



Sistema Baseado em Lógica Fuzzy em FPGA para Processamento e Análise de Sinais Eletrocardiográficos Patológicos

Fuzzy Logic Based System in FPGA for Processing and Analysis of Pathological Electrocardiographic Signals

Edson Vicente Junior*, Roberto Ribeiro Neli†,
Eduardo Giometti Bertogna‡, Márcio Rodrigues da Cunha§,

RESUMO

A interpretação de sinais eletrocardiográficos (ECG) é uma tarefa complexa e que ocasionalmente contém erros devidos ao fator humano; a detecção e análise automática de parâmetros de ECG seria uma forma de minimizar tais erros. O objetivo deste trabalho foi projetar e implementar um sistema baseado em Lógica Fuzzy em FPGA para o processamento e análise de sinais eletrocardiográficos patológicos. Com o auxílio da plataforma Intel® Quartus®, para desenvolvimento em FPGA, e do *software* MATLAB (*academic use*), com o toolbox Fuzzy Logic Designer para simulação de sistemas fuzzy, implementou-se um sistema Fuzzy modular implementado em FPGA para a detecção de cardiopatias em sinais ECGs, limitando-se aos parâmetros de duração e amplitude da onda P destes sinais. A limitação de parâmetros possibilitou adquirir um resultado satisfatório no quesito de classificação das cardiopatias (negativo, suspeito ou positivo), no entanto houve divergências entre o sistema simulado no MATLAB e na plataforma Quartus® em relação a saída defuzzificada, dada a natureza da implementação de descrição de *hardware*. A proposta modular é promissora, necessitando o estudo das funções de pertinência, base de regras e conhecimento para ampliar os auxílios das interpretações relacionadas aos outros parâmetros contidos em um eletrocardiograma.

Palavras-chave: Sistemas Fuzzy, Eletrocardiograma, FPGA, Cardiopatias.

ABSTRACT

Interpreting electrocardiographic (ECG) signals is a complex task that occasionally contains errors due to the human factor; the automatic detection and analysis of ECG parameters would be a way to minimize such errors. The objective of this work was to project and implement a Fuzzy Logic Based System in FPGA for Processing and Analysis of Pathological Electrocardiographic signals. With the help of the Intel® Quartus® platform, for FPGA development, and the MATLAB (*academic use*) software, with the Fuzzy Logic Designer toolbox for simulating fuzzy systems, a modular Fuzzy system implemented in FPGA was implemented for detection of heart diseases in ECG signals, limited to the parameters of duration and amplitude of the P wave of these signals. The limitation of parameters made it possible to obtain a satisfactory result in terms of classification of heart diseases (negative, suspect or positive), however there were differences between MATLAB simulated system and Quartus® platform in relation to the defuzzified output, given the nature of the implementation of hardware description. The modular proposal is promising, requiring the study of membership functions, rulebases and knowledge to expand the aids of interpretations related to other parameters contained in an electrocardiogram.

Keywords: Fuzzy systems, Electrocardiogram, FPGA, Cardiopathies.

* Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil; edsonjunior.1996@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão; rneli@gmail.com

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil; ebertonha@gmail.com

§ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil; prof.marciocunha@gmail.com



1 INTRODUÇÃO

O coração é de fundamental importância no processo circulatório, mantendo o sangue fluindo no circuito fechado dos vasos sanguíneos e confere a esta robusta máquina humana a capacidade de se manter em bom funcionamento (THIBODEAU; PATTON, 2012, tradução nossa). Ele é composto por diversas estruturas, sendo majoritariamente constituído por músculos cardíacos atriais, ventriculares e fibras musculares excitatórias e condutivas especializadas (HALL, 2015, tradução nossa). Através das fibras, o coração conduz atividade elétrica e parametrizando as etapas desta atividade elétrica, adquire-se um sinal chamado de eletrocardiograma (ECG), sendo uma das principais formas de interpretar anomalias e patologias no coração.

Existem diversas condições patológicas que afetam o perfeito funcionamento coração, no qual em uma revisão sistemática, Cook et. al (2020) categorizou vários padrões de anomalia detectáveis em um ECG, como isquemia, alterações no ritmo (arritmias), variações na estrutura, metabolismo e inflamações.

No entanto, para poder interpretar um ECG de maneira correta, é necessário um vasto conhecimento na área de cardiologia, em especial aqueles que possuem variações que são imperceptíveis em uma análise rápida para diversos profissionais que não possuem uma especialização. Interpretar um ECG é uma tarefa árdua, que se apoia na integração de conhecimentos de áreas como anatomia, eletrofisiologia, fisiopatologia, reconhecimento visual de padrões e raciocínio clínico (WOOD et. al (2014) Apud COOK; OH; PUSIC (2020), tradução nossa). Com tamanha complexidade, o fator humano pode interferir nas interpretações.

Alguns estudos que estimam a severidade dos erros de interpretação, notificaram erros de grande importância de 4% a 33% das interpretações (MELE (2008) Apud WOOD et. al (2014), tradução nossa) (SALERNO et. al (2003) Apud Ibid.). Na revisão sistemática de Cook et. al (2020), utilizou-se vários estudos de interpretação de ECG com grupos com diversos níveis de conhecimento (estudantes, residentes, médicos em atividade e cardiologistas). Observou-se que há muito a ser melhorado, pois mesmo cardiologistas, grupo detentor do maior grau de conhecimento, obteve-se uma precisão combinada de 74.9%, com variações de 49% a 92% e uma variação ainda maior nos demais grupos (COOK; OH; PUSIC; 2020, tradução nossa).

Como auxiliar a interpretação de um ECG, diminuindo o fator humano, porém sem deixar de utilizar todo o conhecimento acumulado da humanidade no setor de cardiologia? E como facilitar o processo de um sistema que tende a ser robusto dada a vasta quantidade de conhecimento?

A lógica nebulosa, ou lógica Fuzzy pode ser uma forma de integrar bases do conhecimento necessárias para a interpretação de maneira automática em um sistema; ela assimila o modo de pensamento humano em um ambiente controlado, podendo ser projetada para se comportar como conhecimento dedutivo ou indutivo (SIMÕES, 2007).

Tal abordagem permite uma gama maior de resoluções; em uma lógica booleana convencional, se assume apenas valores binários (verdadeiro ou falso), ao passo que na lógica Fuzzy pode-se definir a verdade por graus de veracidade, dentro de um intervalo de 0 a 1 (SIMÕES, 2007).

A implementação do sistema Fuzzy proposto, em FPGA, leva em consideração a característica do dispositivo de utilizar lógica programável. Tal característica permite o processamento de dados de forma paralela, não demandando tempo com sistema operacional, ciclos de varredura, com atualização de tabelas imagens das entradas e saídas, com busca de instruções em memória etc. (COSTA, 2014). Em uma integração da vasta área de conhecimento da cardiologia em um sistema, a FPGA mostra-se viável para agregar todas as regras necessárias dentro de um sistema Fuzzy sem comprometer o tempo de resposta.

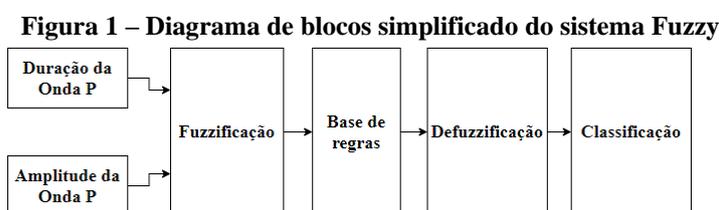
Ao se utilizar ambientes de desenvolvimento integrado para FPGA, como Intel® Quartus® Prime (Lite Edition, versão 19.1) e para simular o sistema Fuzzy, como o MATLAB (*academic use*) com o toolbox

Fuzzy Logic Designer, é possível inicialmente conceber e simular o sistema fuzzy, atestando seu funcionamento no MATLAB e então se proceder na implementação em FPGA usando o Intel® Quartus®, para verificar se cumpre com os requisitos conforme simulação.

2 MÉTODO

O sistema desenvolvido utiliza a base de conhecimento proveniente dos estudos de GRAUEL (2000), que desenvolveu funções de pertinência e base de regras para alguns parâmetros principais do ECG, usando duração e amplitude como entrada e a classificação da anomalia (negativo, suspeito ou positivo) como saída.

No entanto, para garantir uma proposta modular satisfatória, foi utilizado apenas a duração e amplitude provenientes da base de conhecimento da Onda P, responsáveis por diagnosticar anomalias provenientes dos átrios. Na Figura 1 é possível visualizar a estrutura de maneira simplificada do sistema.



Fonte: Autoria Própria (2021)

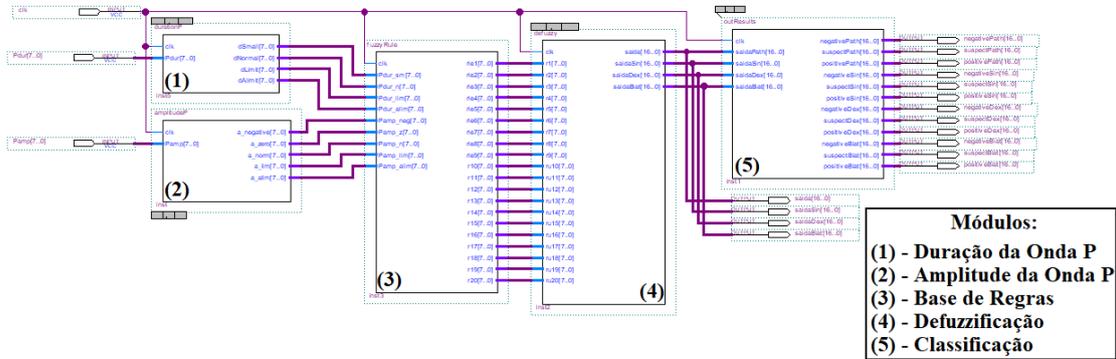
Na implementação para FPGA, foram utilizados os cálculos de (VUONG; MADNI, 2011) e (BALDANIA; PATKI; SAPKAL, 2013), adaptando algumas equações de acordo com as necessidades do sistema que é implementado em linguagem de descrição de *hardware* Verilog. Os parâmetros de entrada devem ser previamente extraídos para que o sistema Fuzzy possa executar o parecer acerca do sinal, com a ressalva que seja traduzido o valor da amplitude e duração da Onda P para 8 bits. Logo, foram utilizados valores de entrada que simulam possibilidades que teste a base de conhecimento implementada de maneira ampla.

O módulo de Fuzzificação é responsável por distribuir de maneira adequada a pertinência das funções dos parâmetros de duração (pequena, normal, limite e acima do limite) e amplitude (negativa, zero, normal, limite e acima do limite). Na etapa de base de regras, foi comparado uma entrada de cada parâmetro e assim relacionando todas as possibilidades de combinação entre as funções de duração e amplitude, gerando 20 regras.

Na etapa de defuzzificação, responsável por determinar o valor de acordo com as funções de saída, foi utilizado o método do centro-de-área (CoA) que usa a soma de todas as regras relevantes e sua centróide. Considerando que existe 4 possíveis causas para onda P (átrio esquerdo, átrio direito, biatrial ou patológica), este módulo possui 4 saídas defuzzificadas.

Todavia, como no sistema Fuzzy há 3 classificações (negativo, suspeito ou positivo), é necessário um bloco para classificar de maneira assertiva de acordo com a posição determinada no bloco de defuzzificação, determinando assim a pertinência de cada função de saída. Utilizando a IDE Intel® Quartus® Prime foi possível implementar todo o sistema descrito, apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema Fuzzy implementado



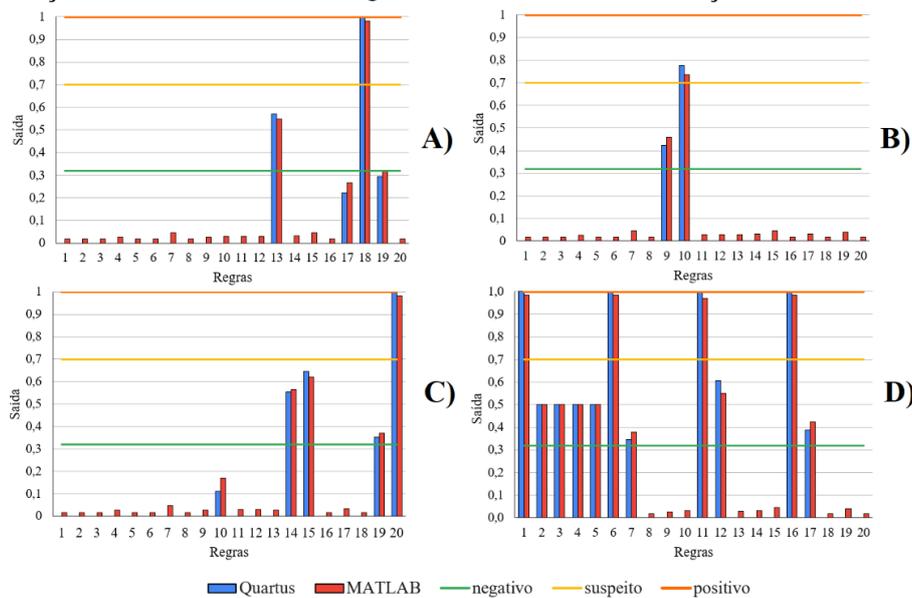
Fonte: Autoria Própria (2021)

Para garantir resultados simulados que servissem de controle, foi utilizado o *software* MATLAB para gerar os valores de entrada e saída provenientes da base de conhecimento. Para realizar a comparação de valores, foi utilizado a saída do módulo defuzzificação e o resultado simulado no MATLAB. Considerando as 20 regras, foram estipulados 20 valores de duração e amplitude para testar o sistema.

3 RESULTADOS

Com os resultados obtidos, foi possível gerar a Figura 3, que contém os gráficos de “A)” a “D)” que representam os resultados para a Onda P no átrio esquerdo, átrio direito, biatrial e patológica, respectivamente. Para efeito de visualização, foi determinada uma linha demarcada empiricamente baseado nos resultados de pertinência obtidos por ambos os sistemas, onde exemplifica-se o limite dos valores e sua classificação (negativo, suspeito ou positivo).

Figura 3 – Relação de saída entre o Intel® Quartus® e MATLAB em relação a onda P e suas classificações



Fonte: Autoria Própria (2021)



Os gráficos são provenientes dos resultados adquiridos na saída da IDE Intel® Quartus® e da Toolbox Fuzzy Logic Designer no MATLAB. As linhas auxiliares demarcadas representam no sistema Fuzzy o limite da classificação de cada função de pertinência com sua configuração chega no limite de sua classificação com base no valor de saída; tal situação foi avaliada no MATLAB.

No tocante aos resultados, ocorreu algumas discrepâncias entre o sistema simulado e o implementado em FPGA; porém, não houve divergência de classificação, não comprometendo assim a classificação correta. Tal verificação da classificação é feita através da pertinência aplicada, sendo escolhida a função de maior participação nos resultados.

A maior divergência ocorre justamente quando há interação das funções de pertinência menores dentro do conjunto, como duração limite ou amplitude zero por exemplo. Tais situações foram testadas justamente para averiguar se tal implementação poderia comprometer a classificação.

Outra situação que se fez necessária durante a implementação foi a normalização dos valores para que a fosse possível aplicar a lógica dentro da linguagem de descrição de *hardware* Verilog. Então, alguns valores estipulados foram arredondados e conseqüentemente afeta diretamente os cálculos. Apesar de não comprometer a lógica do sistema e sua classificação, a diferença se faz presente.

Quanto ao método proposto por (GRAUEL, 2000) e os cálculos de (VUONG; MADNI, 2011) e (BALDANIA; PATKI; SAPKAL, 2013) se demonstram consistentes, mantendo a lógica proposta por ambos na implementação.

4 CONCLUSÃO

Desenvolver em FPGA se demonstrou uma tarefa árdua, dependendo de tempo considerável para garantir uma resposta modular satisfatória, para vários aspectos, como uma normalização de valores de entrada que não comprometesse a lógica do sistema Fuzzy, a diferença no modo de pensar dado as implementações comuns em sistemas microcontrolados ou microprocessados, dentre outras formas.

A diferença de resultados apesar de presente não afetou a classificação; uma possível causa em sua divergência pode residir nos métodos de normalização dos resultados e na própria natureza da linguagem de descrição de *hardware*.

Para uma melhor precisão, um sistema microcontrolado ou microprocessado pode ser uma forma de aprimorar. Pensando em maiores resoluções, além de manter a lógica da normalização e possivelmente persistir a problemática, poderia afetar a proposta da implementação em FPGA no quesito de tempo de resposta, pensando necessariamente na expansão do sistema com novos módulos provenientes de outros parâmetros.

Houve também limitação no uso da IDE Intel® Quartus® Prime, dado sua versão Lite; com tais restrições, não foi possível aplicar a expansão do sistema para outros parâmetros, como outras ondas ou segmentos. Todavia, o ambiente conta com ferramentas propícias para o desenvolvimento de sistemas integrados para FPGA, sendo extremamente útil para a aplicação da proposta modular do sistema. A linguagem de descrição de *hardware* Verilog se demonstrou mais intuitiva em relação a outras linguagens similares.

Quanto ao *software* MATLAB (*academic use*) e sua ferramenta para desenvolver o sistema Fuzzy, foi de grande utilidade e de fácil entendimento, sendo intuitiva e eficaz em sua aplicação. Não houve quaisquer limitações de uso, sendo a versão suficiente para concretizar a proposta.



Em suma, a proposta modular se demonstra promissora para a ampliação do sistema, sendo necessário assim ampliar a base de conhecimento e agregar novos parâmetros, podendo ser direta ou indiretamente relacionados ao sinal de eletrocardiograma, como segmentos, intervalos, as outras ondas não implementadas, ou quaisquer outras peculiaridades que possa auxiliar o profissional da saúde na interpretação de sinais eletrocardiográficos.

AGRADECIMENTOS

A Fundação Araucária pelo fomento da pesquisa, a UTFPR, ao orientador e os autores pelo suporte e atenção durante o desenvolvimento da pesquisa; a todos aqueles que auxiliaram de alguma forma para a realização deste trabalho e a família pela força nestes tempos difíceis.

REFERÊNCIAS

- THIBODEAU, G.; PATTON, K. T. **Structure & function of the body**. 14. ed. St. Louis: Elsevier Mosby, 2012.
- HALL, J. E. **Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology**. 13. ed. Philadelphia: Elsevier, 2015.
- COOK, D.A.; OH, S.-Y.; PUSIC, M. V. Accuracy of Physicians' Electrocardiogram Interpretations. **JAMA Internal Medicine**, [s. l.], v. 180, n. 11, 1 nov. 2020.
- WOOD, G. et al. Exploring the Impact of Expertise, Clinical History, and Visual Search on Electrocardiogram Interpretation. **Medical Decision Making**. [s. l.], v. 34, n. 1, 27 jan. 2014.
- SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Editora Blucher, 2007. ISBN 9788521215479. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215479/>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- COSTA, C. D. **Projetos de Circuitos Digitais com FPGA**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. ISBN 9788536520117. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520117>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- GRAUEL, A. Fuzzy Logic System for ECG Interpretation. In: **Fuzzy Systems in Medicine**. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2000. p. 246–259.
- VUONG, P. T.; MADNI, A. M. VHDL Implementation For a Fuzzy Logic Controller. **BEI Technologies, Inc.**, Sylmar, p. 8, 2011.
- BALDANIA, M. D.; PATKI, A. B.; SAPKAL, A. M. Verilog-HDL based implementation of a fuzzy logic controller for embedded systems. 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. **Anais [...]**. [s. l.], IEEE, dez. 2013.