

## Implementação em Hardware do Algoritmo de Classificação para Apneia Obstrutiva do Sono com Operadores Aritméticos Aproximados

LEONARDO ANTONIETTI FERREIRA<sup>1</sup>; RAFAEL IANKOWSKI SOARES<sup>1</sup>;  
MORGANA M. A. DA ROSA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [laferreira@inf.ufpel.edu.br](mailto:laferreira@inf.ufpel.edu.br);  
[rafael.soares@inf.ufpel.edu.br](mailto:rafael.soares@inf.ufpel.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Católica de Pelotas - [morgana.azevedo@ucpel.edu.br](mailto:morgana.azevedo@ucpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

O sono desempenha um papel essencial na manutenção da saúde física e mental. Distúrbios relacionados ao sono afetam de modo significativo a qualidade de vida, aumentando a incidência de doenças cardiovasculares, metabólicas e neuropsiquiátricas. A Síndrome da Apneia Obstrutiva do Sono (AOS) é a forma mais prevalente desse distúrbio, caracterizando-se pela obstrução parcial ou total das vias aéreas superiores. Tais episódios respiratórios, frequentemente acompanhados por dessaturações de oxigênio e microdespertares, comprometem de forma substancial a arquitetura do sono. Os principais sintomas incluem ronco persistente, sonolência excessiva diurna, fadiga e dificuldades de concentração. Entre os fatores de risco destacam-se idade avançada, obesidade e sexo masculino (JORDAN; MCSHARRY; MALHOTRA, 2014).

Estudos recentes têm demonstrado a associação entre AOS e diversas comorbidades cardiovasculares. SHIINA (2024) apresenta evidências da correlação entre AOS e hipertensão arterial, indicando maior prevalência da doença em pacientes com quadros graves de apneia. Ademais, a AOS também se relaciona com a doença arterial coronariana, potencializada por processos inflamatórios e estresse oxidativo decorrentes dos eventos respiratórios repetitivos. Outras formas, embora menos prevalentes, incluem a Apneia Central do Sono (ACS), associada a falhas na sinalização neurológica responsável pelo controle respiratório, e a apneia mista, que combina elementos das formas obstrutiva e central.

O exame padrão-ouro para diagnóstico da AOS é a polissonografia (PSG), procedimento não invasivo que registra múltiplos parâmetros fisiológicos, como atividade elétrica cerebral e cardíaca, oximetria de pulso, fluxo aéreo nasal e oral, além de movimentos oculares. Apesar de sua elevada precisão, a PSG apresenta barreiras significativas relacionadas ao alto custo, à complexidade operacional e à necessidade de realização em laboratórios especializados, o que inviabiliza sua aplicação como método de triagem em larga escala e dificulta o diagnóstico precoce.

Diante dessa limitação, inúmeras alternativas baseadas em Inteligência Artificial (IA) têm sido propostas. SRAVANTHI et al. (2025) desenvolveram um sistema utilizando o algoritmo Random Forest para análise da movimentação palpebral durante o sono. Já OSA-SANCHEZ et al. (2025) destacaram dispositivos portáteis de monitoramento contínuos integrados a algoritmos de IA, oferecendo soluções não invasivas e acessíveis. Entretanto, o consumo

energético desses sistemas emerge como um fator crítico, especialmente para aplicações embarcadas. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de operações aritméticas aproximadas aplicadas a classificadores de AOS, com vistas à redução do consumo energético e à simplificação do processo diagnóstico.

HASSAN (2022) apresentou uma abordagem eficiente para a implementação de redes neurais (NNs) em hardware, propondo a quantização binária dos parâmetros aprendidos e funções de ativação baseadas em deslocamento. Essa estratégia, denominada SABiNN, reduziu significativamente os requisitos de memória e os custos de inferência. De modo complementar, ALAM (2024) propôs um modelo de *Linear Support Vector Machine* (LSVM), treinado a partir de sinais de ECG provenientes da base UCDDb, que demonstrou a relevância das bandas delta e beta para a detecção de apneia.

Ainda que promissoras, essas soluções podem apresentar variações na precisão diagnóstica e na complexidade de operação, o que limita sua aplicabilidade em cenários reais. Torna-se evidente, portanto, a necessidade de tecnologias que conciliem precisão, confiabilidade, acessibilidade e baixo consumo energético, viabilizando monitoramento domiciliar contínuo e não invasivo.

## 2. METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho estruturou-se em três etapas principais. Inicialmente, realizou-se revisão bibliográfica acerca de classificadores aplicados à AOS, visando consolidar o estado da arte e identificar as técnicas mais promissoras. Em seguida, implementou-se um sistema em software utilizando Python, TensorFlow e Scikit-learn, com o objetivo de selecionar o algoritmo de aprendizado de máquina e as características fisiológicas mais relevantes.

Após a fase exploratória em software, iniciou-se a etapa de implementação em hardware, com descrição em VHDL em nível RTL (*Register Transfer Level*). A síntese lógica será realizada para obtenção de métricas relacionadas ao consumo de potência, área ocupada e tempos de propagação.

A validação seguirá metodologia de comparação entre o modelo ouro (Golden Model), descrito em Simulink, e o circuito sintetizado (*Device Under Test* – DUT). Essa verificação pode ser vista na Fig. 1-a) que utiliza um processo de co-simulação entre Matlab/Simulink e Modelsim, em conjunto com a *Universal Verification Methodology* (UVM). Para a etapa de síntese (Fig. 1-b) emprega-se a ferramenta Cadence Genus™, utilizando biblioteca de células padrão de 65 nm e tensão de alimentação de 1,25 V. O consumo energético será estimado a partir de arquivos VCD (*Value Change Dump*), extraídos por simulação lógica no Cadence Incisive.

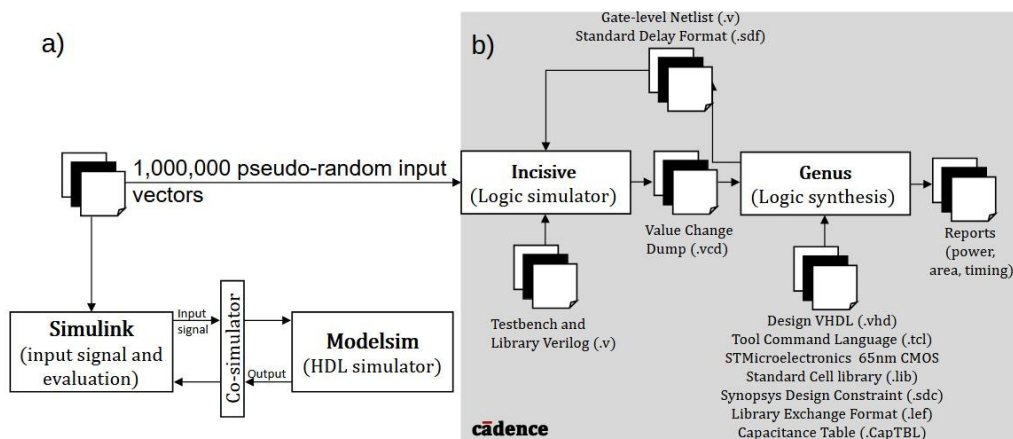


Fig. 1: Metodologia de síntese para circuitos aproximados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho encontra-se atualmente em fase de implementação. Pretende-se avaliar o desempenho dos modelos por meio de métricas como acurácia, sensibilidade e especificidade, utilizando validação k-fold. Resultados da literatura apontam que as bandas delta e beta são as mais relevantes para a detecção de apneia do sono, especialmente nas métricas de energia, mobilidade e curtose. Tais indicadores nortearão a análise experimental proposta.

Adicionalmente, será investigado o uso de redes neurais binárias, cuja eficiência energética mostra-se promissora para aplicações embarcadas. Espera-se comparar os resultados obtidos com os reportados na literatura, destacando os avanços em termos de consumo de potência, área de implementação e desempenho diagnóstico.

### 4. CONCLUSÕES

Espera-se que, ao final deste estudo, seja desenvolvido um classificador de apneia obstrutiva do sono baseado em inteligência artificial, capaz de operar com baixo consumo energético e elevada precisão. Essa característica possibilitará a implementação em dispositivos portáteis e vestíveis, ampliando o acesso a diagnósticos precoces, acessíveis e economicamente viáveis. Além disso, a pesquisa busca contribuir para a consolidação de metodologias que integrem aprendizado de máquina e arquiteturas de hardware otimizadas, fornecendo uma base sólida para futuros desenvolvimentos em sistemas embarcados aplicados à saúde.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JORDAN, A. S.; MCSHARRY, D. G.; MALHOTRA, A. Adult obstructive sleep apnoea. **The Lancet**, v.383, n.9918, p.736–747, 2014.

SHIINA, K. Obstructive sleep apnea-related hypertension: a review of the literature and clinical management strategy. **Hypertension Research**, v.47, n.11, p.3085–3098, 2024.

SRAVANTHI, M.; GUNTURI, S. K.; CHINNAIAH, M. C.; DIVYA VANI, G.; BASHA, M.; JANARDHAN, N.; HARI KRISHNA, D.; DUBEY, S. Hardware-Accelerated Non-Contact System for Sleep Disorder Monitoring and Analysis. **Sensors**, v.25, n.9, p.2747, 2025.

OSA-SANCHEZ, A.; SORIA, J.; MENDEZ-ZORRILLA, A.; RUIZ, I. O.; GARCIA-ZAPIRAIN, B. Wearable Sensors and Artificial Intelligence for Sleep Apnea Detection: A Systematic Review. **Journal of Medical Systems**, v.49, n.1, p.1–25, 2025.

HASSAN, O. et al. SABiNN: FPGA implementation of shift accumulate binary neural network model for real-time automatic detection of sleep apnea. In: **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**. IEEE, 2022.

ALAM, M. S.; SIDDIQUI, Y.; HASAN, M.; FAROOQ, O.; HIMEUR, Y. Energy-efficient FPGA based sleep apnea detection using EEG signals. **IEEE Access**, v.12, p.40182–40195, 2024.

BASU, K.; SAEED, S. M.; PILATO, C.; ASHRAF, M.; NABEEL, M. T.; CHAKRABARTY, K.; KARRI, R. CAD-Base: An attack vector into the electronics supply chain. **ACM TODAES**, v.24, n.4, p.1–30, 2019.

LIMAYE, N.; KALLIGEROS, E.; KAROUSOS, N.; KARYBALI, I. G.; SINANOGLU, O. Thwarting all logic locking attacks: Dishonest oracle with truly random logic locking. **IEEE TCAD**, v.40, n.9, p.1740–1753, 2020.