

TEDA-Multi em FPGA para Processamento Paralelo de Sinais Biomédicos Multissensores

Lucileide M. D. da Silva^{*†}, Sérgio N. Silva^{*‡} e Marcelo A. C. Fernandes^{*§}

^{*}InovaAi Lab, nPITI/IMD, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil

[†]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Santa Cruz, RN, Brasil

[‡] Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil

[§]Departamento de Engenharia da Computação e Automação, UFRN, Natal, RN, Brasil

lucileide.dantas@ifrn.edu.br, sergionatan@dee.ufcg.edu.br e mfernandes@dca.ufrn.br

Resumo—Este artigo propõe a arquitetura TEDA-Multi, uma implementação em FPGA do algoritmo TEDA (Typicality and Eccentricity Data Analytics), adaptada para aplicações multissensores na Internet das Coisas Médicas (IoMT). A arquitetura explora a modularidade com múltiplos núcleos paralelos. Experimentos analisaram a potência dinâmica, ocupação de hardware e throughput em diferentes configurações (sensores, frequência, paralelismo). Os resultados demonstram que o TEDA-Multi é escalável, mantém baixo consumo de potência dinâmica em alta densidade de sensores e um bom desempenho em aplicações reais da IoMT com até 80 sensores, sendo compatível com requisitos de sistemas embarcados.

Index Terms—TEDA, FPGA, IoMT, Processamento em Tempo Real, Paralelismo, Multissensores

I. INTRODUÇÃO

A IoMT tem transformado o cenário da saúde, conectando sensores e dispositivos para o monitoramento contínuo de pacientes, especialmente em ambientes críticos como Unidades de Terapia Intensiva (UTIs). A análise eficiente desses fluxos de dados em larga escala apresenta desafios significativos, relacionados à latência, ao consumo energético e à heterogeneidade dos dispositivos. Há uma demanda crítica por arquiteturas otimizadas para dispositivos de borda na IoMT, que combinem baixo consumo energético e alta capacidade de processamento para análise de sinais biomédicos em tempo real [1], [2].

Nesse contexto, dispositivos baseados em Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) mostram-se promissores por oferecerem paralelismo massivo, baixa latência e alta eficiência energética para aplicações em tempo real na área da saúde.

O algoritmo TEDA é uma técnica incremental de baixo custo computacional, originalmente proposta para a detecção de outliers em fluxos de dados [3], [4]. Trabalhos anteriores demonstraram a viabilidade de sua implementação em hardware reconfigurável [5]. Contudo, tais estudos focaram nos aspectos arquiteturais, sem abordar a escalabilidade e o desempenho do algoritmo em cenários com múltiplos sensores, típicos de aplicações da IoMT.

Neste artigo, propõe-se a arquitetura TEDA-Multi, uma implementação do TEDA em FPGA adaptada para análise de dados multissensores na IoMT. O objetivo é investigar a aplicação do TEDA em FPGA, avaliando a escalabilidade do sistema em termos de ocupação de hardware, tempo de

processamento, taxa de transferência (throughput) e consumo, considerando diferentes configurações de sensores e núcleos TEDA paralelos.

II. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

Este trabalho propõe a arquitetura TEDA-Multi, que é uma extensão da arquitetura apresentada em [5], baseada em uma implementação RTL do algoritmo TEDA em FPGA com suporte a entrada paralela de S_n sensores por núcleo e pipeline de três estágios para otimizar a taxa de transferência. A TEDA-Multi adapta essa arquitetura para aplicações multissensores na IoMT por meio da replicação de múltiplos núcleos TEDA independentes, permitindo o processamento simultâneo de dados de diversos sensores fisiológicos. Essa abordagem atende aos requisitos de sistemas médicos embarcados, como baixo consumo, alta amostragem e operação em tempo real.

A Figura 1 detalha a arquitetura do TEDA-Multi no qual N núcleos do TEDA em FPGA são distribuídos de forma paralela. Cada n -ésimo núcleo mantém os módulos funcionais da versão apresentada em [5], MEAN, VARIANCE, ECCENTRICITY e OUTLIER, organizados em múltiplas instâncias completas e independentes. Cada n -ésimo núcleo TEDA recebe seu próprio vetor de entrada, \mathbf{x}_n , composto por S sinais provenientes de sensores fisiológicos distintos, expresso como

$$\mathbf{x}_n = [x_{n,1}, \dots, x_{n,S_n}] \quad (1)$$

onde S_n é o número de sensores do n -ésimo núcleo TEDA. Os dados dos sensores são distribuídos entre os núcleos TEDA, que processam os sinais de forma independente e geram decisões locais sobre cada amostra, classificando-a como normal ou outlier.

III. METODOLOGIA

A avaliação experimental da proposta teve como objetivo verificar a escalabilidade, o desempenho em tempo real e a eficiência energética da arquitetura TEDA-Multi implementada em FPGA. Sínteses e simulações foram realizadas utilizando o dispositivo Xilinx Virtex-6 (modelo xc6vlx240t-1ff1156), com suporte a ponto flutuante de 32 bits. As etapas de síntese, estimativa de consumo e análise de temporização foram conduzidas com o Xilinx ISE Design Suite.

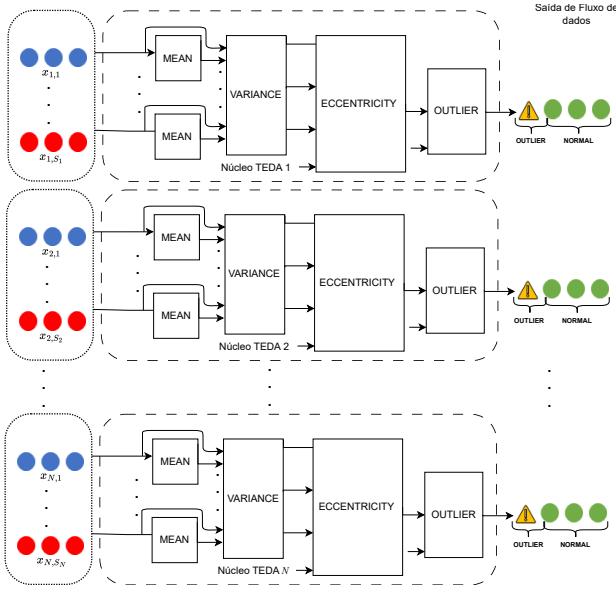


Figura 1. Visão geral da arquitetura paralela multi-core TEDA proposta.

A. Configurações Avaliadas

Duas dimensões principais de paralelismo foram exploradas neste trabalho. A primeira refere-se ao número de sensores por núcleo (S_n), com avaliações realizadas para configurações contendo 2, 4, 8, 16 e 32 sensores por núcleo. A segunda dimensão diz respeito ao número de núcleos TEDA operando (n_{TEDA}) em paralelo, tendo sido implementadas versões com 2, 3, 4, 6 e 8 núcleos independentes.

B. Métricas de Avaliação

As métricas utilizadas para caracterizar o desempenho e a eficiência da arquitetura foram ocupação de hardware (uso relativo de LUTs, registradores e blocos de multiplicação), latência, d , tempo de processamento por amostra, t_{TEDA} , throughput, r_{TEDA} e potência dinâmica consumida, P_{dyn} .

A latência, d , é calculada como $d = n_p \cdot t_{clk}$, onde n_p é o número de estágios do pipeline e t_{clk} representa o período de clock. O tempo de processamento por amostra, t_{TEDA} , pode ser expresso como $t_{TEDA} = 1/f_{clk}$. O throughput, r_{TEDA} , é caracterizado como $r_{TEDA} = f_{clk} \cdot N$, onde N corresponde ao número de núcleos TEDA operando em paralelo.

C. Avaliação Energética

Para estimar o impacto da frequência sobre a eficiência energética da arquitetura, foram conduzidas sínteses adicionais variando a frequência de operação entre 100 kHz e 10 MHz. O consumo de potência dinâmica foi analisado para diferentes quantidades de sensores e núcleos.

IV. RESULTADOS

A arquitetura paralela TEDA-Multi foi analisada variando o número de sensores por núcleo e a quantidade de núcleos TEDA em paralelo.

A. Ocupação de Hardware

A Tabela I mostra a ocupação de hardware para múltiplos núcleos TEDA em paralelo, com síntese de configurações de até 8 núcleos contendo 4 sensores cada, respeitando os limites do dispositivo-alvo. Observou-se crescimento linear no uso de LUTs e multiplicadores à medida que o número de entradas aumenta. A baixa ocupação de registradores indica bom potencial para replicação de núcleos TEDA em paralelo. Modelos de regressão linear foram ajustados para estimar o número de multiplicadores (n_{MULT}), registradores (n_{REG}) e LUTs (n_{LUT}) em função da quantidade de sensores por núcleo (S_n) e do número de núcleos (n_{TEDA}), permitindo prever a ocupação de hardware em configurações não testadas experimentalmente. As Equações 2, 3, e 4 apresentam, as equações de regressão para múltiplos núcleos em paralelo.

$$n_{MULT} = n_{TEDA} \cdot (9 \cdot S_n + 9), \quad (2)$$

$$n_{REG} = n_{TEDA} \cdot (64 \cdot S_n + 693) + 14 \cdot n_{TEDA}^2 + 86, \quad (3)$$

$$n_{LUT} = n_{TEDA} \cdot (3042 \cdot S_n + 5318) + 149. \quad (4)$$

Tabela I
OCUPAÇÃO DE HARDWARE PARA MÚLTIPLOS NÚCLEOS TEDA.

n_{TEDA}	S_n	n_{MULT}	n_{REG}	n_{LUT}
2	2	54 (7%)	1723 (<1%)	23006 (15%)
2	4	90 (12%)	1949 (<1%)	35441 (23%)
2	8	162 (21%)	2356 (<1%)	59966 (39%)
2	16	306 (39%)	3483 (1%)	108632 (72%)
3	2	81 (10%)	2585 (<1%)	34493 (22%)
3	4	135 (17%)	2847 (<1%)	52858 (35%)
3	8	243 (31%)	3601 (1%)	89934 (59%)
4	2	108 (14%)	3337 (1%)	46185 (30%)
4	4	180 (23%)	3707 (1%)	70363 (46%)
4	8	324 (42%)	4834 (1%)	119850 (79%)
6	2	162 (21%)	4863 (1%)	68745 (45%)
6	4	270 (35%)	5719 (1%)	105373 (69%)
8	2	216 (28%)	6711 (2%)	92133 (61%)
8	4	360 (46%)	7894 (2%)	140275 (93%)

B. Tempo de Processamento e Throughput

A Tabela II apresenta o tempo de processamento e throughput para múltiplos núcleos TEDA. O tempo crítico (T_{clk}) permaneceu na faixa entre 93,9 ns e 122,2 ns, mesmo com o aumento no número de sensores e núcleos, o que é atribuído à simplicidade computacional do TEDA e à eficiência do pipeline em três estágios. O throughput manteve-se elevado (entre 8,11 e 10,65 MSPs), reforçando a eficiência em cenários multissensores em tempo real.

A Figura 2 ilustra a variação do throughput. Observa-se uma leve degradação do desempenho em configurações com maior utilização do FPGA (superior a 80%) devido a limitações no roteamento, mas os resultados permanecem dentro da faixa aceitável para aplicações em tempo real.

C. Consumo de Potência Dinâmica

A análise da potência dinâmica buscou avaliar a adequação da arquitetura a sistemas embarcados com restrições energéticas típicas da IoMT. A potência dinâmica consumida depende

Tabela II

PROCESSAMENTO E THROUGHPUT PARA MÚLTIPLOS NÚCLEOS TEDA.

n_{TEDA}	S_n	t_{clk} (ns)	d (ns)	t_{TEDA} (ns)	r_{TEDA} (MSPs)
2	2	93,9	281,8	93,9	10,65
2	4	98,3	294,9	98,3	10,17
2	8	99,1	297,3	99,1	10,09
2	16	122,2	366,7	122,2	8,11
3	2	104,6	313,7	104,6	9,57
3	4	98,8	296,4	98,8	10,12
3	8	100,7	302,1	100,7	9,93
4	2	97,7	293,1	97,7	10,24
4	4	99,9	299,6	99,9	10,01
4	8	112,0	336,1	112,0	8,93
6	2	95,8	287,5	95,8	10,44
6	4	112,8	338,5	112,8	8,86
8	2	99,1	297,4	99,1	10,09
8	4	115,9	347,6	115,9	8,63

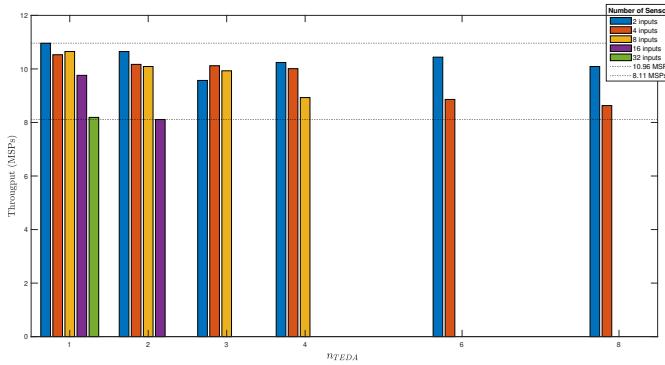


Figura 2. Throughput em função do número de sensores e de núcleos TEDA.

fortemente da frequência de operação, sendo sua redução vantajosa para aplicações com baixo consumo e sem restrição de velocidade de processamento.

A Tabela III presenta a potência dinâmica operando no maior throughput possível em cada configuração. Devido ao paralelismo estrutural, o throughput permanece similar, mas a potência dinâmica cresce significativamente com a ocupação de recursos do FPGA e da replicação de núcleos, indicando maior custo energético. A Figura 3 ilustra essa variação.

Tabela III

CONSUMO DINÂMICO (P_{dyn}) E THROUGHPUT (r_{TEDA}) EM FUNÇÃO DE NÚCLEOS TEDA (n_{TEDA}) E SENsoRES (S_n).

n_{TEDA}	S_n	P_{dyn} (mW)	r_{TEDA} (MSPs)
2	2	30	10,65
2	4	46	10,17
2	8	78	10,09
2	16	114	8,11
3	2	43	9,57
3	4	67	10,12
3	8	114	9,93
4	2	58	10,24
4	4	88	10,01
4	8	137	8,93
6	2	87	10,44
6	4	118	8,86
8	2	115	10,09
8	4	160	8,63

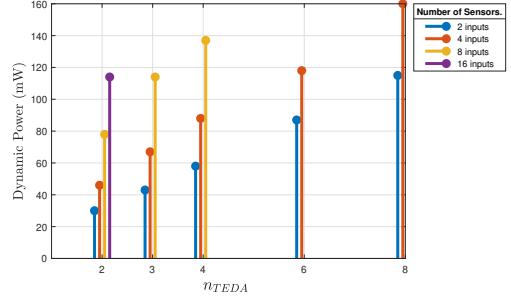


Figura 3. Potência dinâmica em função de sensores e de núcleos TEDA.

Tabela IV
POTÊNCIA DINÂMICA (EM MW) PARA MÚLTIPLOS NÚCLEOS TEDA (n_{TEDA}), EM FUNÇÃO DAS FREQUÊNCIAS (f) E SENsoRES (S_n).

n_{TEDA}	f (MHz)	Número de sensores de entrada, S_n			
		2	4	8	16
2	1,0	3	5	8	14
	2,0	6	9	16	29
	3,0	9	14	23	43
	5,0	14	23	39	72
	8,0	23	37	62	114
	10,0	28	46	78	—
3	1,0	5	7	12	—
	2,0	9	13	23	—
	3,0	14	20	35	—
	5,0	23	34	58	—
	8,0	36	54	93	—
	10,0	—	67	—	—
4	1,0	6	9	16	—
	2,0	11	18	31	—
	3,0	17	27	47	—
	5,0	28	45	78	—
	8,0	46	72	125	—
	10,0	57	88	—	—
6	1,0	8	13	—	—
	2,0	17	27	—	—
	3,0	25	40	—	—
	5,0	42	67	—	—
	8,0	67	108	—	—
	10,0	84	—	—	—
8	1,0	11	19	—	—
	2,0	23	38	—	—
	3,0	34	57	—	—
	5,0	57	94	—	—
	8,0	91	151	—	—
	10,0	113	—	—	—

A Tabela IV apresenta a potência dinâmica para implementações multicore em diferentes frequências. Observa-se que o consumo de energia aumenta com a frequência de operação, com o número de sensores por núcleo e com a quantidade de núcleos. A ausência de resultados em algumas configurações indica (i) a configuração excede os recursos disponíveis do FPGA-alvo, inviabilizando sua implementação; ou (ii) a arquitetura não foi capaz de atingir a frequência especificada devido à complexidade da implementação.

A quantidade de núcleos e sensores de entrada e a frequência de operação impactam o consumo de potência e a ocupação de recursos no FPGA. A Tabela IV sugere que, em uma mesma frequência, a potência dinâmica cresce linearmente com o número de núcleos. A Figura 4 reforça essa ideia, mostrando

que o consumo dinâmico por núcleo é praticamente constante, independentemente da quantidade total de núcleos ativos, pois as curvas associadas a uma mesma frequência se sobrepõem, o que evidencia que o consumo por núcleo permanece praticamente constante, independentemente da quantidade total de núcleos ativos.

Assim, o consumo total de potência dinâmica em arquiteturas multicore pode ser estimado por

$$P_{dyn}(n_{TEDA}) = n_{TEDA} \cdot f \cdot (0,667 + 0,4167 \cdot S_n). \quad (5)$$

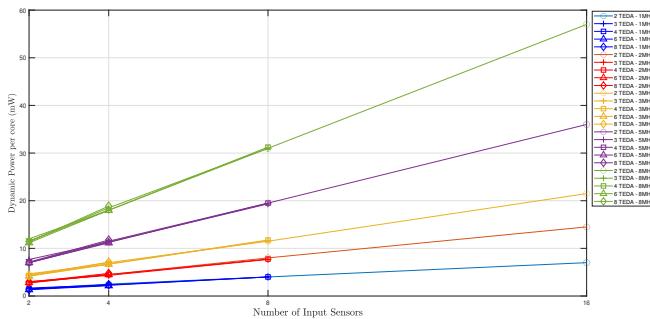


Figura 4. Potência dinâmica por núcleo em função do número de sensores de entrada para diferentes frequências de operação em implementações multicore.

As Figuras 3 e 4 complementam a análise energética da proposta multicore, demonstrando que o consumo total aumenta linearmente com sensores e núcleos. Mas que é mais fortemente influenciada pela frequência de operação, destacando a importância da limitação de clock para baixo consumo. Para sinais fisiológicos lentos, a subamostragem e a multiplexação temporal (reuso sequencial de núcleos TEDA para diferentes canais) são estratégias de escalabilidade viáveis e energeticamente eficientes.

D. Aplicações Multissensores

Em ambientes de IoMT (múltiplos sensores em tempo real) como por exemplo, sistemas hospitalares, a arquitetura TEDA-multi se mostra promissora, especialmente por seu desempenho e baixo consumo. Com $t_{clk} = 125$ ns e 32 entradas paralelas, estima-se o processamento de 5.120.000 sensores por segundo (com taxa de 50 amostras/s) via replicação e multiplexação, evidenciando a escalabilidade da solução.

Foram exploradas aplicações médicas com diferentes níveis de complexidade sensorial, incluindo ECG tradicional com 12 derivações, sistemas vestíveis com 8 canais [6] e sistemas de alta densidade com 80 derivações [7]. As Tabelas V e VI apresentam as estimativas de ocupação e consumo dinâmico para esses cenários.

Tabela V

Referência	S_n	n_{MULT}	n_{REG}	n_{LUT}
ECG	12	117 (15%)	1450 (<1%)	42,187 (28%)
Tradicional	8	81 (11%)	1189 (<1%)	29,963 (19%)
[6]	80	729 (95%)	6006 (2%)	250,131 (165%)
[7]				

Tabela VI
POTÊNCIA DINÂMICA EM APLICAÇÕES MULTISSENSORES.

Referência	S_n	Amostragem (Hz)	P_{dyn} (μW)
ECG	12	1000	5,67
Tradicional		250	1,41
[6]	8	200	0,8
[7]	80	1000	34
		250	8,5

Sistemas com 80 canais excederam os recursos da FPGA utilizada. A solução proposta foi a divisão do sistema em dois FPGAs, cada um configurado com dois núcleos TEDA cada (entradas de 29/12 e 29/10 sensores). Além disso, a multiplexação temporal é viável para sinais de baixa amostragem (ex.: ECG 500 Hz), permitindo que o mesmo núcleo atenda múltiplos pacientes ou regiões sensoriais com custo computacional reduzido. Esses resultados evidenciam a viabilidade da arquitetura TEDA em sistemas vestíveis, dispositivos portáteis e ambientes hospitalares intensivos, onde confiabilidade, baixa latência e baixo consumo energético são críticos.

V. CONCLUSÕES

Os resultados comprovam a viabilidade da arquitetura TEDA multicore em FPGA para aplicações multissensores na IoMT. A principal contribuição é um sistema escalável, com suporte à replicação paralela e baixo consumo de potência. A escalabilidade é evidenciada pelo consumo de potência por núcleo que se mantém constante em diferentes configurações, permitindo a expansão para mais sensores sem perda de desempenho individual. O baixo consumo dinâmico e a possibilidade de otimizações (subamostragem/multiplexação) reforçam sua adequação para sistemas embarcados de tempo real na IoMT, oferecendo uma solução eficiente, escalável e energeticamente viável para processamento paralelo de sinais biomédicos.

REFERÊNCIAS

- [1] Z. Mao, C. Liu, Q. Li, Y. Cui, and F. Zhou, "Intelligent intensive care unit: Current and future trends," *Intensive Care Research*, vol. 3, no. 2, pp. 182–188, 2023.
 - [2] I. Ben Dhaou, M. Ebrahimi, M. Ben Ammar, G. Bouattour, and O. Kounou, "Edge devices for internet of medical things: Technologies, techniques, and implementation," *Electronics*, vol. 10, no. 17, 2021.
 - [3] B. S. J. Costa, C. G. Bezerra, L. A. Guedes, and P. P. Angelov, "Online fault detection based on typicality and eccentricity data analytics," in *2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, July 2015, pp. 1–6.
 - [4] P. Angelov, "Anomaly detection based on eccentricity analysis," in *2014 IEEE Symposium on Evolving and Autonomous Learning Systems (EALS)*, Dec 2014, pp. 1–8.
 - [5] L. M. D. Da Silva, M. G. F. Coutinho, C. E. B. Santos, M. R. Santos, M. D. Ruiz, L. A. Guedes, and M. A. C. Fernandes, "Hardware architecture proposal for teda algorithm to data streaming anomaly detection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 103 141–103 152, 2021.
 - [6] M. A. Meghravi, Y. Tian, A. Mahnam, P. Bhattachan, L. Eskandarian, S. T. Kakhki, M. R. Popovic, and M. Lankarany, "Multichannel ecg recording from waist using textile sensors," *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 19, p. 48, 2020.
 - [7] R. Marcinkevics, J. O'Neill, H. Law, E. Pervolaraki, A. Hogarth, C. Russell, B. Stegemann, A. V. Holden, and M. H. Tayebjee, "Multichannel electrocardiogram diagnostics for the diagnosis of arrhythmogenic right ventricular dysplasia," *EP Europace*, vol. 20, no. FI1, pp. f13–f19, 08 2017.