

Documento de Escopo de Projeto

Bio-NoC Guardian: Arquitetura MAS em FPGA para Fusão Multimodal e Controle Térmico Ativo

1 Justificativa Arquitetural

A fusão multimodal de bio-sinais críticos em tempo real exige determinismo temporal absoluto e um orçamento termo-energético rigoroso. O processamento sequencial tradicional (arquiteturas de Von Neumann) mostra-se inadequado para este cenário devido à latência cumulativa e aos picos de dissipação térmica gerados por altas frequências de *clock*.

Para atender aos requisitos de implantes e *wearables*, o projeto adota o silício reconfigurável (FPGA) como plataforma essencial. A arquitetura emprega Sistemas Multiagentes (MAS) distribuídos, onde cada bio-sinal é processado de forma autônoma. A comunicação inter-agentes é resolvida por uma Network-on-Chip (NoC) assíncrona, eliminando gargalos de barramento e garantindo que rajadas de dados anômalas no EMG não afetem a via crítica de monitoramento do ECG.

2 Alinhamento Estratégico com o Escopo IEEE Bio-CAS

O *Bio-NoC Guardian* foi desenhado especificamente para gabaritar os tópicos de maior interesse técnico da IEEE BioCAS (*Biomedical Circuits and Systems*). A conferência prioriza inovações que transcendem o simples processamento de sinais, exigindo soluções de *Edge AI* que considerem as restrições físicas da biologia. O projeto atende a esse escopo através de dois pilares fundamentais:

- **Gestão Térmica Ativa e Segurança Biológica (Foco principal da BioCAS):**

Em vez de tratar o aquecimento do chip de forma passiva, o projeto integra um "Agente Termodinâmico" diretamente na malha RTL. Ele calcula o dano térmico cumulativo celular em tempo real. Se o limite de segurança biológica for ameaçado, o sistema executa um *throttling* estruturado na NoC, desativando agentes não-vitais (ex: EMG) para esfriar o silício e preservar a análise miocárdica (ECG). Esta funcionalidade preenche a lacuna atual de tolerância a falhas orgânicas exigida pela comunidade de implantes.

- **Co-Design Algoritmo-Hardware para Ultra-Baixo Consumo:** Apoiado nas diretrizes de TinyML para a saúde, o projeto evita o transbordo de memórias (BRAMs) aplicando técnicas de **Quantização extrema** (ex: INT4/precisão mista e aritmética de ponto fixo) e reuso estrutural de DSPs.

3 Metodologia, Validação e Cronograma

Para garantir a entrega e submissão dentro do *deadline* estrito de 3 meses, o desenvolvimento focará 100% na engenharia de *hardware* (RTL), operando sob os seguintes limites metodológicos:

3.1 Bases de Dados e Injeção Assíncrona

A validação operará exclusivamente sobre repositórios globais padrão-ouro (PhysioNet para ECG/EEG e NinaPro para EMG), dispensando a morosa coleta com pacientes reais. Os dados serão injetados simultaneamente para atestar a capacidade da NoC em processar um fluxo multimodal massivo, garantindo comparabilidade universal aos resultados submetidos.

3.2 Validação

A comprovação empírica exigida pela BioCAS será atendida via simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL). Para testar a imunidade do sistema, o ambiente HIL injetará perturbações do mundo real (descolamento de eletrodo, ruído de 60Hz, saturação de ADC). Este *Imperfect Digital Twin* validará a resiliência dos agentes e o consenso assíncrono.

3.3 Extração da Matriz de Métricas

A equipe deverá consolidar as avaliações de síntese (Vivado/Vitis) necessárias para a aprovação do artigo nos próximos 3 meses, focando em:

- **Área:** Ocupação lógica otimizada (LUTs, FFs, DSPs, URAMs).
- **Consumo e Termodinâmica:** Potência dinâmica em miliwatts (mW), custo na faixa dos nanojoules (nJ) por inferência e modelagem estável da curva CEM43.
- **Confiabilidade e Latência:** Comprovação matemática da *graceful degradation* sob injeção de falhas e manutenção da latência preditiva em microssegundos (μ s).