painel de controle de eletrodos.**



**(b) Painel de controle da câmera.**

**Figura 2. Painéis auxiliares para manipulação de eletrodos e navegação tridimensional.**

Cada eletrodo pode ser ajustado interativamente no espaço tridimensional por meio de controles de translação, com armazenamento em tempo real das coordenadas.

Esse ambiente garante maior controle anatômico durante o posicionamento e maior consistência no processo manual.

2.2. Posicionamento Automático dos Eletrodos

Como estratégia de referência, foi utilizado um pipeline totalmente automatizado baseado em [Smith et al. 2024]. Nesse fluxo, as imagens de ressonância magnética são segmentadas automaticamente para obtenção do torso e do coração. A segmentação inicial do contorno corporal é realizada por redes neurais do tipo U-Net, seguida pelo ajuste de um modelo estatístico de forma (SSM), que é deformado para coincidir com a anatomia específica do paciente.

As posições dos eletrodos são inicialmente definidas no modelo médio do SSM e transformadas juntamente com a malha final, resultando em um posicionamento virtual anatomicamente consistente. Esse processo ocorre sem intervenção manual, fornecendo uma estratégia automatizada utilizada neste estudo como base comparativa.

2.3. Simulação e Análise do ECG

Para cada paciente, foi utilizada a malha cardíaca previamente segmentada, contendo os ventrículos esquerdo e direito, para simular a propagação elétrica por meio do modelo monodomínio implementado no software de código aberto MONOALG3D [Oliveira et al. 2018].

O modelo celular humano de Ten Tusscher [ten Tusscher and Panfilov 2006] foi empregado para descrever a dinâmica celular.

Uma ativação instantânea foi iniciada simultaneamente em toda a superfície endocárdica, e os sinais de ECG foram posteriormente computados nas posições correspondentes aos eletrodos.

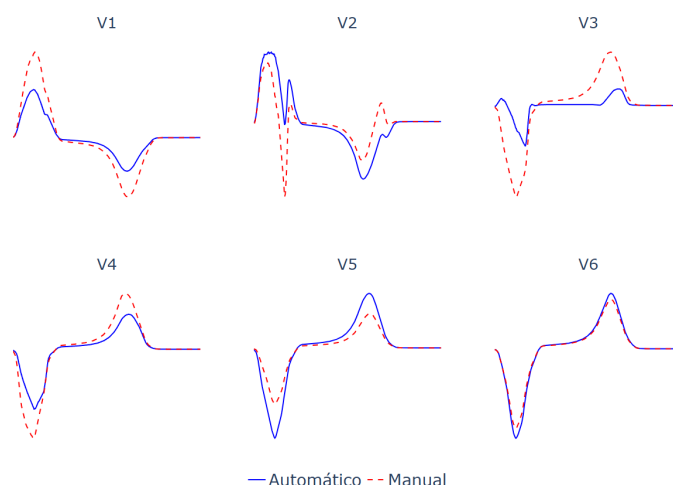
3. Resultados

As diferenças geométricas entre os posicionamentos manual e automático foram avaliadas nas derivações precordiais (V1–V6). De modo geral, observaram-se discrepâncias menores nos eletrodos centrais (V1–V4) e maiores desvios nos eletrodos laterais (V5–V6), consistentes com a maior complexidade geométrica das regiões laterais do hemitórax.

A Tabela 1 permite comparar a magnitude dos desvios entre as diferentes derivações.

Tabela 1. Diferença espacial entre posições manual e automática dos eletrodos precordiais (em cm).

| Eletrodo | P1    | P2    | P3    | P4    |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| V1       | 0.770 | 2.307 | 3.235 | 1.267 |
| V2       | 1.021 | 1.511 | 3.142 | 1.670 |
| V3       | 1.096 | 2.080 | 3.250 | 1.560 |
| V4       | 1.344 | 2.692 | 2.725 | 1.279 |
| V5       | 6.577 | 8.780 | 5.390 | 8.196 |
| V6       | 3.081 | 7.386 | 1.437 | 4.555 |



**Figura 3. Pseudo-ECGs simulados do Paciente 3 nas derivações V1–V6, comparando posicionamento automático (linha azul) e manual (linha vermelha).**

### 3.1. Comparação dos pseudo-ECGs no Paciente 3

Na Figura 3 Observa-se diferenças de amplitude e forma em várias derivações, sugerindo que deslocamentos geométricos localizados podem se traduzir em alterações não uniformes no ECG simulado, mesmo quando as diferenças espaciais são pequenas em parte dos eletrodos.

### 3.2. Métricas de similaridade

A Tabela 2 apresenta as métricas de similaridade entre os pseudo-ECGs gerados com posicionamento manual e automático para os quatro pacientes. O coeficiente de correlação de Pearson quantifica a similaridade morfológica, enquanto o erro quadrático médio relativo (rRMSE) captura discrepâncias relativas de amplitude e forma.

De modo geral, observa-se alta correlação em diversas derivações (p.ex., V1, V4 e V6), indicando preservação morfológica em parte dos casos. Entretanto, há quedas expressivas em derivações específicas (como V3 no Paciente 1 e V2 no Paciente 4), incluindo correlação negativa, consistente com inversões de polaridade. Os valores de rRMSE apresentam maior heterogeneidade, com discrepâncias elevadas em algumas derivações e pacientes, evidenciando que variações de amplitude podem permanecer relevantes mesmo quando a forma temporal é parcialmente preservada.

## 4. Discussão

A análise geométrica evidenciou maiores discrepâncias nas derivações laterais (V5 e V6), destacando a sensibilidade dessas regiões a variações anatômicas e ao processo de registro. Entretanto, os resultados também demonstram que o impacto no ECG simulado não depende exclusivamente da magnitude do erro espacial, reforçando a necessidade de inspeção anatômica cuidadosa durante o posicionamento.

Nesse contexto, a ferramenta desenvolvida neste trabalho desempenha papel central ao permitir visualização integrada do torso, estruturas ósseas e modelo cardíaco, possibilitando ajustes interativos e maior controle espacial dos eletrodos. A avaliação realizada ilustra como pequenas variações podem influenciar o sinal simulado, evidenciando

**Tabela 2. Métricas de similaridade entre posicionamento manual e automático: Pearson (linha superior) e rRMSE (%) (linha inferior), por derivação e paciente.**

| Derivação | P1                            | P2                            | P3                            | P4                            |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| V1        | 0.9999<br>15.51               | 0.9959<br>19.03               | 0.9974<br>79.51               | 0.9950<br>31.50               |
| V2        | 0.9954<br>16.47               | 0.9906<br>33.12               | 0.7434<br>66.89               | -0.7642<br>197.20             |
| V3        | 0.1021<br>218.22              | 0.9801<br>63.56               | 0.7936<br>255.67              | 0.9974<br>10.39               |
| V4        | 0.9980<br>23.26               | 0.9909<br>63.28               | 0.9841<br>58.92               | 0.9802<br>43.59               |
| V5        | 0.9821<br>33.20               | 0.8654<br>69.29               | 0.9974<br>38.91               | 0.9463<br>32.83               |
| V6        | 0.9987<br>15.30               | 0.9540<br>66.44               | 0.9998<br>10.66               | 0.9895<br>15.15               |
| Global    | <b>0.9478</b><br><b>35.61</b> | <b>0.8799</b><br><b>61.28</b> | <b>0.8696</b><br><b>70.60</b> | <b>0.5331</b><br><b>97.78</b> |

a importância de ambientes dedicados para posicionamento virtual em fluxos computacionais de ECG.

Em conjunto, os resultados indicam que soluções interativas e integradas podem contribuir para maior consistência anatômica, especialmente em regiões laterais do tórax, onde o posicionamento é mais sensível.

## Referências

- Garcia, S. L., Torres, D., Martinez, A., and Pueyo, E. (2020). Impact of electrode positioning on ecg waveforms in personalized cardiac models. *Computing in Cardiology*, 47:1–4.
- Klein, S., Staring, M., Murphy, K., Viergever, M. A., and Pluim, J. P. W. (2010). elastix: A toolbox for intensity-based medical image registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 29(1):196–205.
- Oliveira, R. S., Rocha, B. M., Burgarelli, D., Meira Jr, W., Constantinides, C., and dos Santos, R. W. (2018). Performance evaluation of GPU parallelization, space–time adaptive algorithms, and their combination for simulating cardiac electrophysiology. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 34(3):e2913.
- Smith, H. J., Rodriguez, B., Sang, Y., Beetz, M., Choudhury, R., Grau, V., and Banerjee, A. (2024). Anatomical basis of human sex differences in ECG identified by automated torso-cardiac three-dimensional reconstruction. *arXiv preprint arXiv:2312.13976*.
- ten Tusscher, K. H. and Panfilov, A. V. (2006). Alternans and spiral breakup in a human ventricular tissue model. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 291(3):H1088–H1100.
- Wasserthal, J., Meyer, M., Zimmerer, D., Segeroth, M., Full, P. M., Meine, H., and Maier-Hein, K. H. (2023). Totalsegmentator: Robust segmentation of 104 anatomical structures in ct images. *Medical Image Analysis*, 84:102680.