

Implementação de um Modelo Matemático para Geração de Sinais Analógicos de ECG Sintético Utilizando Hardware de Baixo Custo

Walmer A. Cavalcante¹, Anderson R. G. Barbosa¹,
Thiago D. Cordeiro¹, Erick A. Barboza¹

¹Instituto de Computação (IC) – Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Maceió – AL – Brasil

{wac, argb, thiago, erick}@ic.ufal.br

Abstract. *The generation of synthetic electrocardiographic signals is a promising approach to overcoming challenges in acquiring real signals, such as environmental interference, the scarcity of rare disease records, and ethical restrictions on clinical data usage. This work implements a mathematical model combined with a low-cost digital-to-analog converter, utilizing Pulse Width Modulation (PWM) and a low-pass filter. The model simulates different cardiac conditions, such as atrial fibrillation. The results confirm the fidelity of the synthetic signal, highlighting its applicability in equipment calibration, education, and the enhancement of artificial intelligence algorithms for automated diagnosis.*

Resumo. *A geração de sinais eletrocardiográficos sintéticos é uma abordagem promissora para superar desafios inerentes à obtenção de sinais reais, como interferências ambientais, escassez de registros de doenças raras e restrições éticas no uso de dados clínicos. Este trabalho implementa um modelo matemático aliado a um conversor digital-analógico de baixo custo, utilizando Modulação por Largura de Pulso (PWM) e um filtro passa-baixa. O modelo simula diferentes condições cardíacas, como fibrilação atrial (FA). Os resultados confirmam a fidelidade do sinal sintético, destacando sua aplicabilidade na calibração de equipamentos, ensino e aprimoramento de algoritmos de inteligência artificial para diagnóstico automatizado.*

1. Introdução

O eletrocardiograma (ECG) é um dos principais exames utilizados no diagnóstico de doenças cardíacas. A geração de bases de dados de ECG, públicas e privadas, é uma tarefa comum em centros de ensino e pesquisa. Por meio dessas bases, é possível compreender a variabilidade de doenças específicas em públicos específicos, estratificando indivíduos por idade, sexo e até mesmo por regiões geográficas ou fatores sócio-econômicos.

Com o avanço das técnicas de Inteligência Artificial (IA), pesquisadores vêm desenvolvendo algoritmos voltados para a classificação de doenças cardíacas. Tais métodos computacionais vêm tomando um lugar de destaque, sendo utilizados com frequência no ambiente clínico [Vasconcellos et al. 2023]. No entanto, a obtenção de sinais reais de ECG para geração de bases disponíveis para o tipo de pesquisa citada apresenta desafios,

como ruídos de interferência, escassez de doenças raras, variabilidade entre pacientes e questões éticas relacionadas ao uso de dados reais [Jiang et al. 2022].

A geração de sinais de ECGs sintéticos surge para superar essas limitações, permitindo a reprodução de sinais realistas sem necessidade de coleta de dados em humanos. Esses sinais podem ser utilizados na validação de algoritmos de processamento de sinais, melhoria no treinamento de algoritmos de IA, calibração de equipamentos médicos e até mesmo no ensino de cardiologia, criando um ambiente controlado para estudo e experimentação [Wei et al. 2012, Usta et al. 2021].

O modelo desenvolvido em [McSharry et al. 2003] é capaz de alterar a morfologia das ondas do ECG e o intervalo entre os batimentos cardíacos por meio de um sistema dinâmico de equações diferenciais, utilizando uma gaussiana para cada onda do sinal. O modelo proposto por [Wei et al. 2012] foi baseado no trabalho de [McSharry et al. 2003] e traz uma simplificação do modelo original com o objetivo de reduzir a demanda por processamento e memória, facilitando sua implementação em microcontroladores. Para isso, modifica o modelo, reduzindo a quantidade de equações necessárias para os cálculos. Já o modelo desenvolvido por [Sayadi et al. 2010] introduz uma série de melhorias em relação ao modelo desenvolvido em [McSharry et al. 2003], incluindo a separação do ECG em diferentes eventos. Além disso, propõe o uso da representação por coordenadas polares, o que traz uma simplificação do modelo e, conseqüentemente, reduz a complexidade computacional na geração do sinal. Em [Awal et al. 2021], os autores adotaram uma abordagem diferente ao representar cada onda do ECG sintético por meio de duas Gaussianas e aplicar algoritmos de otimização para ajustar os parâmetros do modelo. Essa abordagem busca trazer um método para a obtenção dos parâmetros que, nos outros modelos mencionados, ocorre de forma empírica.

Além da geração de sinais sintéticos de ECG via software, algumas pesquisas exploraram a implementação de geradores de ECG em hardware. [Jiang et al. 2022, Usta et al. 2021] destacam que geradores de ECG baseados em microcontroladores são essenciais para a calibração de equipamentos médicos e para o treinamento de profissionais de saúde. O gerador desenvolvido em [Wei et al. 2012] faz uso de uma versão simplificada do modelo do [McSharry et al. 2003], e realiza a implementação em hardware do modelo proposto. Quanto ao método empregado para gerar o sinal analógico, os trabalhos analisados adotaram duas estratégias principais: a utilização de um Conversor Digital-Analógico (DAC) ou a utilização de Modulação por Largura de Pulso (PWM) combinada com um filtro passa-baixa para realizar a conversão do sinal para analógico.

Este trabalho tem como objetivo implementar o modelo matemático de [Sayadi et al. 2010] para a geração de sinais de ECG sintéticos e realizar a sua conversão para sinais analógicos utilizando hardware de baixo custo fazendo uso de PWM em combinação com um filtro do tipo passa-baixa. A abordagem proposta caminha na direção de desenvolver uma ferramenta acessível e versátil para ser utilizada desde o ensino de diagnóstico de doenças cardíacas até mesmo para a calibração de equipamentos médicos. Além disso, discutimos a possibilidade de expandir essa tecnologia para integração com interfaces educacionais interativas e sistemas baseados em IA, principalmente para criação de estratégias de classificação e diagnóstico de doenças cardíacas.

2. Modelo Matemático para Geração de ECG Sintético

O modelo escolhido consiste no proposto por [Sayadi et al. 2010], com a possibilidade de representar ondas P e T assimétricas e permite um aumento de dimensionalidade do modelo, possibilitando uma análise individualizada de eventos acoplados do sinal de ECG. Trata-se de um modelo composto por 3 equações diferenciais que gera uma trajetória com 3 coordenadas (x, y, z) . As coordenadas x e y correspondem a um círculo de raio unitário (ciclo limite) e cada revolução neste círculo representa um batimento cardíaco. A coordenada z corresponde às variações do ECG, ou seja, às ondas P, Q, R, S e T (Figura 1).

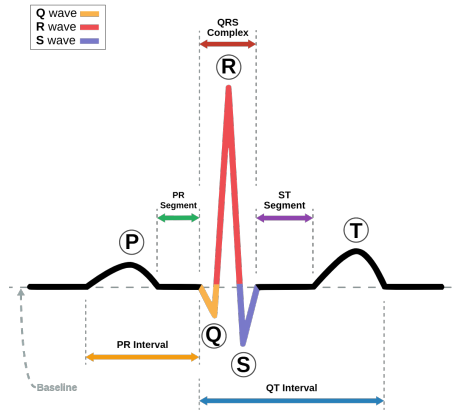


Figura 1. Sinal de eletrocardiograma, composto pelas ondas P, Q, R, S e T, ilustrando um ciclo cardíaco.

A partir do seguinte conjunto de equações diferenciais ordinárias, é possível adquirir as coordenadas do espaço tridimensional do modelo que geram o ECG sintético:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha x - \omega y \\ \dot{y} &= \alpha y - \omega x \\ \dot{z} &= - \sum_{i \in \{P, Q, R, S, T\}} a_i \Delta \theta_i \exp\left(-\frac{\Delta \theta_i^2}{2b_i^2}\right) - (z - z_0) \end{aligned} \quad (1)$$

onde a modificação da morfologia do ECG pode ser realizada por meio da alteração dos parâmetros a_i , b_i e θ_i , que permitem alterar respectivamente a amplitude, largura e posição de cada gaussiana.

A principal vantagem do modelo é gerar as chamadas formas de onda características (CWs), tais como a onda P de forma isolada do restante do ECG. Para a escolha dessas CWs, foram levados em consideração os eventos do ECG que representam a despolarização e repolarização das partes do coração. A partir disso, foi assumida a presença de três ondas características, correspondente a onda P, ao complexo QRS e a onda T. Além disso, foi adicionada mais uma gaussiana tanto para a onda P quanto para a onda T, permitindo representar ECGs com ondas P e T assimétricas.

Ainda, [Sayadi et al. 2010] fez uso da representação em coordenadas polares, fazendo com que o parâmetro ϕ seja uma variável de estado explícita para indicar a posição

angular das ondas do ECG. Assim, a representação em coordenadas polares do modelo, denominado *Wave-Based ECG Dynamical Model* (WEDM), é dada por:

$$\begin{aligned}
\dot{r} &= r(1 - r) \\
\dot{\varphi} &= \omega \\
\dot{P}(t) &= - \sum_{i \in \{P^-, P^+\}} a_i \Delta \theta_i \exp\left(-\frac{\Delta \theta_i^2}{2b_i^2}\right) - P(t) \\
\dot{C}(t) &= - \sum_{i \in \{Q, R, S\}} a_i \Delta \theta_i \exp\left(-\frac{\Delta \theta_i^2}{2b_i^2}\right) - C(t) \\
\dot{T}(t) &= - \sum_{i \in \{T^-, T^+\}} a_i \Delta \theta_i \exp\left(-\frac{\Delta \theta_i^2}{2b_i^2}\right) - T(t)
\end{aligned} \tag{2}$$

onde $\Delta \theta_i = (\varphi - \theta_i) \bmod 2\pi$, e $\omega = \frac{2\pi}{T}$ corresponde a velocidade angular da trajetória ao redor do ciclo limite. Por fim, dado que o sistema de equações (2) dá como solução as funções $P(t)$, $C(t)$ e $T(t)$, é possível gerar o ECG sintético da seguinte forma:

$$ECG(t) = P(t) + C(t) + T(t) \tag{3}$$

Visto a implementação do modelo em um microcontrolador, a variante de (2) na forma discreta, que foi proposto por [Sayadi et al. 2010], é utilizada sem a inclusão dos termos de perturbação que representariam os ruídos, dada por:

$$\begin{aligned}
\varphi_{k+1} &= (\varphi_k + \omega \delta) \bmod (2\pi) \\
P_{k+1} &= P_k - \sum_{i \in \{P^-, P^+\}} \delta a_{i_k} \Delta \theta_{i_k} \exp\left(-\frac{\Delta \theta_{i_k}^2}{2b_{i_k}^2}\right) \\
C_{k+1} &= C_k - \sum_{i \in \{Q, R, S\}} \delta a_{i_k} \Delta \theta_{i_k} \exp\left(-\frac{\Delta \theta_{i_k}^2}{2b_{i_k}^2}\right) \\
T_{k+1} &= T_k - \sum_{i \in \{T^-, T^+\}} \delta a_{i_k} \Delta \theta_{i_k} \exp\left(-\frac{\Delta \theta_{i_k}^2}{2b_{i_k}^2}\right)
\end{aligned} \tag{4}$$

onde δ corresponde ao período de amostragem e $\Delta \theta_{i_k} = (\varphi_k - \theta_{i_k}) \bmod 2\pi$. E dessa forma, o ECG sintético é obtido por:

$$ECG_k = P_k + C_k + T_k \tag{5}$$

A possibilidade de gerar sinais para distúrbios cardíacos específicos permite a análise e o treinamento de profissionais da área da saúde. Essa flexibilidade torna a ferramenta desenvolvida valiosa para aprendizado e pesquisa, permitindo a criação de bancos de dados sintéticos para o desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial voltados para o diagnóstico de doenças cardíacas.

Em [Sayadi et al. 2010], além de sinais de ECG representando pacientes normais, foram obtidos parâmetros para a geração de sinais de ECG sintéticos representando diversas condições cardíacas, como por exemplo a fibrilação atrial (FA). Cabe ressaltar que, além da FA, o modelo pode ser ajustado para representar outras condições cardíacas, como taquicardia ventricular, bradicardia sinusal e infarto agudo do miocárdio, permitindo sua utilização tanto para ensino quanto para calibração de dispositivos médicos. A possibilidade de variação dos parâmetros do modelo permite ainda simular os efeitos de intervenções clínicas, como o uso de medicamentos ou a aplicação de choques elétricos em simulações de ressuscitação.

3. Resultados

O hardware utilizado para a geração do ECG sintético como um sinal analógico pode ser dividido em duas partes: o microcontrolador responsável pelo processamento do modelo matemático e o circuito de conversão digital-analógico. Para o microcontrolador, foi utilizado o ATmega328P, presente no Arduino Uno R3, que dispõe de 14 pinos de entrada/saída, sendo 6 desses pinos utilizáveis para saídas PWM¹. A escolha desse microcontrolador deve-se à sua acessibilidade e baixo custo. A bancada experimental utilizada neste trabalho pode ser visualizada na Figura 2, onde o circuito responsável pela conversão digital-analógica, proposto por [Toginho 2015] com algumas modificações, é apresentado na Figura 3.

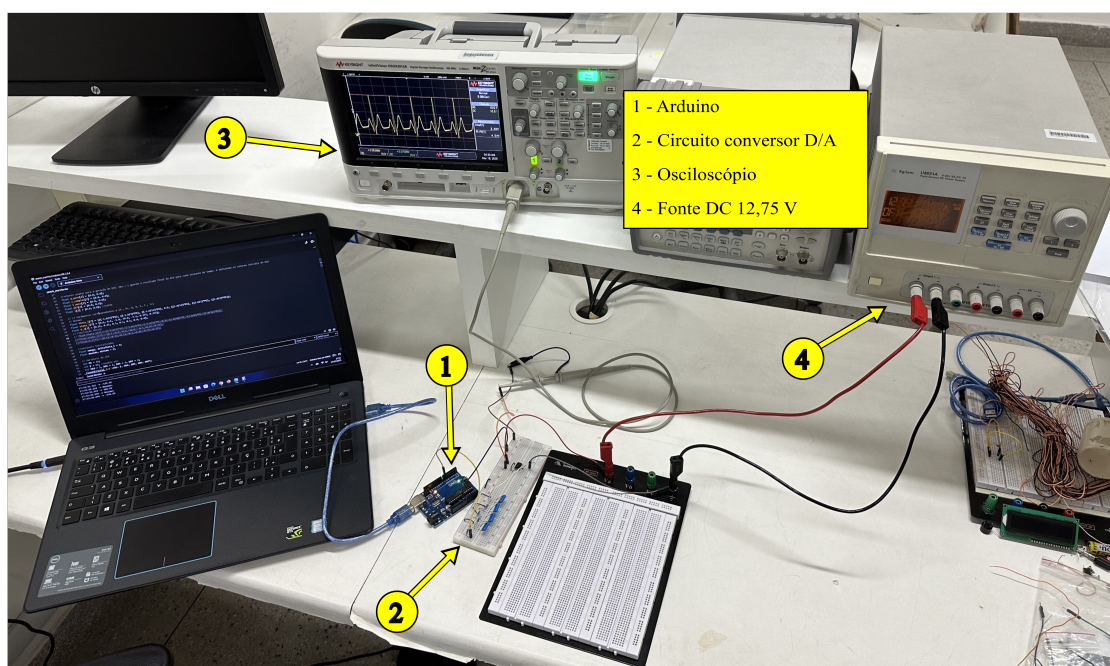


Figura 2. Bancada experimental utilizada. (1) Arduino. (2) Circuito responsável pela conversão digital-analógica do PWM. (3) Simulação de um sinal normal de ECG observado pelo osciloscópio. (4) Fonte DC responsável pela alimentação do amplificador operacional do circuito.

¹<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (acessado em 16 de março de 2025)

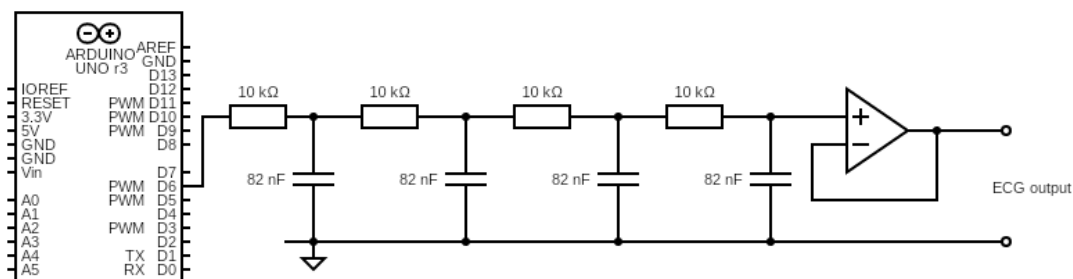


Figura 3. Circuito responsável pela conversão digital-analógica do PWM. Trata-se de um circuito composto por um filtro passa-baixa de 4º ordem e um *buffer* composto por um amplificador operacional LM741.

Segundo [Zhou and Xiong 2010], um sinal PWM pode ser decomposto em um componente DC mais uma onda quadrada com *duty cycle* idêntico e amplitude média zero. A conversão do sinal digital para analógico ocorre pelo filtro passa-baixa, que remove os componentes de alta frequência, preservando apenas aqueles de baixa frequência, correspondentes ao componente DC, resultando no sinal analógico desejado. Com base nesse princípio, o sinal PWM foi utilizado para representar o ECG sintético gerado pelo modelo matemático selecionado, e um filtro do tipo passa-baixa foi implementado para realizar a conversão digital-analógica.

Após a implementação do modelo matemático e do circuito de conversão, foi possível gerar um sinal de ECG sintético, visualizável por meio de um osciloscópio. Foram gerados ECGs para dois conjuntos distintos de parâmetros: um representando um indivíduo com atividade cardíaca normal (saudável) e outro caracterizando a FA. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados em cada caso. A FA foi escolhida devido à sua complexidade, caracterizada por atividade atrial desorganizada e variabilidade do intervalo RR. O modelo ajustado permite reproduzir essas características, auxiliando no treinamento de profissionais para o diagnóstico dessa condição.

Tabela 1. Parâmetros representando um indivíduo saudável e um indivíduo com FA para o modelo proposto por [Sayadi et al. 2010]

Index (i)	P^-	P^+	Q	R	S	T^-	T^+
Indivíduo Saudável							
θ_i (radians)	$-\frac{1}{3}\pi$	$-\frac{1}{3}\pi$	$-\frac{1}{12}\pi$	0	$\frac{1}{12}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$
a_i	0,6	0,6	-5,0	30,0	-7,5	0,375	0,375
b_i	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4
Indivíduo com FA							
θ_i (radians)	$-\frac{5}{7}\pi$	$-\frac{1}{2}\pi$	$-\frac{1}{4}\pi$	0	$\frac{1}{30}\pi$	$\frac{1}{4}\pi$	$\frac{7}{11}\pi$
a_i	0,7	0,9	0,6	18,0	-0,1	0,62	0,55
b_i	0,12	0,13	0,12	0,1	0,05	0,15	0,17

O sinal analógico de ECG sintético representativo de um indivíduo saudável, gerado com parâmetros listados na Tabela 1 pode ser visto na Figura 4. Nesta figura, é possível visualizar com clareza as ondas do sinal de ECG, com diferentes amplitudes e

durações, além de vários ciclos consecutivos.

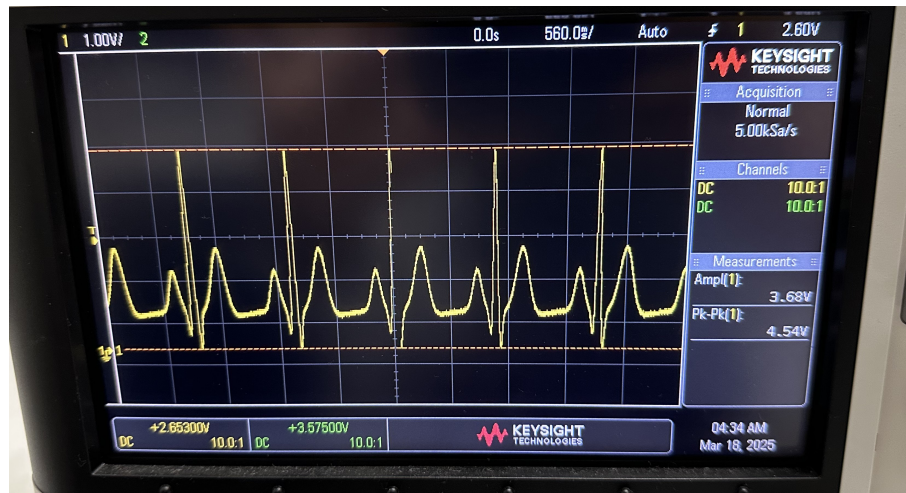


Figura 4. Sinal analógico de ECG gerado a partir dos parâmetros obtidos em [McSharry et al. 2003] para um indivíduo saudável.

O sinal analógico de ECG sintético representativo de um indivíduo com FA, gerado com parâmetros listados na Tabela 1 pode ser visto na Figura 5. Nesta figura, é possível visualizar com clareza as ondas do sinal de ECG, com diferentes amplitudes e durações, além de vários ciclos consecutivos.

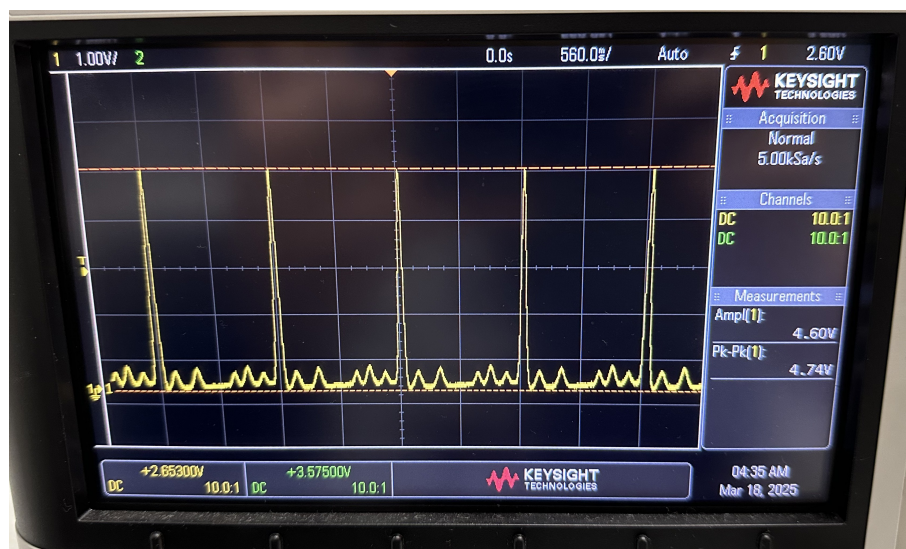


Figura 5. Sinal analógico de ECG gerado a partir dos parâmetros obtidos em [Sayadi et al. 2010] para um indivíduo com FA.

4. Discussão

A implementação de um gerador de ECG sintético apresenta desafios técnicos significativos, especialmente na conversão digital-analógica. Alguns dos principais desafios para trabalhos futuros, incluem a definição dos valores máximos e mínimos para o formato do

sinal, as limitações envolvendo o uso do PWM com respeito à resolução, e o atraso que ocorre na filtragem para a conversão digital-analógica.

O mapeamento do sinal ECG gerado para a faixa de valores do PWM pode ser um desafio, pois a amplitude do sinal pode variar de acordo com a condição cardíaca simulada. Tendo em vista que na função `analogWrite()` do Arduino, o intervalo é limitado de 0 a 255. Para garantir um ajuste adequado, na implementação proposta, o primeiro batimento gerado é analisado para determinar os valores máximos e mínimos do ECG. Essa calibração inicial permite um remapeamento correto dos valores gerados para o intervalo suportado pelo PWM. No entanto, essa abordagem apresenta algumas limitações. Por exemplo, se houver variações significativas nos batimentos subsequentes, o mapeamento inicial pode não ser representativo, comprometendo a precisão da conversão digital-analógica. Por conta disso, a presença de sinais de baixa frequência (*baseline wander*) no modelo pode interferir nessa calibração, pois variações na linha de base do ECG podem alterar os valores máximos e mínimos detectados no primeiro batimento, distorcendo assim o formato das ondas. Para mitigar esse problema, a *baseline wander* não foi incluída na implementação atual, garantindo maior estabilidade na conversão digital-analógica.

No Arduino utilizado a amplitude do sinal gerado pelo PWM por meio da função `analogWrite()` é limitada ao intervalo de 0 a 255 e frequência de 980 Hz nos pinos associados ao Timer 0 (pinos 5 e 6). Embora essas especificações apresentem resultados satisfatórios quando observadas por meio do osciloscópio, em aplicações mais exigentes que possam demandar maior resolução do sinal de ECG sintético, é possível aumentar tanto o intervalo quanto a frequência do PWM para, respectivamente, 0 a 639 e 25 kHz, por meio da modificação direta dos registradores do Timer 1. Ainda sendo possível aumentar o intervalo em detrimento da redução da frequência do PWM e vice-versa.

Outro fator limitante é o atraso inerente ao filtro passa-baixa, que pode resultar em um tempo de resposta adicional para que o sinal alcance o valor de tensão desejado. Esse atraso ocorre devido ao tempo necessário para que o filtro suavize as variações rápidas do PWM. Embora esse efeito seja geralmente pequeno, ele pode se tornar relevante em aplicações que exigem sincronização precisa do ECG com outros sinais fisiológicos. Uma possível solução para esse problema seria o uso de um conversor digital-analógico (DAC) dedicado, que permitiria uma conversão mais direta e precisa do sinal digital para analógico, eliminando a necessidade do filtro passa-baixa e reduzindo os atrasos na resposta do sistema. Essa melhoria poderia aumentar a fidelidade do ECG gerado e torná-lo mais adequado para aplicações clínicas mais exigentes.

A utilização de ECGs sintéticos apresenta um grande potencial tanto no ensino acadêmico quanto na prática clínica e hospitalar. No ensino, a simulação de sinais permite que estudantes testem hipóteses clínicas, correlacionando sinais eletrocardiográficos com diferentes contextos clínicos. Pretende-se submeter um projeto no comitê de ética para aquisição de dados reais de ECG para a comparação com os dados sintéticos gerados por meio deste projeto, essa etapa aumentará a fidelidade do modelo.

Além disso, um ambiente simulado de sala de emergência poderia ser criado, no qual uma IA ajustaria dinamicamente os parâmetros do ECG com base nas ações do estudante e em fatores ambientais, o que traria grandes benefícios para o ensino. A integração

de ECGs sintéticos com aprendizado de máquina também pode aprimorar algoritmos de diagnóstico automatizado, tornando-os mais robustos e confiáveis uma vez que sinais sintéticos podem ser adicionados à base de treinamento dos modelos, procedimento conhecido como aumento de dados (do termo em inglês *Data Augmentation*).

Por fim, essa tecnologia pode ser aplicada na calibração de dispositivos médicos, garantindo que equipamentos de monitoramento cardíaco forneçam leituras precisas em diferentes cenários clínicos.

5. Conclusão

Este estudo demonstrou a viabilidade da geração sinais analógicos de ECGs sintéticos, utilizando um modelo matemático robusto e implementação em hardware de baixo custo. O modelo de [Sayadi et al. 2010] provou ser uma escolha eficiente para simulações precisas de ECGs, permitindo uma melhor separação das formas de onda características e proporcionando maior flexibilidade na personalização dos sinais. A abordagem baseada em microcontroladores oferece uma alternativa acessível e portátil para fins educacionais e clínicos. Vale ressaltar que outros modelos matemáticos poderiam ser utilizados, como por exemplo o modelo desenvolvido por [Awal et al. 2021], que utiliza uma quantidade maior de gaussianas para melhor representar sinais específicos de ECG.

Além da viabilidade técnica do sistema proposto, os experimentos conduzidos demonstraram a capacidade de gerar sinais ECG sintéticos altamente personalizáveis e compatíveis com diferentes condições fisiológicas e patológicas. A fidelidade dos sinais gerados foi avaliada por meio de análises visuais e comparações com ECGs reais, comprovando a precisão do modelo. Entretanto, a conversão digital-analógica via PWM apresentou desafios, como a necessidade de calibração inicial dos valores máximos e mínimos e a limitação imposta pelo filtro passa-baixa, que pode introduzir atrasos na resposta do sinal dependendo da ordem e da estrutura do mesmo.

No âmbito acadêmico, a capacidade de simular diferentes padrões cardíacos permite que estudantes testem hipóteses clínicas e correlacionem sinais de ECG com cenários clínicos específicos. Uma possível aplicação seria a simulação de uma sala de emergência virtual, na qual uma IA ajusta os parâmetros do ECG de acordo com as ações do estudante, representaria uma inovação no ensino de cardiologia.

Na área clínica, a tecnologia desenvolvida nesse trabalho pode ser utilizada para a calibração de dispositivos médicos e a integração com sistemas de aprendizado de máquina podem aprimorar diagnósticos automatizados, tornando os sistemas mais robustos e confiáveis uma vez que sinais sintéticos podem ser adicionados à base de treinamento dos modelos.

Para futuros desenvolvimentos, propõe-se a substituição do método de conversão digital-analógica por uma solução de maior precisão, como um conversor digital-analógico dedicado, a fim de melhorar a qualidade do sinal gerado, bem como o uso de modelo com maior número de gaussianas que pode possibilitar a representação de uma maior quantidade de ECGs, ou ainda a adição de algoritmos para obtenção dos parâmetros do modelo de ECG sintético a partir de um ECG real. Além disso, a integração de inteligência artificial poderia permitir ajustes automáticos nos parâmetros do ECG sintético a partir da descrição da patologia, proporcionando maior realismo e praticidade na

simulação de condições patológicas. A implementação de interfaces educacionais interativas também pode ser promissora, expandindo a aplicabilidade do sistema.

Dessa forma, este trabalho não apenas valida a viabilidade técnica da geração de sinais analógicos de ECGs sintéticos, mas também abre caminho para aplicações inovadoras na educação médica, no diagnóstico clínico e na calibração e certificação de dispositivos biomédicos, contribuindo para avanços significativos na cardiologia.

Referências

- Awal, M. A., Mostafa, S. S., Ahmad, M., Alahe, M. A., Rashid, M. A., Kouzani, A. Z., and Mahmud, M. P. (2021). Design and optimization of ecg modeling for generating different cardiac dysrhythmias. *Sensors*, 21(5):1638.
- Jiang, H., Li, D., and Li, L. (2022). Design of ecg signal generator based on motion scene. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 2181, page 012055. IOP Publishing.
- McSharry, P. E., Clifford, G. D., Tarassenko, L., and Smith, L. A. (2003). A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 50(3):289–294.
- Sayadi, O., Shamsollahi, M. B., and Clifford, G. D. (2010). Synthetic ecg generation and bayesian filtering using a gaussian wave-based dynamical model. *Physiological measurement*, 31(10):1309.
- Toginho, D. G. (2015). Ecg gerado por microcontrolador. Master’s thesis, Universidade Estadual de Londrina.
- Usta, B. N., Tepeyurt, B., and Karakulak, E. (2021). Simple synthetic ecg generation via pwm output of microcontroller. In *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, pages 27–30. IEEE.
- Vasconcellos, M. E., Ferreira, B. G., Leandro, J. S., Neto, B. F., Cordeiro, F. R., Cestari, I. A., Gutierrez, M. A., Sobrinho, A., and Cordeiro, T. D. (2023). Siamese convolutional neural network for heartbeat classification using limited 12-lead ecg datasets. *Ieee Access*, 11:5365–5376.
- Wei, Y.-C., Wei, Y.-Y., Chang, K.-H., and Young, M.-S. (2012). A three-lead, programmable, and microcontroller-based electrocardiogram generator with frequency domain characteristics of heart rate variability. *Review of Scientific Instruments*, 83(4).
- Zhou, F. and Xiong, W. (2010). Using pwm output as a digital-to-analog converter on dsp. In *2010 International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*, volume 2, pages 278–281. IEEE.