

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GUILHERME HANIEL COSTA PASSINHO - 20250020340

JÔNATHAS SILVA OLIVEIRA - 2021024590

JOSÉ AUGUSTO SANTOS LOPES - 2021066213

LIAH RENATA COLINS DA SILVA - 2023030013

WANDERSON CAMPOS SOARES - 2021052281

**PESQUISA POR TECNOLOGIAS DE PONTA: O PAPEL DOS CIRCUITOS
LÓGICOS E DA ULA NA ARQUITETURA DOS PROCESSADORES MODERNOS**

São Luís, MA

2025

GUILHERME HANIEL COSTA PASSINHO

JÔNATHAS SILVA OLIVEIRA

JOSÉ AUGUSTO SANTOS LOPES

LIAH RENATA COLINS DA SILVA

WANDERSON CAMPOS SOARES

**PESQUISA POR TECNOLOGIAS DE PONTA: O PAPEL DOS CIRCUITOS
LÓGICOS E DA ULA NA ARQUITETURA DOS PROCESSADORES MODERNOS**

Trabalho apresentado à disciplina de
Arquitetura de computadores do curso de
Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia da Universidade Federal do
Maranhão.

Orientador: Prof. Luiz Henrique Neves
Rodrigues

São Luís, MA

2025

RESUMO

Este trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica sobre o uso de tecnologias de ponta no estudo e simulação de operações lógicas no contexto da Arquitetura de Computadores. A proposta se insere na execução de um simulador voltado à representação do funcionamento interno das operações lógicas básicas — como AND, OR, NOT, XOR — que compõem os fundamentos do processamento digital. A abordagem enfatiza como essas operações são executadas em nível de hardware e representadas na linguagem de máquina, evidenciando o papel dos circuitos lógicos e da Unidade Lógica e Aritmética (ULA) nos processadores modernos. A pesquisa visa identificar metodologias e recursos computacionais que contribuam para o desenvolvimento de ferramentas educacionais implementadas em linguagem C, respeitando os princípios de desempenho e controle da arquitetura computacional clássica. A análise reforça a importância de compreender a lógica por trás da execução das instruções para o desenvolvimento de sistemas eficientes e otimizados, conectando os fundamentos teóricos da computação com práticas contemporâneas de ensino e desenvolvimento.

Palavras-chave: Arquitetura de Computadores. Operações Lógicas. Simulação. Unidade Lógica e Aritmética. Linguagem C.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Objetivos	6
1.1.1 Objetivo Geral	6
1.1.2 Objetivos Específicos	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Princípios da Arquitetura de Computadores e Operações Lógicas	7
2.2 Unidade Lógica e Aritmética (ULA): Estrutura e Relevância	9
2.3 Tecnologias de Ponta	11
2.3.1 Softwares de Simulação de Arquiteturas	11
2.3.2 Tecnologias de Fabricação Avançada	14
2.3.3 ULAs de Baixo Consumo de Energia	15
3 CONCLUSÃO	16
REFERÊNCIAS	17

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da computação moderna está profundamente ligado à evolução da arquitetura de computadores, sendo os circuitos lógicos e a Unidade Lógica e Aritmética (ULA) componentes centrais para o processamento de informações. Desde os primeiros modelos computacionais, a capacidade de realizar operações lógicas e aritméticas em nível de hardware permitiu avanços significativos em desempenho, confiabilidade e miniaturização dos sistemas computacionais. Compreender como essas operações são realizadas internamente é fundamental não apenas para o domínio da teoria computacional, mas também para a prática do desenvolvimento de sistemas de hardware e software mais eficientes (STALLINGS, 2010; DELGADO; RIBEIRO, 2009).

Nesse contexto, o estudo das operações lógicas — como AND, OR, NOT e XOR — associadas à função da ULA, oferece uma base sólida para o entendimento da forma como os processadores realizam tarefas elementares, que se somam para formar instruções mais complexas. O ensino dessa base teórica vem sendo apoiado por ferramentas de simulação, como o Logisim Evolution (CHIAPPIN et al., 2020), que permitem ao estudante visualizar, construir e testar circuitos digitais, e compreender, na prática, como as operações são implementadas em nível físico e lógico.

A presente pesquisa busca identificar e analisar tecnologias de ponta que têm sido utilizadas no ensino e na simulação de circuitos lógicos e ULAs, visando não apenas a compreensão estrutural desses componentes, mas também sua relevância na evolução dos processadores modernos. Recursos como o ModelSim e linguagens de descrição de hardware (COELHO; RODRIGUES, 2019), bem como plataformas educacionais como o Ripes (SCHMIDT, 2021) e o SimuS (SANTOS, 2020), demonstram como ferramentas atuais têm colaborado para uma aprendizagem mais interativa e tecnicamente fundamentada.

Além disso, destaca-se a aplicação de tecnologias como os FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) como plataforma experimental para o ensino de arquitetura de computadores. Segundo Sousa e Alves (2021), o uso de FPGAs em contextos educacionais permite que estudantes projetem e implementem suas próprias arquiteturas, promovendo uma vivência prática do que, tradicionalmente, é abordado apenas em nível teórico. A combinação entre a teoria dos livros clássicos

e o uso de tecnologias emergentes contribui significativamente para a criação de engenheiros e cientistas da computação mais preparados para os desafios atuais da área.

Dessa forma, a pesquisa aqui apresentada tem como finalidade principal realizar um levantamento bibliográfico qualificado sobre as tecnologias emergentes voltadas ao estudo e simulação das operações lógicas e da ULA, contextualizando seu papel na arquitetura dos processadores. Tal investigação é essencial para aproximar os estudantes dos fundamentos da computação moderna, demonstrando como a base lógica e aritmética dos sistemas digitais ainda sustenta os avanços mais recentes da indústria e da academia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e aplicar tecnologias de ponta no estudo das operações lógicas e da Unidade Lógica e Aritmética (ULA) na arquitetura dos processadores modernos, por meio do desenvolvimento de um simulador educacional em linguagem C, que promova a integração entre teoria e prática no ensino de arquitetura de computadores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos da arquitetura de computadores e das operações lógicas que sustentam os processadores;
- Investigar e explorar o uso de tecnologias de ponta, como Logisim Evolution, ModelSim, Ripes, SimuS e FPGAs, no ensino e na simulação de circuitos lógicos e da ULA;
- Compreender como essas tecnologias permitem a visualização prática do funcionamento interno dos processadores;
- Relacionar os conceitos teóricos de circuitos lógicos e ULA às práticas de desenvolvimento e simulação de processadores.
- Analisar o impacto das tecnologias de fabricação avançada na eficiência e desempenho das ULAs modernas;

- Investigar técnicas de redução de consumo energético em arquiteturas digitais, como *clock gating*, *power gating* e operação em baixa voltagem.
- Realizar testes comparativos entre diferentes ferramentas de simulação (Logisim Evolution, Ripes, ModelSim, etc.) quanto à usabilidade, fidelidade e aplicabilidade didática;
- Explorar o uso de aritmética aproximada como técnica de otimização energética em simulações de ULA;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA


2.1 Princípios da Arquitetura de Computadores e Operações Lógicas

A arquitetura de computadores é o campo da ciência da computação e da engenharia elétrica responsável pelo estudo do funcionamento interno dos sistemas computacionais, desde a manipulação de dados em nível binário até a execução de instruções complexas. Segundo Stallings (2010), a arquitetura de um computador abrange a estrutura e o comportamento de um sistema de computação como observado por um programador, incluindo os conjuntos de instruções, modos de endereçamento, mecanismos de entrada e saída e organização dos registradores. Os principais componentes dessa arquitetura incluem a Unidade Central de Processamento (CPU), a memória principal, os dispositivos de entrada/saída e os barramentos que interligam esses elementos.

No nível mais fundamental, toda a operação de um computador depende da manipulação de sinais binários — valores representados por dois estados possíveis: 0 e 1. Essa manipulação é realizada por meio de operações lógicas básicas, como as portas AND, OR, NOT e XOR. Essas operações são responsáveis por executar decisões lógicas e transformações de dados em circuitos digitais. A operação AND, por exemplo, resulta em 1 apenas quando ambas as entradas são 1; a OR resulta em 1 se ao menos uma entrada for 1; a NOT inverte o valor de entrada; e a XOR (ou exclusivo) retorna 1 somente quando as entradas são diferentes. Essas funções são implementadas fisicamente em circuitos eletrônicos usando transistores e compõem a base da lógica digital dos processadores. Na figura abaixo, é apresentada a tabela verdade dessas portas lógicas.

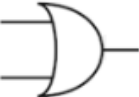
Figura 1 - Tabela verdade das portas lógicas AND, OR, NOT, XOR.

AND




E1	E2	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

OR




E1	E2	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

XOR



E1	E2	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOT

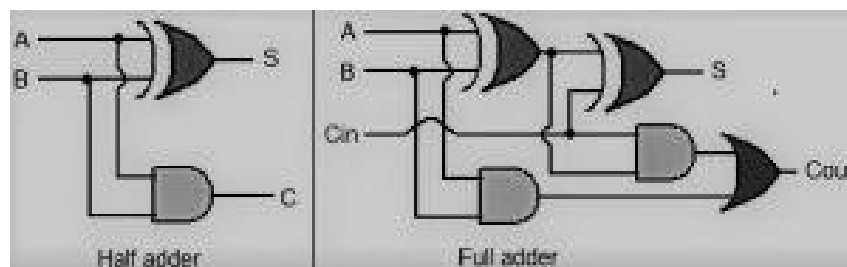


E	S
0	1
1	0

Fonte: ITALOINFO (2021)

Essas operações são organizadas em estruturas chamadas circuitos lógicos combinacionais, nos quais a saída depende exclusivamente das entradas atuais, sem depender de valores passados. Exemplos típicos incluem somadores binários (figura 2), multiplexadores, comparadores e decodificadores. Esses circuitos são essenciais porque realizam cálculos, decisões e encaminhamentos de dados dentro dos sistemas digitais. Conforme Delgado e Ribeiro (2009), a construção de unidades computacionais mais complexas, como a Unidade Lógica e Aritmética (ULA), depende diretamente da combinação e interconexão desses blocos lógicos elementares.

Figura 2 - Exemplo de circuito lógico combinacional.



Fonte: ELPROCUS (2021)

Além da lógica combinacional, os computadores também utilizam circuitos sequenciais — que envolvem memória e estados anteriores —, mas para a compreensão das operações lógicas fundamentais, os circuitos combinacionais são o ponto de partida. Eles determinam como os bits são somados, comparados, deslocados e processados pela máquina. Cada operação executada por um programa, do nível mais simples ao mais complexo, é composta por essas

operações lógicas em nível de hardware, o que evidencia a importância de compreendê-las na formação de engenheiros e cientistas da computação.

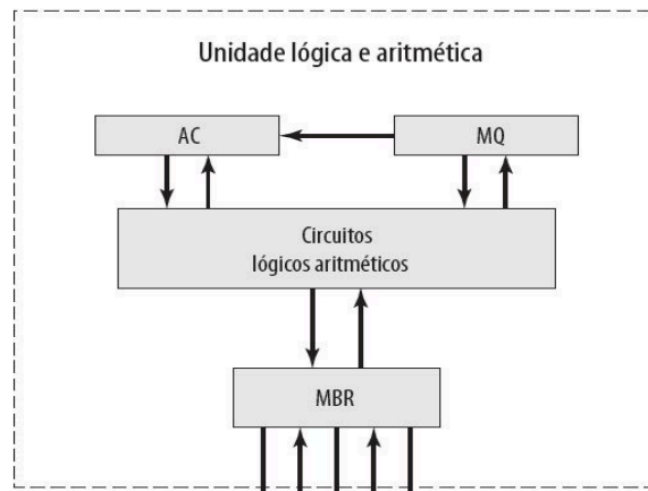
Assim, ao estudar a arquitetura de computadores sob a ótica das operações lógicas e dos circuitos combinacionais, entende-se que o processamento computacional é, essencialmente, uma sequência estruturada de decisões lógicas realizadas a altíssimas velocidades. Essa base teórica é imprescindível para compreender o funcionamento de unidades mais sofisticadas, como a ULA, e para explorar ferramentas modernas de simulação e prototipagem de sistemas computacionais.

2.2 Unidade Lógica e Aritmética (ULA): Estrutura e Relevância

A Unidade Lógica e Aritmética (ULA) é um dos principais componentes da Unidade Central de Processamento (CPU) e é responsável pela execução das operações matemáticas e lógicas fundamentais em um sistema computacional. Conforme Delgado e Ribeiro (2009), a ULA é o núcleo onde ocorrem os cálculos e decisões lógicas, sendo projetada para manipular diretamente os dados binários armazenados nos registradores da CPU. Ela executa instruções simples, mas essenciais, que servem como base para todas as operações computacionais complexas realizadas pelos programas.

A estrutura interna da ULA é composta por circuitos lógicos que implementam funções aritméticas (como adição, subtração, incremento, decremento) e lógicas (como AND, OR, NOT, XOR). Essas funções são realizadas sobre operandos binários fornecidos por registradores internos e são controladas por sinais enviados pela unidade de controle da CPU. Um exemplo clássico é o somador completo (full adder), que serve de base para implementar a operação de soma de múltiplos bits dentro da ULA. Segundo Stallings (2010), a ULA (figura 3) funciona de forma sincronizada com o clock do sistema, o que permite a execução coordenada das instruções em alta velocidade.

Figura 3 - Unidade Lógica e Aritmética (ULA).

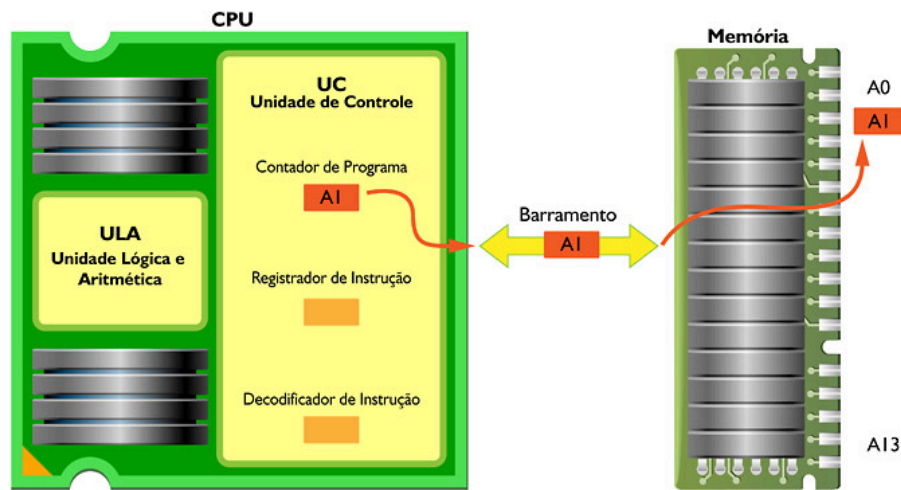


Fonte:STALLINGS (2009)

A importância da ULA reside no fato de que ela é diretamente responsável por executar o núcleo das instruções do processador, aquelas que envolvem cálculos ou decisões lógicas. Em arquiteturas baseadas no modelo de von Neumann, a maior parte das instruções de máquina envolve algum tipo de processamento aritmético e lógico, tornando a ULA uma peça essencial para o desempenho geral do sistema. Processadores modernos, como os utilizados em smartphones e servidores, ainda se baseiam nos mesmos princípios fundamentais das ULAs clássicas, mas com otimizações significativas em termos de paralelismo, pipeline e largura de barramentos.

Outro aspecto fundamental da ULA é sua relação com os registradores e barramentos. Os registradores são pequenas memórias internas que armazenam temporariamente os dados a serem processados ou os resultados de operações. A ULA lê os operandos diretamente desses registradores, realiza a operação solicitada e grava o resultado de volta. Os barramentos, por sua vez, interligam a ULA aos demais componentes da CPU e à memória, garantindo o fluxo adequado de dados e instruções. Essa interconexão entre ULA, registradores e barramentos garante a operação fluida e eficaz do ciclo de instrução da CPU.

Figura 4 - Ciclo de execução com ULA, registradores e barramentos.



Fonte:UFRN (2021)

Compreender o funcionamento da ULA é essencial não apenas para entender como os processadores operam, mas também para explorar a evolução das arquiteturas modernas. Tecnologias como pipelines, execução especulativa, multiplicadores paralelos e FPGAs continuam a utilizar, como base, os princípios da ULA. Por isso, seu estudo é fundamental tanto para o projeto de novos sistemas quanto para a simulação e ensino da arquitetura de computadores.

2.3 Tecnologias de Ponta

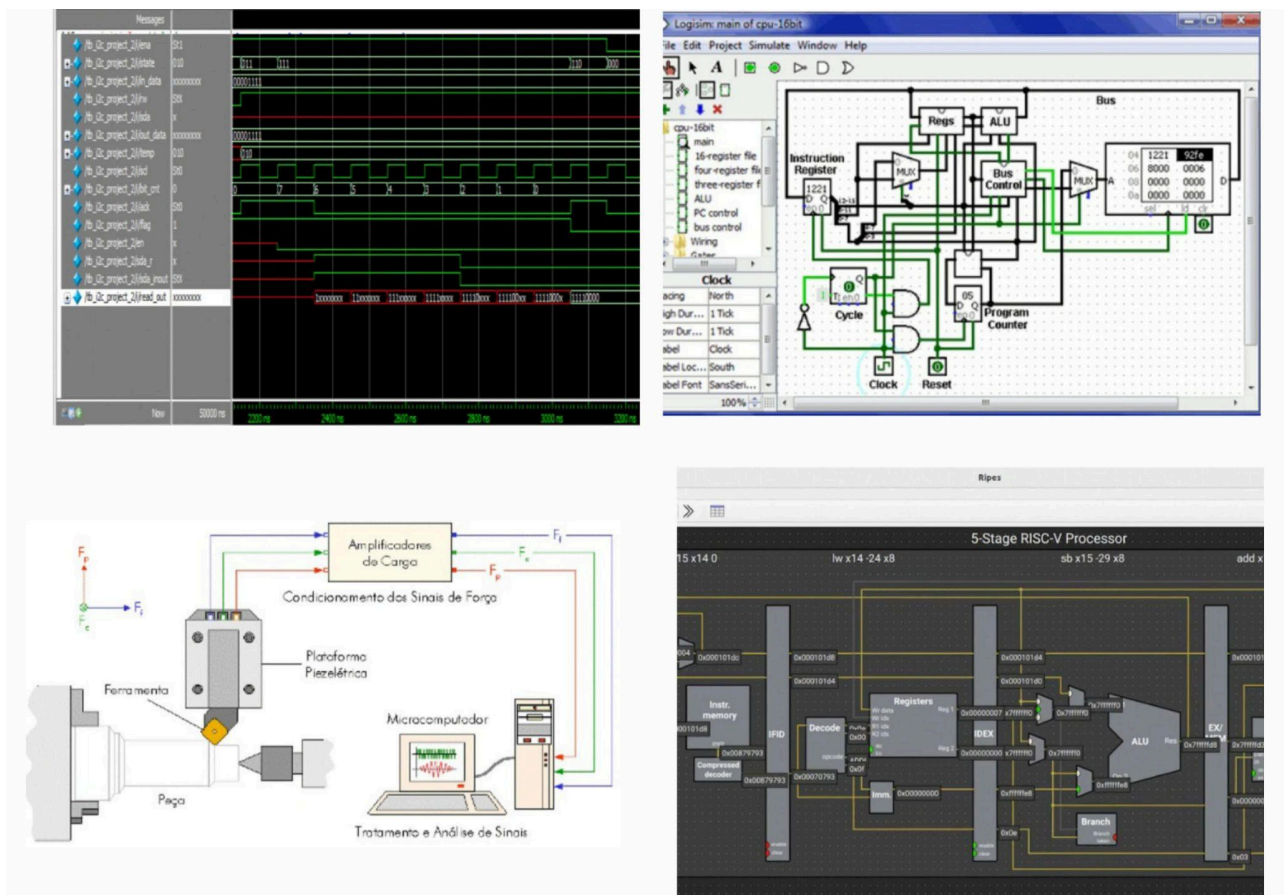
2.3.1 Softwares de Simulação de Arquiteturas

Com o avanço da tecnologia e da educação digital, diversas ferramentas modernas foram desenvolvidas para apoiar o ensino, a simulação e o projeto de arquiteturas de computadores, com ênfase em circuitos lógicos e na Unidade Lógica e Aritmética (ULA). Dentre as mais utilizadas no contexto educacional e acadêmico destacam-se o Logisim Evolution, o ModelSim, o Ripes e o SimuS, cada uma com suas peculiaridades e aplicações específicas no estudo de circuitos digitais. Estas tecnologias de ponta contribuem significativamente para a visualização, depuração e compreensão dos processos internos que ocorrem dentro de um processador moderno.

O Logisim Evolution é amplamente reconhecido por sua interface intuitiva e capacidade de simular circuitos digitais em tempo real. Ele permite que os

estudantes projetem portas lógicas, flip-flops e até mesmo montem ULAs completas com controle binário, servindo como ponte entre o ensino teórico e a experimentação prática (CHIAPPIN et al., 2020). Já o ModelSim, com suporte a linguagens de descrição de hardware como VHDL e Verilog, permite simulações mais avançadas e realistas, sendo amplamente utilizado tanto na indústria quanto em ambientes acadêmicos para simular circuitos em nível de síntese (COELHO; RODRIGUES, 2019). O Ripes, por sua vez, simula arquiteturas de processadores completas, incluindo pipeline e memória, e é ideal para explorar o funcionamento interno de uma CPU de forma visual e didática (SCHMIDT, 2021). O SimuS complementa esse conjunto com seu foco em sistemas digitais, destacando-se pela integração com práticas educacionais (SANTOS, 2020). Pode-se visualizar alguns exemplos de simulações nesses softwares citados na figura a seguir.

Figura 5 - ModelSim, Logisim Evolution, Ripes e SimuS.



Fonte: SIMULAÇÕES (2025)

Essas ferramentas se integram bem ao uso da linguagem C, especialmente quando o objetivo é simular o comportamento lógico da CPU e desenvolver aplicações baseadas em instruções binárias. Diferente de linguagens interpretadas como Python — que não refletem diretamente o modelo real de execução das instruções em nível de máquina — a linguagem C permite o controle mais direto sobre a memória, bits e registradores, sendo, por isso, a mais adequada ao estudo da Arquitetura de Computadores e da ULA. A combinação entre simulação e programação em linguagem C tem se mostrado eficaz para compreender como as instruções são convertidas em sinais binários e executadas pela ULA, conforme apontado por Sousa e Alves (2021). O uso de FPGAs também representa um avanço no ensino, permitindo a construção e teste de circuitos reais, o que torna o aprendizado mais prático e próximo da realidade dos processadores modernos.

A aplicação de FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) no ensino também representa um avanço significativo. Eles permitem a construção física de circuitos digitais e ULAs personalizadas, programáveis via HDL e testáveis em tempo real. Quando combinados com simuladores digitais e ambientes como o Ripes, os FPGAs ampliam a aprendizagem prática dos alunos e fortalecem os vínculos entre teoria e aplicação (SOUSA; ALVES, 2021). Dessa forma, os discentes não apenas visualizam a execução das operações lógicas, mas também podem projetá-las, modificá-las e avaliar seu desempenho, reforçando o aprendizado ativo.

No contexto do nosso projeto, intitulado “Simulador de Operações Lógicas em Binário”, essas tecnologias de ponta são fundamentais. Ao construir um simulador que represente com fidelidade como a máquina realiza operações como AND, OR, NOT e XOR, utilizaremos conceitos extraídos diretamente da arquitetura dos processadores modernos. As ferramentas como Logisim e Ripes nos auxiliarão a visualizar e validar o comportamento lógico da ULA em tempo real, enquanto a linguagem C permitirá codificar as simulações com precisão, simulando o comportamento do hardware por meio de algoritmos alinhados à arquitetura real da CPU. Dessa forma, o trabalho não se limita ao estudo teórico: ele representa uma ponte entre o entendimento lógico dos circuitos e sua implementação prática e didática em uma linguagem de baixo nível que reflete a execução real do hardware.

2.3.2 Tecnologias de Fabricação Avançada

As tecnologias de fabricação avançadas são a base de toda a arquitetura digital, pois determinam como os componentes físicos fundamentais, como os transistores, são construídos dentro de um chip. Essas tecnologias definem o grau de miniaturização possível, o desempenho energético e a complexidade computacional das unidades lógicas aritméticas (ULAs). Atualmente, os transistores são produzidos em escalas nanométricas, ou seja, na ordem de bilionésimos de metro. Essa miniaturização extrema — expressa em tecnologias de 5 nm, 3 nm e menores — permite integrar uma quantidade muito maior de transistores em uma mesma área de silício.

Essa densidade ampliada traz ganhos significativos para as ULAs. Primeiramente, os sinais elétricos percorrem distâncias menores, acelerando o processamento. Além disso, transistores menores consomem menos energia, o que aumenta a eficiência energética da ULA. Como consequência, é possível projetar ULAs capazes de realizar cálculos mais complexos e operações paralelas, aumentando o desempenho geral dos processadores.

Paralelamente à redução de escala, a arquitetura dos próprios transistores evoluiu. Tecnologias como o FinFET (Fin Field-Effect Transistor) e o GAAFET (Gate-All-Around FET) introduzem geometrias tridimensionais nos transistores, oferecendo maior controle sobre o fluxo de corrente elétrica. Ao envolverem o canal condutor em múltiplas faces ou completamente, essas estruturas aumentam a eficiência de comutação e reduzem perdas, o que também impacta diretamente no desempenho e consumo das ULAs.

Portanto, os avanços em tecnologias de fabricação não apenas viabilizam a construção de chips menores e mais eficientes, mas também sustentam o progresso contínuo da computação. Sem esses avanços, as ULAs não teriam evoluído ao ponto de realizar operações complexas com alta velocidade e baixo consumo energético. No entanto, a constante redução do tamanho dos transistores encontra limites físicos e econômicos, o que motiva pesquisas em novas abordagens, como materiais alternativos e até tecnologias emergentes como a computação quântica.

2.3.3 ULAs de Baixo Consumo de Energia

A busca por eficiência energética se tornou tão importante quanto o desempenho bruto em arquiteturas digitais, especialmente devido ao crescimento dos dispositivos móveis e da demanda por sustentabilidade em centros de dados. Nesse contexto, o projeto de ULAs de baixo consumo de energia se destaca como uma área estratégica da engenharia eletrônica. São diversas as técnicas que permitem à ULA executar suas funções com o menor gasto energético possível, contribuindo para a autonomia de baterias e redução do calor gerado.

Uma das técnicas mais aplicadas é o clock gating, que consiste em desativar o sinal de clock em partes do circuito que não estão em uso. Isso é comparável a desligar o ritmo de trabalho de uma seção da fábrica que não está sendo utilizada, economizando energia de forma eficiente. Para situações em que partes do circuito permanecerão inativas por períodos mais longos, aplica-se o power gating, que vai além ao cortar completamente o fornecimento de energia àquelas seções. Dessa forma, evita-se qualquer consumo residual, semelhante a desconectar um aparelho da tomada.

Outra estratégia fundamental é o projeto para operação em baixa voltagem. Como o consumo de energia elétrica é proporcional ao quadrado da tensão, uma redução, ainda que pequena, no nível de voltagem resulta em economia significativa. O desafio, nesse caso, é manter o funcionamento correto e rápido do circuito mesmo em condições de baixa energia. Em aplicações específicas, como reconhecimento de imagem ou voz, utiliza-se ainda a aritmética aproximada, em que a ULA realiza cálculos com menor precisão, o que é aceitável quando pequenas imperfeições não comprometem o resultado. Essa simplificação reduz o número de transistores ativos e, portanto, o consumo energético, além de acelerar os cálculos.

Essas técnicas são consideradas de ponta porque atendem a uma necessidade crítica da computação contemporânea: realizar mais operações com menos energia. Isso se traduz em maior autonomia para dispositivos móveis, menor aquecimento em chips e maior durabilidade dos componentes. Com o crescimento da Internet das Coisas (IoT), dos dispositivos vestíveis e dos sistemas embarcados, as ULAs de baixo consumo se tornaram essenciais para viabilizar soluções computacionais eficientes, compactas e sustentáveis.

Assim, as tecnologias de ponta aqui exploradas não apenas fundamentam

nosso projeto, mas ampliam sua relevância educacional, ao permitir o entendimento profundo do papel da ULA e dos circuitos lógicos na execução das operações binárias que fundamentam toda a computação moderna.

3 CONCLUSÃO

Esta pesquisa evidenciou a relevância dos circuitos lógicos e da ULA como elementos centrais no funcionamento dos processadores. Ao estudar a arquitetura de computadores e suas operações binárias, ficou claro como esses componentes são essenciais para a execução das instruções e para o desempenho dos sistemas.

As tecnologias de simulação utilizadas — como Logisim, ModelSim, Ripes, SimuS e FPGAs — mostraram-se fundamentais para compreender, de forma prática, os processos internos da CPU. No projeto do “Simulador de Operações Lógicas em Binário”, essas ferramentas, aliadas à linguagem C, permitiram a construção de uma solução didática que conecta teoria e prática, alinhada à proposta do curso e às necessidades do ensino atual em computação.

No contexto do projeto “Simulador de Operações Lógicas em Binário”, tais tecnologias de ponta desempenham papel crucial ao permitir a modelagem, teste e validação das operações em nível de hardware e software. Ressalta-se o uso da linguagem C como ferramenta de implementação, promovendo a aproximação entre teoria e prática sem recorrer a linguagens de alto nível como Python, respeitando a proposta formativa do curso e as orientações metodológicas do docente.

Conclui-se, portanto, que o domínio das tecnologias discutidas neste trabalho é essencial tanto para o desenvolvimento do projeto proposto quanto para a formação de profissionais capacitados em Arquitetura de Computadores. Ao compreender como a máquina executa operações lógicas a partir de seus fundamentos estruturais, o estudante amplia sua visão sistêmica da computação, estabelecendo uma base sólida para projetos futuros mais complexos e alinhados às demandas da engenharia contemporânea.

REFERÊNCIAS

CHIAPPIN, Carla Andreotti et al. Logisim Evolution: uma ferramenta para o ensino e aprendizagem de circuitos digitais. *Revista de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 2, p. 116–132, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3895/rbect.v13n2.10642>.

COELHO, Eduardo; RODRIGUES, Leandro. Simulação de circuitos digitais com ModelSim e linguagens de descrição de hardware. *Revista da Sociedade Brasileira de Computação*, v. 16, n. 1, p. 88–103, 2019.

DELGADO, José; RIBEIRO, Carlos. *Arquitetura de computadores*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 534 p.

SANTOS, Ricardo dos. SimuS: uma ferramenta para simulação de sistemas digitais. In: *Anais do Congresso de Ensino de Engenharia*, 2020. p. 199–206.

SCHMIDT, David. Teaching Computer Architecture with Ripes. In: *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*. 2021. p. 342–348. DOI: <https://doi.org/10.1145/3456565.3456606>.

SOUSA, Filipe; ALVES, Maria. Utilização de FPGAs no ensino de Arquitetura de Computadores. *Revista Científica da UFG*, v. 12, n. 3, p. 203–217, 2021.

STALLINGS, William. *Arquitetura e organização de computadores*. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 624 p.

ELPROCUS. Electronics Projects and Tutorials. Disponível em: <https://www.elprocus.com/>. Acesso em: 03 jun. 2025.

ITALOINFO. Circuitos Lógicos. Disponível em: <https://www.italoinfo.com.br/info/circuitos-logicos/index.php>. Acesso em: 03 jun. 2025.

UFRN. Material Público – Curso. Instituto MetrÓpole Digital. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso>. Acesso em: 03 jun. 2025.

SAMSUNG. Samsung promete chips de 3nm em 2022 e de 2nm em 2025. *Olhar Digital*, 2021. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2021/10/06/reviews/samsung-promete-chips-de-3nm-em-2022-e-de-2nm-em-2025/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

TSMC. TSMC já desenvolve processo de 2nm. *Oficina da Net*, 2020. Disponível em: <https://www.oficinadanet.com.br/mercadotech/33634-tsmc-ja-desenvolve-processo-d-e-2nm>. Acesso em: 5 jun. 2025.

SAKURAI, Takayasu; MUTOH, Shin-ichi. *Low-Power CMOS Design Techniques*. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, v. 5, n. 4, p. 30-39, 2013. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6689704>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MEDEIROS, Lucas; TEIXEIRA, André Luiz. *Técnicas de Redução de Consumo em Sistemas Embarcados*. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica, v. 10, n. 2, p. 44–56, 2021. Disponível em: <https://revistas.unifei.edu.br/index.php/revistaengenharia>. Acesso em: 5 jun. 2025.