

Resumo: "Logical Reversibility of Computation" – C. H. Bennett

Ana Lilian Alfonso Toledo

Gabriel Stiegemeier

Mathias Recktenvald

Introdução

O artigo de Charles H. Bennett trata da reversibilidade lógica na computação, um tema de grande relevância tanto para a ciência da computação quanto para a física. Computadores tradicionais, como máquinas de Turing convencionais, são logicamente irreversíveis: suas funções de transição não têm inverso unívoco, o que significa que não é possível determinar de forma única o estado anterior a partir do estado atual.

Essa irreversibilidade lógica implica, segundo Landauer (1961), que cada vez que um bit de informação é apagado, uma quantidade mínima de energia ($kT \ln 2$) é dissipada como calor, aumentando a entropia do sistema. Bennett desafia essa ideia ao demonstrar que máquinas de Turing podem ser tornadas logicamente reversíveis, o que tem implicações profundas tanto na teoria da computação quanto na termodinâmica.

Computação Reversível

O cerne da proposta de Bennett é que uma máquina irreversível pode ser tornada reversível ao registrar todas as informações intermediárias que normalmente seriam descartadas. Uma máquina de Turing reversível pode simular qualquer máquina irreversível realizando o cálculo em três estágios:

1. Cálculo direto (forward computation)
2. Cópia do resultado
3. Reversão (uncomputation)

Ao final da execução, permanecem apenas a entrada e a saída desejadas, sem resíduos de dados intermediários. Isso permite a reutilização das fitas sem apagamento irreversível, mantendo a reversibilidade lógica do sistema.

Formalização com Máquinas de Turing

Bennett propõe a construção de uma máquina reversível R que simula uma máquina irreversível S utilizando uma arquitetura de três fitas: uma fita de trabalho, uma de histórico e uma de saída.

Para garantir reversibilidade, ele introduz transições chamadas quadruplas, que substituem as tradicionais quintuplas das máquinas de Turing. Em uma quadrupla, uma fita pode ser lida e escrita ou apenas deslocada, mas não ambas simultaneamente. As quadruplas asseguram que cada transição tenha um inverso único e explícito.

Cada transição da máquina original S é desmembrada em duas quadruplas ligadas por um estado intermediário exclusivo, garantindo que os domínios e as imagens de todas as transições não se sobreponham. A fita de histórico armazena um índice para cada transição, possibilitando a reconstrução reversível da computação.

A máquina R simula a computação de S em três estágios: computação direta com registro de histórico, cópia da saída, e reversão das etapas com eliminação do histórico. O resultado final preserva apenas a entrada e a saída, mantendo o sistema limpo e reversível.

Otimização de Armazenamento Temporário

Um dos principais desafios das máquinas reversíveis é a quantidade de armazenamento temporário necessária. Bennett propõe segmentar a computação em blocos menores, o que permite apagar o histórico de forma reversível ao final de cada segmento e reutilizar a memória.

Essa abordagem reduz significativamente o espaço necessário, mantendo um crescimento de espaço proporcional a raiz quadrada do número total de passos, com um aumento de tempo computacional considerado aceitável.

Reversibilidade Física

Bennett estende suas considerações ao domínio físico, sugerindo que computadores físicos podem ser projetados para operar de maneira termodinamicamente reversível, dissipando quantidades arbitrariamente pequenas de energia por passo computacional.

Ele utiliza como exemplo o processo bioquímico de síntese de RNA mensageiro, realizado pela enzima RNA polimerase. Esse processo é logicamente reversível e mostra que a natureza já implementa computações desse tipo. Em contraste, a degradação irreversível de RNA por outras enzimas requer maior dissipação energética.

Conclusão

Bennett conclui que toda computação pode ser realizada de forma logicamente reversível, com aumentos moderados em tempo e complexidade. A reversibilidade lógica abre caminho para o desenvolvimento de computadores de baixo consumo energético, antecipando conceitos explorados atualmente na computação quântica e na nanotecnologia.