



DESENVOLVIMENTO DE UM ACELERADOR INT8 BASEADO EM SYSTOLIC ARRAY EM FPGA INTEGRADO A UM SYSTEM-ON-CHIP

Thiago Fernandes

Itajaí – SC
2025

Thiago Fernandes

Desenvolvimento de um Acelerador INT8 Baseado em Systolic Array em FPGA Integrado a um System-on-Chip

Estudo acadêmico desenvolvido de forma independente como parte do aprofundamento em arquitetura de computadores, sistemas embarcados e aceleração de hardware em FPGA, no âmbito do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI.

Itajaí – SC
2025

RESUMO

O crescimento da complexidade computacional em aplicações modernas tem impulsionado o uso de aceleradores de hardware como forma de aumentar o desempenho e a eficiência energética. Nesse contexto, dispositivos FPGA destacam-se por permitir a implementação de arquiteturas paralelas altamente customizadas.

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um acelerador de operações aritméticas em ponto fixo de 8 bits (INT8), baseado em uma arquitetura de systolic array e implementado em linguagem VHDL. O acelerador foi integrado a um sistema em chip por meio do barramento Avalon Memory-Mapped, utilizando um wrapper dedicado para encapsular a lógica de computação e permitir sua comunicação com um processador softcore. **Palavras-chave:** FPGA. Acelerador de hardware. Systolic Array. System-on-Chip. VHDL.

SUMÁRIO

1	Introdução	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Aceleradores de Hardware em FPGA	5
2.2	Arquitetura Systolic Array	5
2.3	Aritmética em Ponto Fixo INT8	5
3	Metodologia	6
4	Desenvolvimento do Acelerador	7
5	Arquitetura do System-on-Chip	8
5.1	Componentes do SoC	8
5.2	Modelo de Comunicação	9
5.3	Fluxo de Dados do Sistema	9
6	Verificação Funcional e Análise de Desempenho	10
6.1	Ambiente de Simulação	10
6.2	Inicialização do Sistema	10
6.3	Escrita e Controle via Barramento Avalon	10
6.4	Registradores Internos do Acelerador	11
6.5	Execução do Acelerador	11
6.6	Análise de Latência	11
6.7	Análise de Throughput	12
6.8	Discussão dos Resultados	12
7	Conclusão	13
	Referências	14

1 INTRODUÇÃO

O avanço das aplicações computacionais nas últimas décadas tem intensificado a demanda por maior desempenho e eficiência energética, especialmente em áreas como processamento digital de sinais, visão computacional e aprendizado de máquina. Essas aplicações envolvem, em sua maioria, operações matemáticas repetitivas e altamente paralelizáveis, que não são exploradas de forma eficiente por arquiteturas baseadas exclusivamente em processadores de propósito geral [1].

Nesse cenário, aceleradores de hardware surgem como uma alternativa eficaz, permitindo a execução de tarefas específicas em unidades dedicadas. De acordo com Kuon, Tessier e Rose [2], dispositivos FPGA oferecem uma combinação única de flexibilidade e paralelismo, possibilitando a implementação de arquiteturas customizadas com elevado desempenho.

Arquiteturas baseadas em *systolic arrays* têm sido amplamente utilizadas em aceleradores modernos devido à sua escalabilidade, eficiência computacional e elevado reuso de dados. Essas arquiteturas são particularmente adequadas para operações de multiplicação e acumulação, fundamentais em algoritmos de aprendizado de máquina [4].

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um acelerador INT8 baseado em systolic array, bem como sua integração em um System-on-Chip utilizando FPGA, explorando conceitos de modularização, encapsulamento e integração hardware/software.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ACELERADORES DE HARDWARE EM FPGA

Aceleradores de hardware são unidades especializadas projetadas para executar funções específicas de forma mais eficiente do que processadores de propósito geral. Segundo Hennessy e Patterson [1], essa abordagem permite aumentar significativamente o desempenho ao reduzir o número de instruções executadas em software.

Em dispositivos FPGA, aceleradores podem ser implementados diretamente na lógica reconfigurável, explorando paralelismo espacial e pipelines profundos. Estudos demonstram que, apesar de apresentarem menor eficiência em área quando comparados a ASICs, os FPGAs oferecem flexibilidade e tempo de desenvolvimento reduzido [3].

2.2 ARQUITETURA SYSTOLIC ARRAY

A arquitetura *systolic array*, introduzida por Kung e Leiserson [4], consiste em uma rede de unidades de processamento que operam de forma síncrona, com dados fluindo ritmicamente entre os elementos. Esse modelo reduz acessos à memória externa e favorece o reuso de dados intermediários.

Devido a essas características, systolic arrays são amplamente empregados em aceleradores para multiplicação matricial, convoluções e inferência em redes neurais.

2.3 ARITMÉTICA EM PONTO FIXO INT8

A utilização de aritmética em ponto fixo de 8 bits (INT8) tem se tornado comum em aceleradores de aprendizado de máquina. Trabalhos recentes demonstram que, com técnicas adequadas de quantização e acumulação, é possível obter desempenho elevado com baixo impacto na precisão [5]. Além disso, a aritmética INT8 reduz significativamente o consumo de energia e a área ocupada no FPGA.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do acelerador seguiu uma abordagem incremental. Inicialmente, foi projetada a unidade elementar de processamento responsável pelas operações de multiplicação e acumulação em formato INT8. Em seguida, essas unidades foram interconectadas em um systolic array unidimensional.

Após a validação funcional em nível RTL, foi desenvolvido um wrapper compatível com o barramento Avalon Memory-Mapped, conforme especificado pela Intel [6]. Por fim, o acelerador foi integrado a um System-on-Chip utilizando o Intel Platform Designer [7], juntamente com um processador softcore, memória on-chip e controladores de clock e reset.

4 DESENVOLVIMENTO DO ACELERADOR

O acelerador desenvolvido neste estudo foi implementado integralmente em linguagem VHDL e estruturado de forma modular, visando facilitar sua compreensão, reutilização e expansão futura. A arquitetura adotada baseia-se em unidades elementares de processamento interconectadas em um systolic array unidimensional.

Cada unidade elementar de processamento realiza operações de multiplicação entre um dado de entrada e um peso, ambos representados em formato INT8. O resultado da multiplicação é acumulado em um registrador de 32 bits, garantindo segurança contra overflow durante operações sucessivas. A unidade é síncrona e utiliza pipeline para permitir operação em frequências mais elevadas.

O systolic array é formado pela interconexão sequencial dessas unidades, permitindo que os dados de entrada sejam propagados entre os elementos enquanto os pesos permanecem estacionários. Essa abordagem reduz a necessidade de acessos à memória e favorece o paralelismo computacional. O resultado final da acumulação é disponibilizado na saída do array para leitura pelo processador.

5 ARQUITETURA DO SYSTEM-ON-CHIP

A arquitetura do sistema em chip desenvolvido neste estudo segue um modelo clássico de SoC baseado em barramento, no qual um processador central coordena a execução das aplicações e o controle dos periféricos especializados. O acelerador INT8 foi integrado como um periférico customizado, acessível por meio do barramento Avalon Memory-Mapped.

A Figura 1 apresenta uma visão geral da arquitetura do sistema.

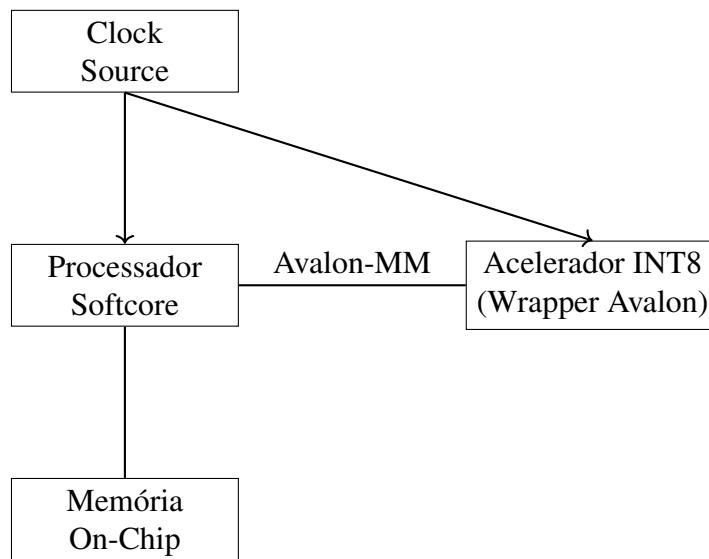


Figura 1 – Arquitetura do System-on-Chip com acelerador INT8 integrado

5.1 COMPONENTES DO SOC

O SoC é composto pelos seguintes blocos principais:

- **Fonte de Clock:** responsável pela geração do sinal de clock global do sistema.
- **Processador Softcore:** executa o software de controle e realiza acessos ao barramento Avalon-MM.
- **Memória On-Chip:** armazena o código do programa e dados de execução.
- **Controlador de Reset:** garante a inicialização síncrona e consistente dos módulos.
- **Acelerador INT8:** periférico customizado responsável pelas operações de multiplicação e acumulação.

5.2 MODELO DE COMUNICAÇÃO

A comunicação entre o processador e o acelerador ocorre exclusivamente por meio de acessos ao barramento Avalon Memory-Mapped. O acelerador é mapeado em um espaço de endereçamento específico e controlado por registradores, permitindo uma integração simples e eficiente.

Essa abordagem favorece a modularidade do sistema, pois o acelerador pode ser substituído ou expandido sem a necessidade de alterações na arquitetura global do SoC.

5.3 FLUXO DE DADOS DO SISTEMA

O fluxo de dados do sistema inicia-se no software executado pelo processador, que escreve os valores de entrada e os pesos nos registradores do acelerador por meio de acessos de escrita no barramento Avalon-MM. Após a configuração dos dados, o software ativa o acelerador por meio de um registrador de controle.

Internamente, o wrapper converte os acessos do barramento em sinais de controle e dados para o systolic array. Os dados de entrada são propagados sequencialmente entre as unidades de processamento, enquanto os pesos permanecem estacionários em cada elemento do array. O resultado acumulado é então disponibilizado em um registrador de saída, que pode ser lido pelo processador.

Esse modelo de operação permite desacoplar completamente o software da implementação interna do acelerador, reforçando o encapsulamento e a reutilização do hardware.

6 VERIFICAÇÃO FUNCIONAL E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Este capítulo apresenta o processo de verificação funcional do acelerador INT8 integrado ao System-on-Chip, bem como a análise de desempenho obtida por meio de simulação temporal. As validações foram realizadas em nível RTL utilizando o ModelSim, permitindo observar o comportamento interno do sistema e medir métricas como latência e throughput.

6.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A verificação funcional do sistema foi realizada por meio de um testbench desenvolvido em VHDL, responsável por gerar os sinais de clock, reset e estímulos do barramento Avalon Memory-Mapped. O clock do sistema foi configurado com período de 10 ns, correspondente a uma frequência de 100 MHz.

O testbench simula o comportamento do software embarcado, realizando escritas nos registradores do acelerador, ativando sua execução e monitorando os sinais de saída.

6.2 INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA

A Figura 2 apresenta os sinais de clock e reset do sistema. Observa-se que o reset é aplicado durante os ciclos iniciais da simulação, garantindo a inicialização adequada de todos os registradores internos do acelerador e do System-on-Chip.



Figura 2 – Sinais de clock e reset durante a inicialização do sistema

6.3 ESCRITA E CONTROLE VIA BARRAMENTO AVALON

A comunicação entre o processador e o acelerador ocorre por meio do barramento Avalon Memory-Mapped. A Figura 3 ilustra as operações de escrita realizadas pelo software nos registradores internos do acelerador, incluindo a escrita dos dados de entrada, dos pesos e do registrador de controle responsável por iniciar a execução.



Figura 3 – Escrita de dados e controle no acelerador via barramento Avalon-MM

6.4 REGISTRADORES INTERNOS DO ACELERADOR

A Figura 4 apresenta o comportamento dos registradores internos do acelerador durante a simulação. Observa-se o correto armazenamento dos valores de entrada, dos pesos e do registrador de controle, validando o funcionamento do wrapper Avalon e o mapeamento de memória adotado.

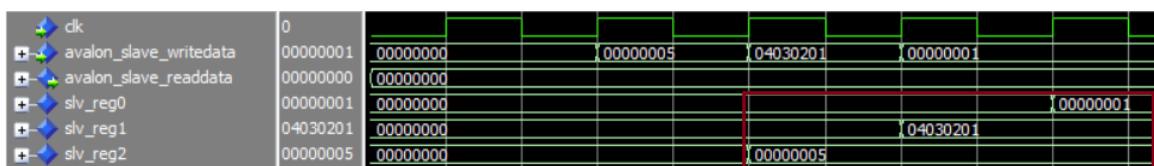


Figura 4 – Estado dos registradores internos do acelerador

6.5 EXECUÇÃO DO ACELERADOR

Após a ativação do sinal de início de execução, o acelerador realiza as operações de multiplicação e acumulação em formato INT8. A Figura 5 apresenta o sinal de saída do acelerador, evidenciando a geração do resultado final após o processamento interno.



Figura 5 – Execução do acelerador e geração do resultado

6.6 ANÁLISE DE LATÊNCIA

A latência do acelerador foi medida como o número de ciclos de clock entre a ativação do sinal *start* e a disponibilização do resultado válido na saída. Conforme ilustrado na Figura 6, observa-se que o resultado final é produzido após três ciclos de clock, sendo identificado um valor intermediário em dois ciclos.

Considerando o período de clock de 10 ns, a latência total do acelerador é de aproximadamente 30 ns.

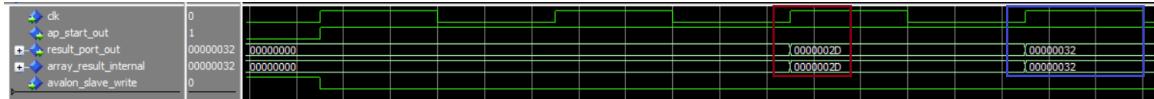


Figura 6 – Latência do acelerador medida em ciclos de clock

6.7 ANÁLISE DE THROUGHTPUT

A análise de throughput foi realizada observando-se a capacidade do acelerador de produzir resultados em execuções consecutivas. A Figura 7 mostra que, após o preenchimento do pipeline, novos resultados são produzidos a cada dois ciclos de clock.

Esse comportamento evidencia a eficiência do paralelismo estrutural adotado na arquitetura do systolic array, permitindo alta taxa de processamento com baixa latência incremental.



Figura 7 – Throughput do acelerador após preenchimento do pipeline

6.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram o correto funcionamento do acelerador INT8 integrado ao System-on-Chip, validando tanto a lógica de computação quanto a interface de comunicação via barramento Avalon-MM.

A baixa latência e o alto throughput observados confirmam a eficácia da arquitetura baseada em systolic array, evidenciando o potencial de aceleradores dedicados em FPGA para aplicações computacionalmente intensivas.

7 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou a viabilidade da implementação de um acelerador INT8 baseado em systolic array em FPGA, bem como sua integração em um sistema em chip. A abordagem adotada possibilita a expansão futura da arquitetura e sua adaptação para diferentes aplicações.

REFERÊNCIAS

- [1] HENNESSY, John L.; PATTERSON, David A. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. 6. ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2019.
- [2] KUON, Ian; TESSIER, Russell; ROSE, Jonathan. FPGA Architecture: Survey and Challenges. *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, v. 2, n. 2, p. 135–253, 2008.
- [3] KUON, Ian; ROSE, Jonathan. Measuring the gap between FPGAs and ASICs. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, v. 26, n. 2, p. 203–215, 2007.
- [4] KUNG, H. T.; LEISERSON, C. E. Systolic Arrays for VLSI. In: *Sparse Matrix Proceedings*. Academic Press, 1979.
- [5] JACOB, Benoit et al. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018.
- [6] INTEL CORPORATION. *Avalon Interface Specifications*. Intel FPGA Documentation, 2024.
- [7] INTEL CORPORATION. *Platform Designer User Guide*. Intel FPGA Documentation, 2024.
- [8] BERGERON, Janick. *Writing Testbenches: Functional Verification of HDL Models*. 2. ed. Springer, 2003.