

AVALIAÇÃO DE PRECISÃO, ATRASO E ÁREA DO SOMADOR DE PREFIXO PARALELO APROXIMADO

MORGANA MACEDO AZEVEDO DA ROSA¹; EDUARDO ANTONIO CESAR DA COSTA²; RAFAEL IANKOWSKI SOARES¹

¹Universidade Federal de Pelotas – mmarosa@inf.ufpel.edu.br, rafael.soares@inf.ufpel.edu.br

²Universidade Católica de Pelotas – eduardo.costa@ucpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Em meio ao cenário digital em rápida evolução, a busca persistente por melhor desempenho em sistemas computacionais continua a ser uma preocupação primordial (Venkataramani, 2015). À medida que crescem os esforços por estratégias inovadoras que possam otimizar a eficiência energética sem comprometer a ampla aplicabilidade do sistema, a importância da computação aproximada (AxC) passou a destacar-se. AxC oferece um caminho promissor para alcançar desempenho superior ou economizar energia, aceitando pequenas compensações de erro (Rosa, 2023). Particularmente, os somadores aproximados estão entre as principais estratégias na área AxC. Neste contexto, analisa-se nesse trabalho, um modelo específico de somador aproximado conhecido como somador de prefixo paralelo aproximado (AxPPA) (Rosa, 2023).

Um somador de prefixo paralelo (PPA) representa um dos somadores mais rápidos disponíveis. As arquiteturas PPA normalmente compreendem três etapas principais: pré-processamento, computação de prefixo e pós-processamento. A etapa de pré-processamento é a etapa inicial que gera sinais bit a bit para operações subsequentes, a saber, geração de *carry* (g) e propagação de *carry* (p). Os blocos de construção críticos no estágio de computação de prefixo são os operadores de prefixo (POs), que devem incorporar o operador associativo responsável por produzir os bits de geração e propagação de *carry*. Os AxPPAs incorporam aproximações na lógica dos POs. Durante a fase de projeto, pode-se configurar o número de POs aproximados para atingir a precisão desejada do AxPPA. Esses blocos PO são combinados para calcular a estrutura gráfica do PPA, representando os nós envolvidos na geração e propagação do *carry*. A etapa de pós-processamento combina o *carry* gerado pela computação de prefixo com a propagação de *carry* (p) da etapa de pré-processamento para gerar o resultado final. Avalia-se neste trabalho, quatro exemplos de AxPPAs: AxPPA-BK (Brent Kung aproximado), AxPPA-KS (Kogge Stone aproximado), AxPPA-LF (Ladner Fischer aproximado) e AxPPA-SK (Sklansky aproximado).

Desenvolve-se um modelo de análise de erro baseado no método de esforço de Monte Carlo permitindo uma avaliação da precisão do somador. Além disso, cria-se uma estrutura de análise automática que examina a área e o atraso com base nas equações logarítmicas fundamentais dos somadores de prefixos paralelos (PPAs). Os vários projetos de somadores abrangem uma infinidade de objetivos de otimização extensivamente estudados e propostos na literatura (Mahdiani, 2010), (Lee, 2021).

Somadores desempenham um papel crucial como blocos de construção fundamentais no campo de circuitos integrados (Mahdiani, 2010). Consequentemente, eles têm chamado a atenção como uma área crítica para explorar diferentes métodos de aproximação. Uma abordagem proeminente é a aproximação nos bits menos significativos (LSBs), mantendo-se cálculos precisos para os bits mais significativos (MSBs). Porém, a escolha do método de

aproximação implementado nos LSBs influencia diretamente a precisão computacional, resultando em variações no número de bits aproximados para o mesmo nível de tolerância de imprecisão (Rosa, 2023). A realização de uma comparação completa das compensações de precisão para vários métodos exige o projeto individual e a simulação de cada unidade e nível de aproximação. Este processo pode ser demorado, especialmente quando se integram estes somadores em circuitos maiores. Portanto, explorar o espaço de projeto que abrange vários somadores aproximados em circuitos maiores leva tempo e esforço. Neste trabalho, cria-se um modelo AxPPA que emprega a teoria da probabilidade para modelar a precisão do somador. Ao definir uma precisão alvo, os modelos propostos permitem uma análise comparativa das métricas de erro, área e atraso. Esta abordagem minimiza o investimento de tempo necessário na exploração do espaço de projeto.

2. METODOLOGIA

Para realizar uma avaliação orientada à precisão do AxPPA, utilizou-se a medida da magnitude do erro como métrica. Realizaram-se experimentos comparativos de precisão com outros somadores aproximados (AxAs) apresentados na literatura, como COPY, ETA-I, LOA e Trunc. Para os resultados baseados em ASIC as arquiteturas foram descritas em VHDL e sintetizadas usando a ferramenta de síntese Genus da Cadence na frequência de 200 MHz. As sínteses utilizaram a biblioteca de células padrão comercial ST 65nm de baixa potência com tensão de alimentação de 1,25V. Utilizou-se a ferramenta Cadence Incisive para simular todas as listas de redes considerando o arquivo SDF para atrasos precisos na propagação do sinal e falhas temporais. A simulação gera um arquivo *Toggle Count Format* (TCF), carregado na ferramenta de síntese para extração de energia realista. A metodologia de estimativa de potência utiliza a ferramenta de síntese Genus no modo PLE para gerar a *netlist* em nível de porta Verilog e o formato SDF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos de avaliação comparativa de precisão revelaram resultados altamente promissores para o somador aproximado de prefixo paralelo (AxPPA). Ao analisar a magnitude do erro em relação a outros somadores aproximados (AxAs) apresentados na literatura, o AxPPA se destacou como o mais preciso em todos os níveis de aproximação avaliados, variando de $K=1$ a $K=16$ (onde K representa o número de bits que são aproximados), como pode-se perceber na Fig. 1. Os resultados indicam que o AxPPA possui a menor magnitude de erro entre os AxAs analisados. Em média, o AxPPA é aproximadamente 50,97% mais preciso do que os somadores aproximados explorados na literatura (Fig. 1). Essa precisão é um fator crítico para aplicações sensíveis à precisão, onde a integridade dos resultados é crucial. A avaliação dos experimentos usando o modelo proposto exigiu 71,27 milissegundos para 1 milhão de entradas aleatórias, com uma faixa de aproximação de K de 1 a 16 bits.

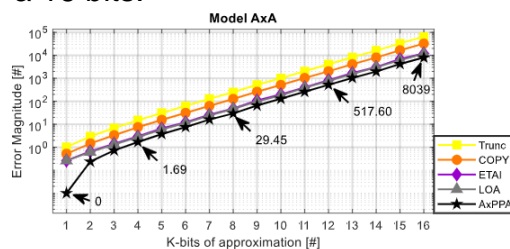


Fig. 1 : Avaliação da magnitude média do erro usando o modelo.

Além da precisão, o modelo analisa os resultados em termos de área e atraso. A Fig. 2 ilustra a análise da magnitude do erro do AxPPA. A Fig. 2-a apresenta uma avaliação orientada por área versus compensação de qualidade, enquanto a Fig. 2-b descreve uma avaliação orientada por atraso versus compensação de qualidade, considerando uma faixa de K de 1 a 16 bits. O AxPPA-BK e AxPPA-SK apresentam resultados superiores em termos de área, com menor número de portas, enquanto AxPPA-LF e AxPPA-KS apresentam excelente desempenho de atraso. Kogge and H. Stone (1973) relatam que a topologia Kogge Stone (KS) é conhecida por fornecer resultados de atraso excepcionais, e o modelo de análise automática de atraso valida ainda mais essa afirmação.

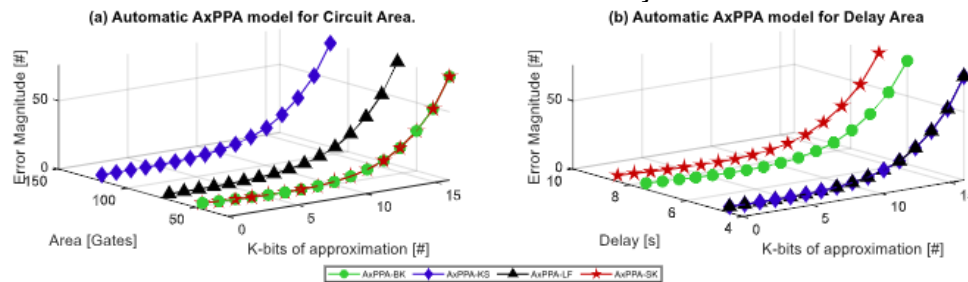


Fig. 2: Magnitude do erro do AxPPA usando o modelo: a) Avaliação orientada pela área versus compromisso de qualidade, b) Avaliação orientada pelo atraso versus compromisso de qualidade.

A Fig. 3-a mostra o *trade-off* de qualidade de energia, enquanto a Fig. 3-b retrata o *trade-off* de qualidade de área para o AxPPA e outros AxAs da literatura, considerando variações na etapa de aproximação (de K = 1 a 16). As frentes de Pareto na Fig. 3 resumem o compromisso entre a Magnitude do Erro, que representa a avaliação orientada pela precisão na estrutura do modelo AxA, e os resultados da síntese de energia e área. O AxPPA alcança reduções significativas de área do circuito de até 60% em comparação com somadores exatos. Isso ocorre porque a parte aproximada de AxAs requer menos ou nenhuma porta lógica, resultando em área de circuito reduzida. Além disso, o AxPPA alcança notáveis reduções de energia de até 85,43% em comparação com somadores exatos. A área do circuito dos somadores aproximados varia consideravelmente devido às diferenças na composição lógica. Consequentemente, os somadores aproximados exibem menor dissipação de energia do que o somador exato para todos os AxAs e AxPPAs, como observado na Fig. 3. Nota-se que, o consumo de energia diminui à medida que o nível de aproximação aumenta. Dentre os AxAs avaliados, destaca-se o AxPPA-LF com K = 16 com as seguintes reduções em relação ao somador exato: (i) economia de energia de 85,43%, (ii) economia de área de 60,05%, e (iii) uma pequena magnitude do erro de 70,91. Da mesma forma, AxPPA-LF com K = 12 demonstra melhorias significativas em relação a COPY e Trunc, incluindo (i) economia de energia de 11,34%, (ii) economia de área de 2,29% e (iii) uma pequena magnitude de erro de 38,14. É importante notar que COPY e Trunc, não contém portas lógicas em sua parte aproximada, e apresentam pequenas economias de área em comparação com AxPPA para K = 13 a 16. Por exemplo, Trunc alcança apenas 7,76% de economia de área em comparação com AxPPA para K = 16. Nota-se que, o AxPPA-LF oferece as melhores compensações entre magnitude e qualidade do erro, área de circuito e economia de energia.

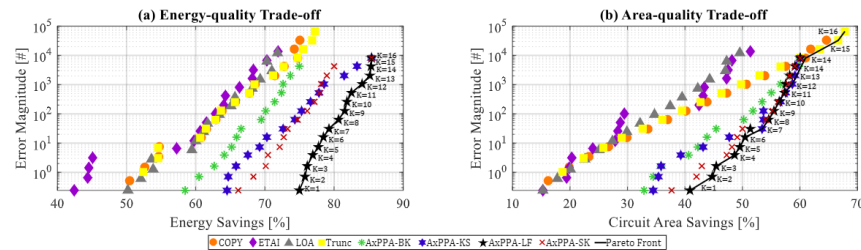


Fig. 3: Magnitude do erro do nosso AxPPA em relação aos AxAs da literatura: a) Economia de energia versus compensação de qualidade, b) Economia de área versus compensação de qualidade. A linha de base para o cálculo da economia é o somador exato selecionado automaticamente pela ferramenta de síntese.

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma avaliação detalhada do somador aproximado de prefixo paralelo (AxPPA), destacando sua alta precisão e vantagens de desempenho em relação a outros somadores aproximados. O modelo de avaliação orientado à precisão do AxPPA permitiu uma análise completa do processo de aproximação em somadores com várias saídas. Ao explorar todos os níveis de aproximação, a abordagem orientada à precisão reduziu o tempo necessário para a avaliação dos resultados. O AxPPA se mostrou altamente resiliente a erros, alcançando a menor magnitude de erro entre os somadores aproximados estudados na literatura. Além disso, o AxPPA demonstrou economia significativa de área e energia em comparação com os somadores aproximados. Sua capacidade de equilibrar precisão e eficiência o torna uma escolha promissora para otimização de desempenho e eficiência energética em sistemas computacionais. Em resumo, o AxPPA oferece uma abordagem eficaz, proporcionando melhorias substanciais em termos de resiliência a erros, área e consumo de energia. Esses resultados ressaltam o potencial do AxPPA como uma alternativa viável para otimização de sistemas computacionais, especialmente em aplicações que podem aceitar leves imprecisões em troca de um desempenho aprimorado. Com suas vantagens em eficiência e precisão, o AxPPA pode desempenhar um papel importante no futuro da computação aproximada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- S. Venkataramani, S. T. Chakradhar, K. Roy, and A. Raghunathan, "Approximate computing and the quest for computing efficiency," in Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference, 2015, pp. 1–6.
- M. M. A. d. Rosa, G. Paim, P. L. d. Costa, E. A. C. d. Costa, R. I. Soares, and S. Bampi, "AxPPA: Approximate Parallel Prefix Adders," IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 31, no. 1, pp. 17–28, 2023.
- H. Mahdiani, A. Ahmadi, S. Fakhraie, and C. Lucas, "Bio-Inspired Imprecise Computational Blocks for Efficient VLSI Implementation of Soft-Computing applications," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 57, no. 4, pp. 850–862, April 2010.
- J. Lee, H. Seo, H. Seok, and Y. Kim, "A Novel Approximate Adder Design Using Error Reduced Carry Prediction and Constant Truncation," IEEE Access, vol. 9, pp. 119 939–119 953, 2021.
- P. Kogge and H. Stone, "A parallel algorithm for the efficient solution of a general class of recurrence equations," IEEE Transactions on Computers, vol. 100, no. 8, pp. 786–793, 1973.