Processadores Digitais de Sinais: Tecnologias e Aplicações

Raquel da Silva Cabral
Vilar Fiuza da Camara Neto

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais — UFMG

Seminário de Arquitetura de Computadores
Prof.: Mario Montenegro Campos

21 de novembro de 2006

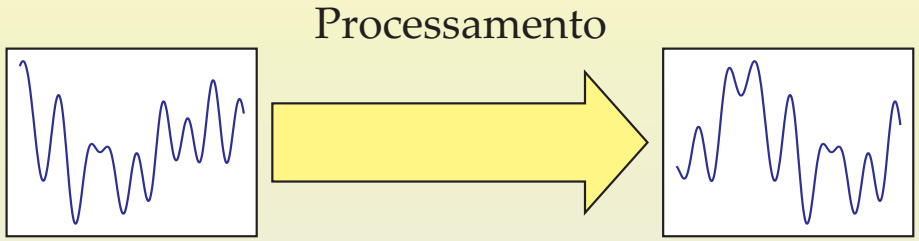
Estrutura da apresentação

1. Introdução
2. Características dos DSPs
3. História dos DSPs
4. Aplicações e tecnologias atuais
5. Conclusões

Estrutura da apresentação

Processamento de sinais

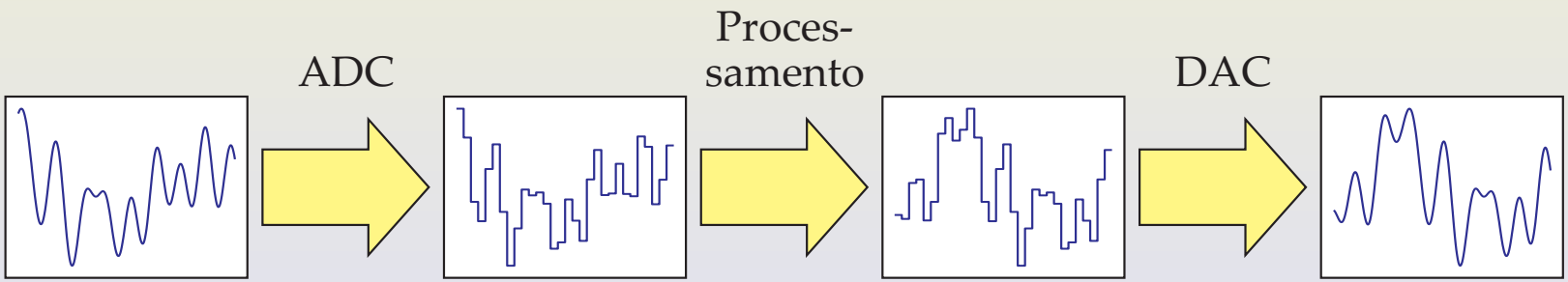
- Sistemas que processam sinais de entrada e produzem sinais de saída



- Utilidades:
  - Suavização de ruídos
  - Cancelamento de eco
  - Multiplexação + demultiplexação (Ex.: canais de rádio, TV, etc.)
  - Amplificação e redução em faixas de freqüência (equalização)
  - Sistemas de controle
  - Etc.

Processamento digital de sinais

- Todo o processamento é feito sobre sinais digitalizados
- Modelo clássico:
  1. Sinal analógico de entrada é convertido em digital por um ADC;
  2. Sinal de saída é gerado com base no sinal de entrada;
  3. Sinal digital de saída é convertido em analógico por um DAC.



- ADC ou DAC não existem em alguns casos

Vantagens do processamento digital

- Sinal digital não se degrada
- Fidelidade de armazenamento
- Facilidade de transformação do sinal (codificação, criptografia, compressão, integridade, redundância, etc.)
- DSPs programáveis são muito flexíveis:
  - Um circuito, múltiplas aplicações
  - Correção de falhas de projeto e incorporação de novas funcionalidades podem não exigir manutenção de *hardware*
  - Depuração externa por porto específico (JTAG)

Estrutura da apresentação

Aplicações dos processadores

1. **Aplicações para desktop:**
   - Execução de muitas operações aritméticas
   - Pouca preocupação com energia
2. **Aplicações para servidor:**
   - Execução de muitas tarefas em paralelo
   - Transferência de grandes massas de dados
   - Pouca preocupação com energia
3. **Aplicações embarcadas:**
   - Economia de energia é fundamental
   - Arquitetura relativamente simples (memória, cache, tamanho do núcleo, ISA, *clock*, etc.)
   - Aplicações em tempo real
   - Difícil de projetar processador de uso geral
   - Microprocessadores, microcontroladores, DSPs, etc.

Operações aritméticas

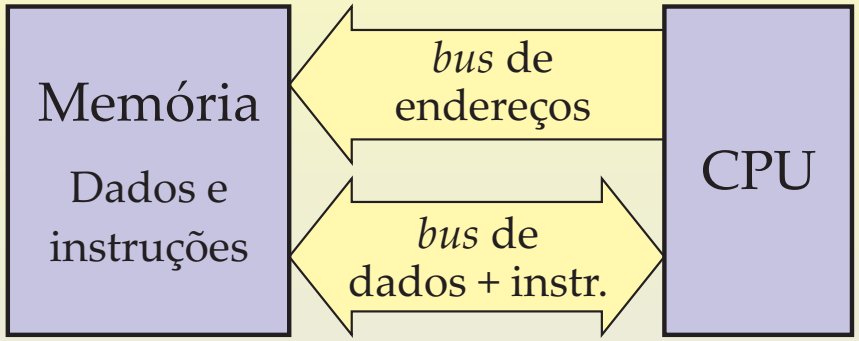
- Operações seqüenciais sobre fluxos contínuos de dados (tipicamente kHz, MHz, GHz)
- Operações aritméticas otimizadas (ex.: 1 multiplicação por ciclo)
- Operação mais importante: **MAC** (*Multiply and Accumulate*)
  - Implementação otimizada (geralmente 1 MAC/ciclo)
  - ALUs especializadas para MAC
  - Vários DSPs embutem mais de uma ALU para MAC (> 1 MAC/ciclo)
  - Operação básica para cálculo de produto interno, convolução, FFT, avaliação de polinômios, FIR, etc.
  - MAC é tão importante que a medida de *benchmark* mais comum é MMAC/s (milhões de MACs por segundo)

Representação de valores reais

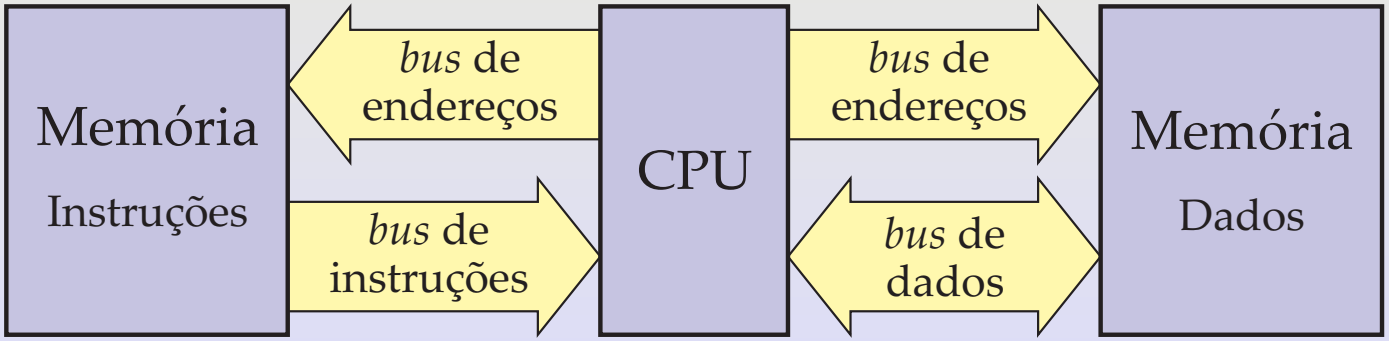
- Processadores para *desktop*: ponto flutuante (IEEE-754)
  - Mantissa + expoente
  - Implementação complexa
- DSPs: ponto fixo
  - Número de bits fixo para parte inteira e fracionária
  - Implementação mais simples $\rightarrow$ Menor custo de energia
- DSPs mais poderosos oferecem as duas opções (ponto fixo e ponto flutuante)

Modelo de arquitetura de memória

- Arquitetura Von Neumann: memória compartilhada para código + dados



- Arquitetura Harvard: memórias separaradas para código e dados



Tamanho das palavras

- Arquitetura Harvard $\rightarrow$ Palavras de instrução e de dados podem ter tamanhos diferentes
- Busca de tamanho de palavra adequado para a aplicação designada pelo projetista
- Tamanho da palavra não é necessariamente potência de 2 (ex.: 12 bits, 24 bits)

Consumo de energia

DSPs adotam várias técnicas para minimizar consumo de energia:

- Modos de baixo consumo:
  - STOP: processador é completamente desativado
  - WAIT: processador entra em estado de dormência, aguardando novos dados
  - Outros modos próprios disponibilizados pela arquitetura
- Desativação de regiões não usadas do processador
  - Exemplo: DSPs que chaveiam entre aritmética de ponto flutuante e ponto fixo podem ativar somente partes necessárias das ALUs
- *Underclock:* Redução de *clock* necessita de tensão menor → Menor consumo

Limite mínimo de desempenho

- DSPs são voltados para aplicações em tempo real
- Ocorrência de interrupções, *stalls*, *cache misses*, colisões estruturais, etc. não pode prejudicar o processamento
- Processador projetado para manter um limite inferior de desempenho
- Pior caso é especificado pelo fabricante (ex: latência de x ciclos no pior caso)

Tratamento de estouros aritméticos

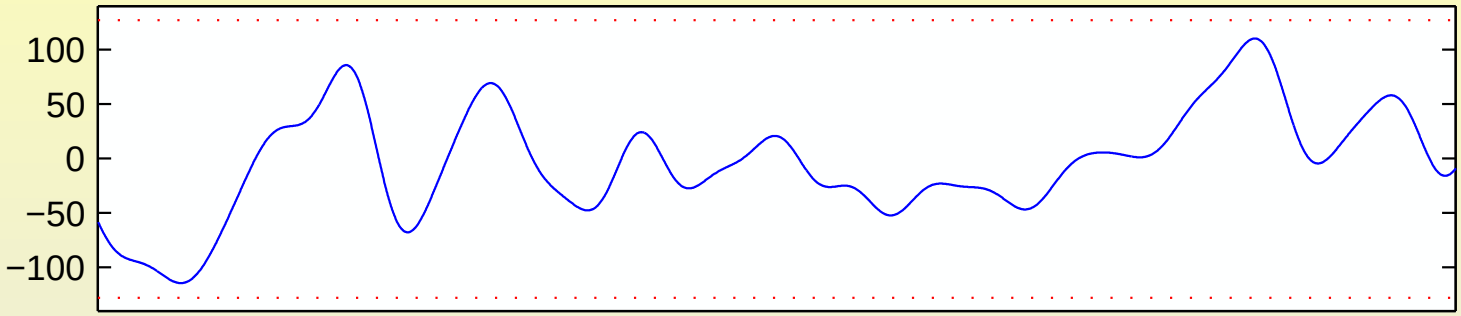
- Processadores para *desktop*: aritmética de complemento-de-dois
  - Operações cujos resultados estouram a capacidade de representação ignoram bits de maior significância
  - Ex.: inteiro de 16 bits sinalizado:
    $25000 + 15000 = -25536$
    $(0x61A8 + 0x3A98 = 0x9C40)$
  - Ex.: inteiro de 16 bits não-sinalizado:
    $45000 + 25000 = 4464$
    $(0xAFC8 + 0x61A8 = 0x\cancel{1}1170 = 0x1170)$

Tratamento de estouros aritméticos

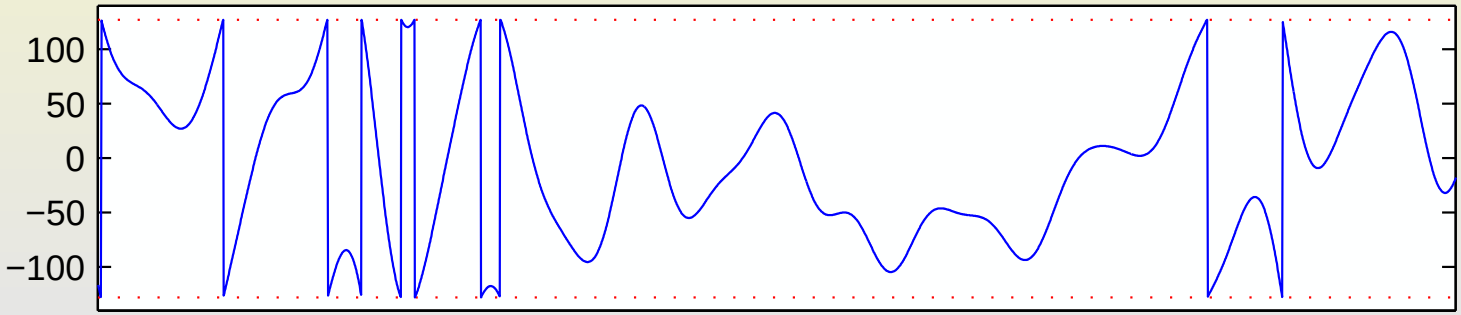
- DSPs: aritmética de saturação
  - Operações cujos resultados estouram a capacidade de representação retornam maior valor representável
  - Ex.: inteiro de 16 bits sinalizado:
    $25000 + 15000 = 32767$
    $(0x61A8 + 0x3A98 = 0x7FFF)$
  - Ex.: inteiro de 16 bits não-sinalizado:
    $45000 + 25000 = 65535$
    $(0xAFC8 + 0x61A8 = 0xFFFF)$

Tratamento de estouros aritméticos

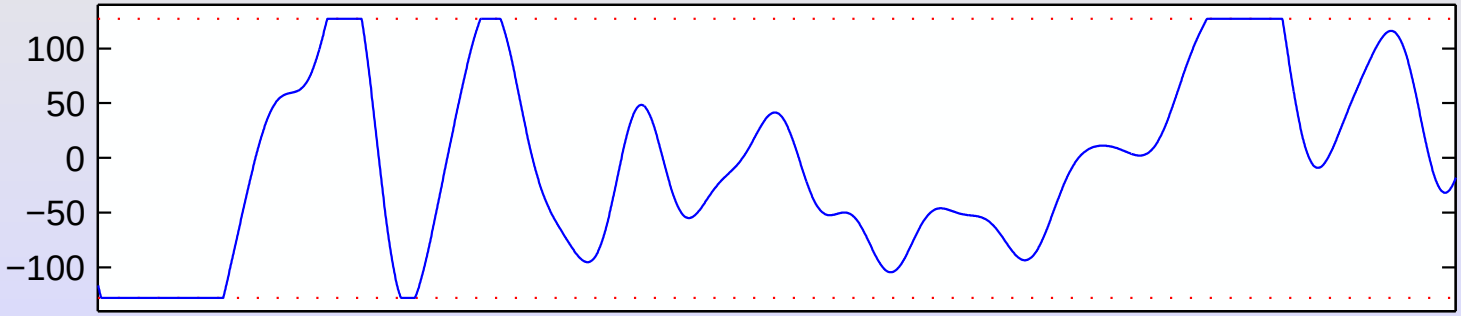
- Sinal original:



- Sinal amplificado, aritmética de complemento de 2:



- Sinal amplificado, aritmética de saturação:



Acumuladores de alta precisão

- Operações aritméticas sobre valores reais geram erros de arredondamento
- Seqüências de operações repetidas geram erros cumulativos (ex: MAC sobre fluxo de dados de entrada)
- Erros acumulados podem ser significativos
- Solução: acumuladores de alta precisão → Valores intermediários calculados com maior precisão, resultado final convertido para precisão convencional
- Exemplos:
  - Freescale 56F8xx: aritmética de 16 bits, acumulador de 36 bits
  - Analog Devices ADSP-21xx: aritmética de 16 bits, acumulador de 40 bits
  - Philips CoolFlux DSP: aritmética de 24 bits, acumulador de 56 bits

Tratamento de exceções

- Continuidade do processamento em tempo real pode ser mais importante do que o tratamento de certas exceções
- Caso típico: exceções aritméticas (estouro, divisão por zero, etc.)
- Alguns DSPs ativam um *flag* para indicar a ocorrência de exceção $\rightarrow$ processamento não é interrompido
- Programador deve checar *flag* e tratar exceção quando conveniente

Formas de endereçamento

- Formas de endereçamento específicas para operações tradicionais
- Endereçamento indireto: forma tradicional
  Ex.: base = 50

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	···
Endereço	50	51	52	53	54	55	56	57	···

- Endereçamento cíclico: *buffer* circular
  Ex.: base = 50, tamanho do *buffer* = 4

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	···
Endereço	50	51	52	53	50	51	52	53	···

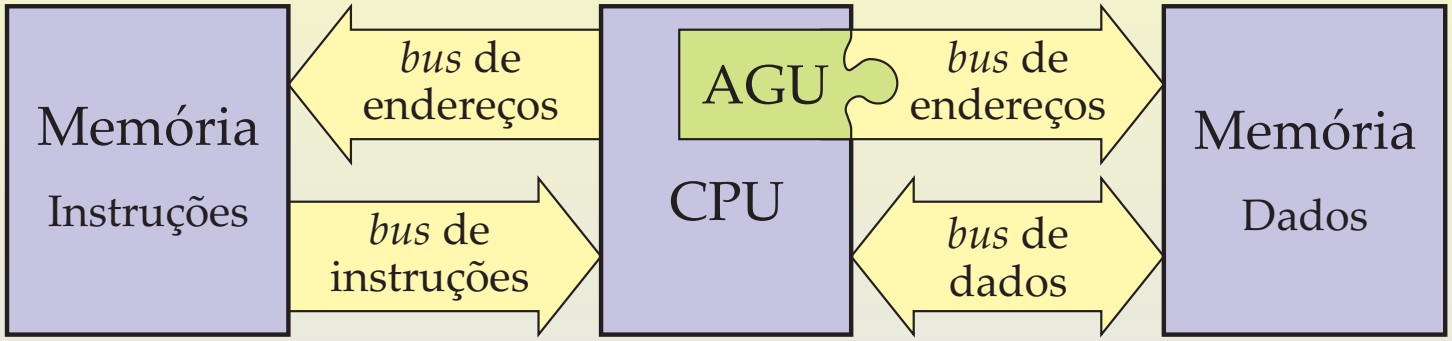
- Endereçamento de bits reversos: operação de FFT
  Ex.: base = 50, tamanho do *buffer* = 8

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	···
Endereço	50	54	52	56	51	53	55	57	···

Formas de endereçamento

Gerenciamento de instruções é feito por uma unidade aritmética especializada: a AGU (*Address Generator Unit*)

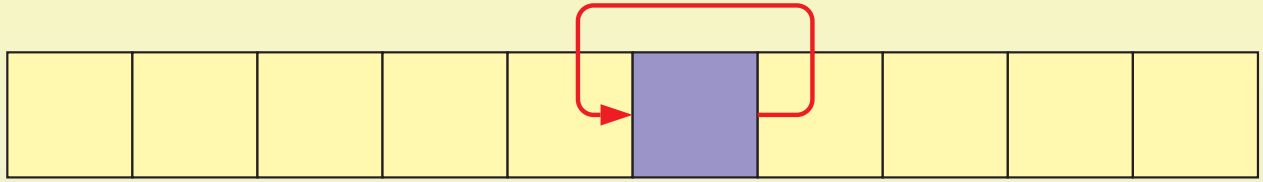
- Responsável pela geração de endereços para acesso à memória de dados



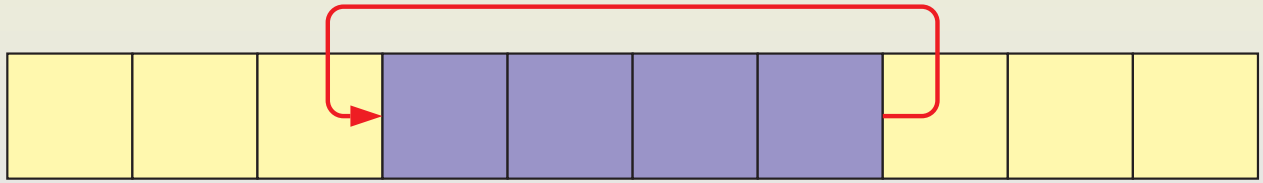
- ISA incorpora formas especiais de endereçamento
- Custo zero para outras unidades (cálculos feitos em paralelo)
- Não ocupa as ALUs principais
- Redução do código (cálculos não precisam ser feitos pelo programador/compilador)

Laços em *hardware*

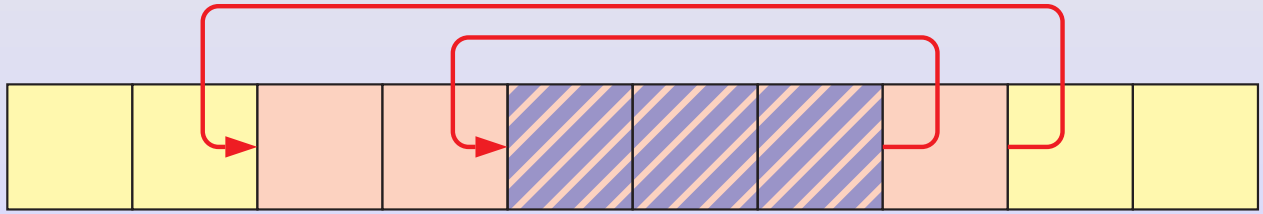
- Laços de uma instrução: SIMD (*Single Instruction, Multiple Data*)



- Laços de múltiplas instruções: várias instruções são permitidas no laço

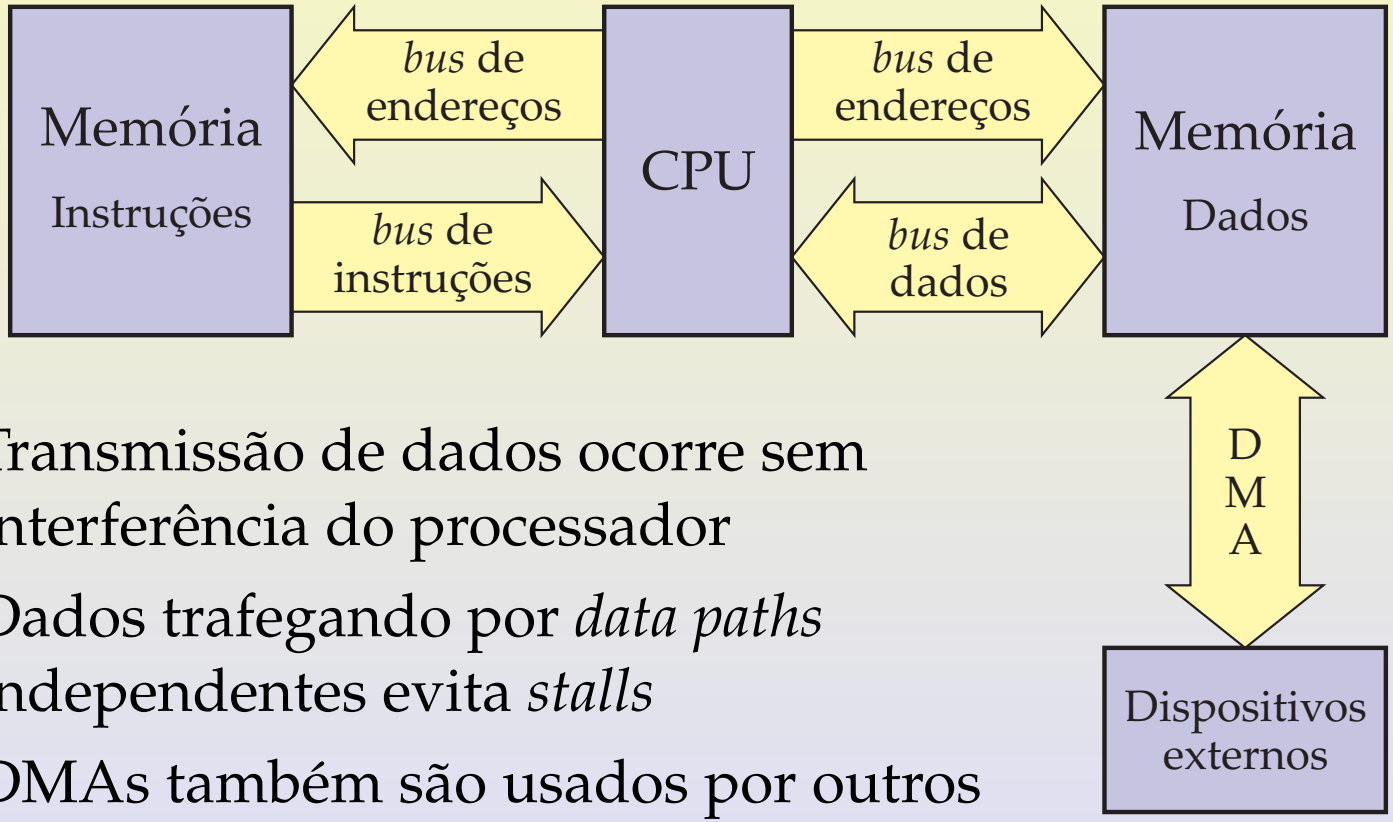


- Laços aninhados: mais de um nível de laço é previsto pelo processador



Acesso direto à memória (DMA)

- Canais de transmissão de dados que permitem que dispositivos externos tenham acesso direto à memória



- Transmissão de dados ocorre sem interferência do processador
- Dados trafegando por *data paths* independentes evita *stalls*
- DMAs também são usados por outros tipos de processador

Estrutura da apresentação

História dos DSPs I

1980:

- Arquitetura *Harvard*;
- Multiplicador, somador e um acumulador;
- Não realizavam operações com valores reais;
- TMS320C10 da Texas Instruments e ADSP-2101 da Analog Devices.

História dos DSPs II

1990:

- *Pipelining*, ALUs especializadas em operações de multiplicação, valores reais em ponto fixo e mais acumuladores;
- Operações com ponto fixo;
- Compatíveis com seus predecessores;
- TMS320C20 da Texas Intruments, o DSP56002 da Motorola e a família DSP16xxx da Lucent Technologies.

História dos DSPs III

Hoje:

- Controladores Digitais de Sinais;
- Combinam em uma única unidade funcional DSPs e microcontroladores;
- Compressão e descompressão de dados;
- Criptografia e descriptografia;
- Codificação e descodificação de fluxos (*streams*) de dados digitais.

Estrutura da apresentação

Aplicações e tecnologias atuais I

Controle digital

- Baixa capacidade de processamento;
- Sistemas industriais, sistemas automotivos, controle de motores, uso domésticos e comerciais;
- Família Texas Instruments TMS320C24x e TMS320C28x;
- Família Freescale 56F8xx.

Aplicações e tecnologias atuais II

Decodificação de Aúdio

- Baixo processamento, mas precisa de memória;
- Controles a cargo do usuário, como volume, balanço e equalização;
- Família Texas Instruments TMS320C55x;
- Processador ARM AudioDE;
- Processador Philips CoolFlux DSP.

Aplicações e tecnologias atuais III

Controle por voz

- Exige um hardware pequeno e de baixo consumo de energia;
- algumas aplicações exigem que o DSP seja capaz de executar a operação de FFT;
- Família Freescale DSP568xx.

Aplicações e tecnologias atuais IV

Voz sobre pacotes

- Voz sobre IP;
- Telefonia digital;
- Os DSPs devem contar com recursos de cancelamento de eco;
- Família Analog Devices ADSP-21xx:
- Família Texas Instruments TMS320C55x.

Aplicações e tecnologias atuais V

Vídeo digital

- Alto poder de processamento;
- Espaço em memória RAM;
- Capacidade de sustentar um grande fluxo de dados;
- Uso de DSPs com alto poder de paralelismo de instruções e de dados;
- DMAs de alta velocidade;
- ISA com extensões próprias para tratamento de vídeo;
- Processador Analog Devices ADSP-21535 Blackfin;
- Processador Texas Instruments TMS320DM6446.

Estrutura da apresentação

Conclusões

- Vasta gama de aplicações;
- Muito poderosos;
- Existe um grande esforço para se conseguir melhor performance, baixo custo;
- Melhor solução para muitas aplicações;
- Evolui com suas aplicações.

Perguntas?