UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-NEU01] Fundamentos da Computação Neuromórfica

A Barreira de von Neumann, Biofísica de Redes e Vantagens da Luz

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo

1. O Gargalo de von Neumann e a Crise Energética

2. Biofísica de Redes e Mapeamento Óptico

A Barreira da Memória (The Memory Wall)

O Paradigma de von Neumann na Era da Inteligência Artificial

- **Separação Física Estrita:** Unidade de processamento (CPU/GPU) e memória de alta densidade (HBM/DRAM) são separadas por barramentos metálicos.
- **Custo Energético de Transporte:** O consumo para mover 64 bits de dados entre chips excede em até 100× a energia necessária para executar a operação de multiplicação e acumulação (MAC) correspondente.
- **Assimetria com a Biologia:** O cérebro humano consome ~ 20 W para realizar 10^{16} conexões/s; clusters de GPUs modernas demandam megawatts com resfriamento complexo.

Solução da Fotônica Neuromórfica

A computação analógica no domínio óptico executa operações matemáticas com **latência de tempo de voo** dos fótons e **zero consumo de carga estática** durante a transmissão.

Comparativo Tecnológico: Eletrônica vs Fotônica

Processamento Eletrônico

- **Portadores:** Elétrons com massa de repouso e espalhamento por fônons.
- **Largura de Banda:** Limitada por parasitas RC (< 5 GHz).
- **Interconexões:** Efeito pelicular (*skin effect*) e diafonia eletromagnética capacitiva.
- **Energia/MAC:** ~ 1 a 10 pJ/op.

Processamento Fotônico

- **Portadores:** Fótons (bósons sem carga, propagação c/n).
- **Largura de Banda:** Taxas de chaveamento THz (> 100 GHz).
- **Interconexões:** Multiplexação WDM maciça sem interferência cruzada linear.
- **Energia/MAC:** < 50 fJ/op (regime de sub-picojoules).

Do Neurônio Biológico ao Modelo Matemático

Equação Canônica do Perceptron Óptico

O processamento analógico em redes neurais resume-se à multiplicação matriz-vetor (MVM) e aplicação de função de ativação não-linear:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^{N} W_{ij} x_j + b_i\right)$$

Mapeamento para Variáveis Físicas da Luz:

- **Entrada (x_j):** Amplitude de campo elétrico E_j, intensidade óptica $|E_j|^2$ ou potência óptica P_j.
- **Pesos Sinápticos (W_{ij}):** Transmissão óptica de interferômetros MZI ou fatores de acoplamento em microranéis.
- **Soma Linear ($\sum$):** Interferência construtiva de modos espaciais ou acúmulo de fotocorrente em fotodiodos balanceados.
- **Ativação Não-Linear (f):** Saturação de absorção, dispersão de portadores livres ou fotodetecção com amplificação eletrônica.

Síntese e Referências do Módulo [MOD-NEU01]

Obras Centrais de Consulta

- **Paul R. Prucnal & Bhavin J. Shastri (2017):** *Neuromorphic Photonics*, CRC Press / Taylor & Francis Group, ISBN 9781498725224.
- **Lorenzo Pavesi (2026):** *When Microring Resonators Behave Like Neurons*, Optics & Photonics News (Optica).
- **PNC 2027:** *XIV Winter School on Physical Neuromorphic Computing*, Università di Trento.

Continuidade da Trilha Formativa

Material didático coordenado pelo Prof. Marcelo Segatto para o Portal de Educação do IN-Foton.