Introdução à Arquitetura de Computadores

Bloco 4
O Modelo de Von Neumann

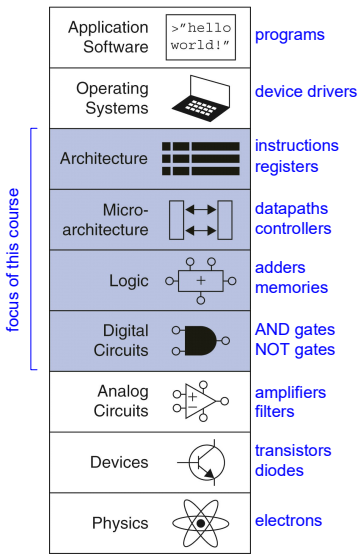
Componentes básicos de um sistema Computacional

Pedro M. Lavrador

Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática
Universidade de Aveiro
plavrador@ua.pt

1

Onde Estamos?



2

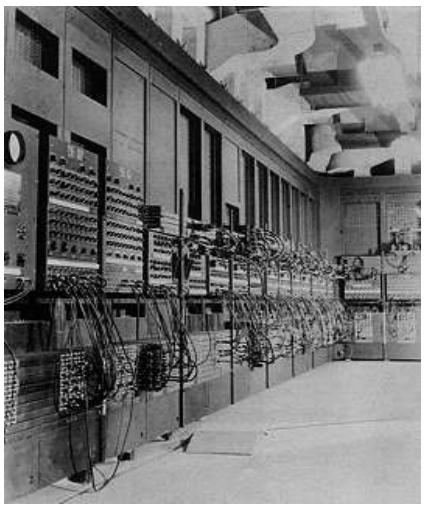
Índice

- Conceitos fundamentais em Arquitectura de Computadores
  - Os elementos básicos de um computador
  - Modelo de Von Neumann
  - A noção de instrução e o ciclo básico de execução
- Arquitetura de Computadores
  - *Arquitetura do Conjunto de Instruções*
- Introdução à Arquitetura MIPS

3

ENIAC: Primeiro Computador Eletrónico

- Electronic Numerical Integrator and Computer (1946)



4

ENIAC: Primeiro Computador Eletrónico

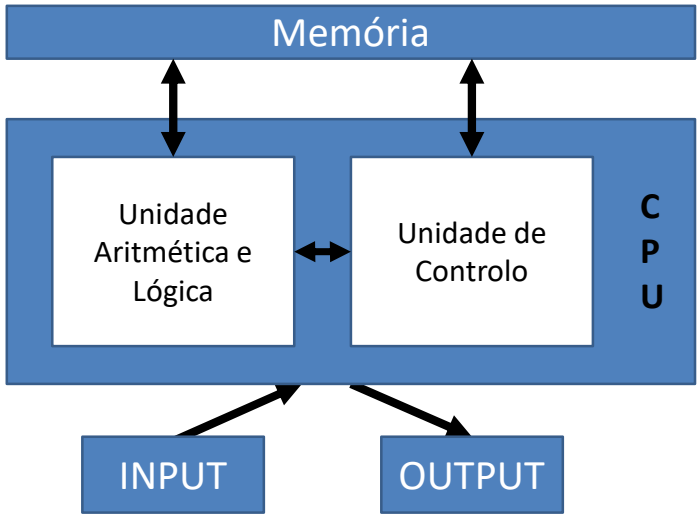
- Era utilizado para realizar cálculos balísticos. Podia fazer até 5000 operações por segundo.
- O problema maior era reconfigurá-lo para fazer uma operação diferente. Podia demorar dias a reprogramar.
- John Von Neumann propôs a armazenagem dos dados e do programa na mesma memória.
  - Deste modo os programas poderiam ser guardados e reaproveitados.

5

Mas… quais os blocos básicos que constituem uma arquitetura computacional genérica?

6

Modelo de Von Neumann

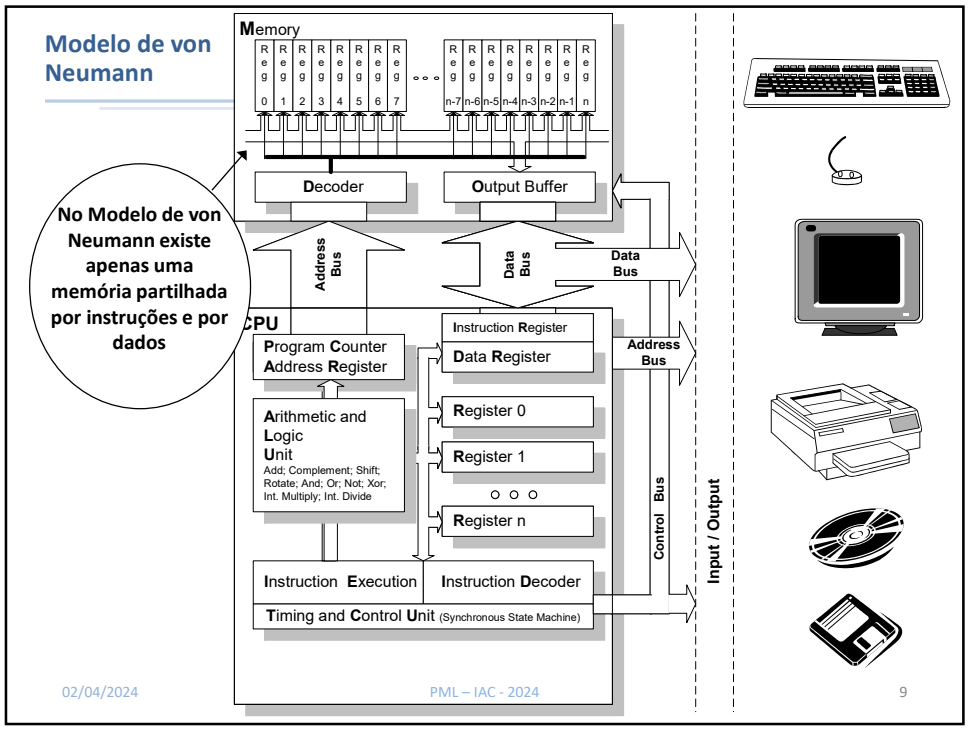


7

Modelo Básico de um Sistema Computacional

- **As unidades fundamentais que constituem um computador são:**
  - **Unidades de entrada** – permitem a recepção de informação vinda do exterior (dados, programas) e que é armazenada em memória
  - **Unidades de saída** – permitem o envio de resultados para o exterior
  - **Memória** – armazenamento de:
    - Programas
    - Dados para processamento
    - Resultados
  - **CPU** – processamento da informação através da execução do programa armazenado em memória

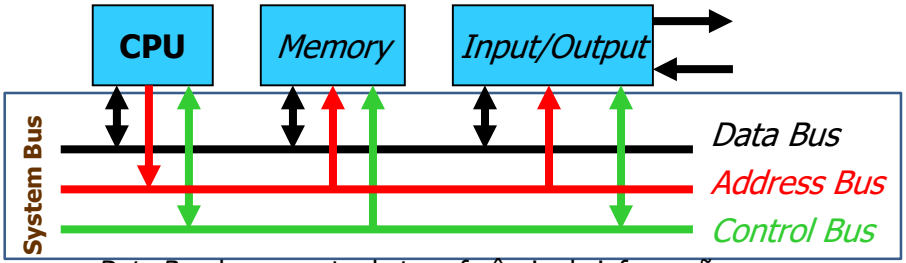
8



9

Arquitetura Básica

- Arquitectura básica de um sistema computacional (modelo de von Neumann, simplificado)



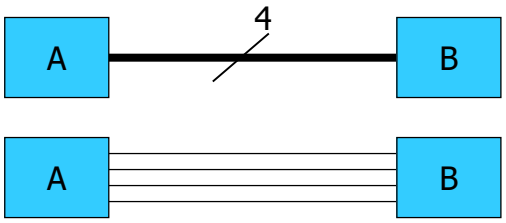
- *Data Bus*: barramento de transferência de informação (CPU↔memória, CPU↔Input/Output)
- *Address Bus*: identifica a origem/destino da informação
- *Control Bus*: sinais de protocolo que especificam o modo como a transferência de informação deve ser feita

02/04/2024 PML – IAC - 2024 10

10

Barramento

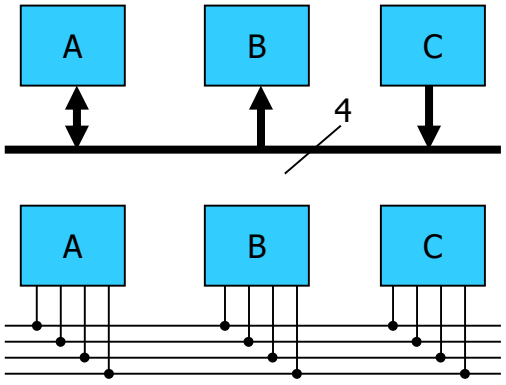
- Barramento *(bus)*= colecção de fios agrupados segundo uma dada função; cada fio transporta informação relativa a 1 bit. Ex. – barramento de 4 bits:



11

Barramento Partilhado

- Barramento partilhado (***shared bus***)= barramento que interliga diferentes blocos funcionais



12

Unidade de Processamento (CPU)

- A unidade central de processamento é organizada em várias unidades:
  - Unidade de Controlo
    - Responsável pela sequenciação da execução de cada instrução
  - Unidade Aritmética e Lógica
    - Executa as operações (somas, subtrações, operações lógicas…)
  - Registos
    - Armazenamento temporário de dados
      - Operandos e e resultados de operações
    - Valores de Controlo (p.e. endereços especiais)
- Comprimento da Palavra (p.e. processador de 32 bits)
  - Número de bits processados pela ALU; número de bits dos registos.

13

Unidade Central de Processamento

- O CPU consiste, fundamentalmente, em duas secções:
  - **Secção de dados** (*datapath*): elementos operativos:
    - Registos internos
    - Unidade Aritmética e Lógica (ALU)
  - **Unidade de controlo**: responsável pela coordenação dos elementos do *datapath*, durante a execução de um programa
    - **Máquina de estados síncrona** (estado seguinte é função do estado atual e das entradas)
    - As entradas correspondem a informação retirada de cada uma das instruções lidas da memória

14

Unidade de Controlo

- Controla a execução do programa:
  - Determina a operação a ser realizada no presente
  - Determina a próxima operação a ser realizada
- A unidade de controlo lê uma instrução da memória (*Instruction Fetch*) e Interpreta a instrução (*Instruction Decode*) gerando os sinais de controlo que indicam à unidade de processamento o que fazer.
  - A tarefa a realizar pode ser completada num ciclo de relógio ou precisar de vários ciclos.
- *Instruction Register*:
  - Contem a Instrução que está a ser executada
- *Program Counter*
  - Contem o endereço da próxima instrução

15

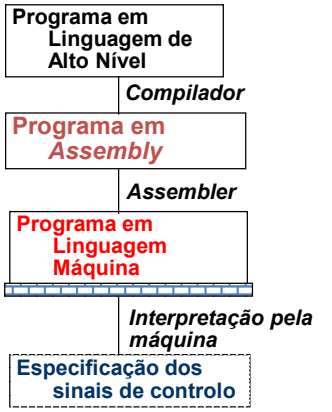
A noção de "Instrução"

- Independentemente do tipo de CPU e da sua estrutura interna, qualquer instrução deve permitir responder às seguintes questões:
  - Qual a operação a realizar ?
  - Qual a localização dos operandos (se existirem) ?
    - reg. Internos / memória
  - Onde colocar o resultado ?
    - reg. Internos / memória
  - Qual a próxima instrução ?
    - em condições normais é a instrução seguinte na sequência e, portanto, não é, normalmente, explicitamente mencionada
    - em instruções que alteram a sequência de execução a instrução deverá fornecer o endereço da próxima instrução a ser executada

16

Como Representar as Instruções?

- Níveis de representação de instruções




```
temp = v[k];
v[k] = v[k+1];
v[k+1] = temp;
```

```
lw  $15, 0($2)
lw  $16, 4($2)
sw $16, 0($2)
sw $15, 4($2)
```

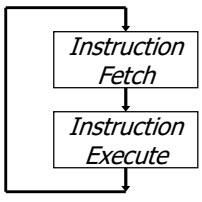
```
0000 1001 1100 0110 1010 1111 0101 1000
1010 1111 0101 1000 0000 1001 1100 0110
1100 0110 1010 1111 0101 1000 0000 1001
0101 1000 0000 1001 1100 0110 1010 1111
```

```
ALUOP[0:3] <= InstReg[9:11] & MASK
```


17

Ciclo básico de execução de uma instrução

- 1º O processador acede à memória e lê a próxima instrução a ser executada.
- 2º O processador executa a Instrução
  - Acede aos operandos
  - Realiza a operação sobre eles
  - Guarda o resultado



- Chama-se a este processo o ciclo de leitura e execução.

18

Índice

- Conceitos fundamentais em Arquitectura de Computadores
  - Os elementos básicos de um computador
  - Modelo de Von Neumann
  - O ciclo básico de execução de uma instrução
- Arquitetura de Computadores
  - *Arquitetura do Conjunto de Instruções*
- Introdução à Arquitetura MIPS

19

Arquitetura de Computadores

- Arquitetura de Computadores =

  Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA)

  \+

  Organização da Máquina
- Conjunto (*Set*) de Instruções:
  - a coleção de todas as operações que o processador pode executar
- Que estrutura de processador se define para executar o Conjunto de Instruções?
- Microarquitectura:
  - A organização do processador, incluindo as principais unidades funcionais e respetivas ligações e controlo.
  - A uma arquitetura podem corresponder várias microarquitecturas diferentes.

20

Arquitetura do Conjunto de Instruções

- Também designada por "modelo de programação“:
  - Uma abstração que representa a interface entre o *hardware* e o nível mais básico de *software*
- Descreve tudo o que o programador necessita de saber para programar corretamente, em linguagem máquina, um determinado processador
- Descreve a funcionalidade, independentemente do hardware que a implementa.
  - A organização do fluxo de dados e da unidade de controlo são do nível dos Sistemas Digitais, enquanto a sua implementação é do nível da MicroElectrónica.

21

Conjunto de Instruções: um Interface Crítico

22

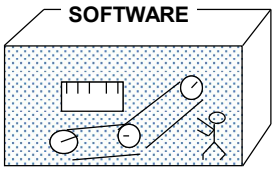
Uma Arquitetura Múltiplas Implementações

- Pode falar-se de "arquitetura" e "implementação de uma arquitetura"
  - (Ex. Processadores AMD compatíveis com Intel x86)
- A manutenção da arquitetura mantem a compatibilidade com o *software* mais antigo enquanto permite melhorias de performance.
  - Por exemplo, a arquitetura atual x86 anda tem como base a original de 1978

23

Arquitetura do Conjunto de Instruções

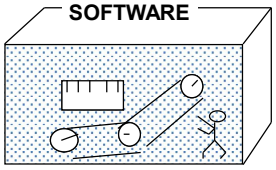
- Aspetos a definir numa arquitetura:
  - Quais as instruções suportadas
  - Como organizar a memória (e os acessos)
  - Quantos registos
    - Registos específicos ou gerais
  - Tipos de dados e estruturas suportadas
  - Modos de endereçamento e de acesso a dados e instruções
  - Qual o formato das instruções
  - Condições de Exceção



24

Arquitetura do Conjunto de Instruções

- Fatores a ter em conta no desenho de uma arquitetura:
  - As aplicações a que se destina
  - A linguagem de programação
  - O sistema operativo
  - As possibilidades tecnológicas
  - A compatibilidade histórica

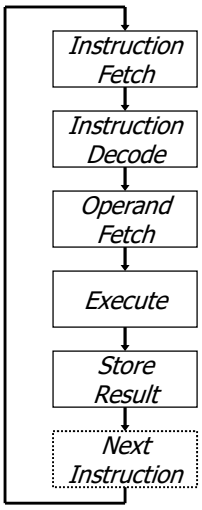


- Objetivos de uma arquitetura:
  - Implementação eficiente e simples em hardware
  - Fácil de entender e programar
  - Compiladores eficientes

25

Ciclo básico de execução de uma instrução

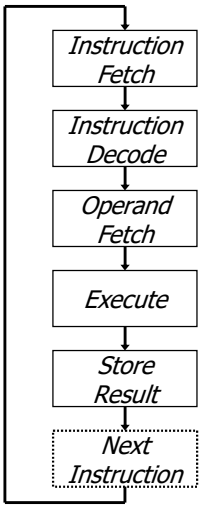
Fetch-execute cycle



26

Arquitetura de Computadores

- Arquitetura do conjunto de instruções define:
  - Formato e codificação das instruções
    - como são descodificadas?
  - Localização de operandos e resultados
    - onde?
    - quantos operandos explícitos?
    - como localizar?
    - quais podem residir na memória externa?
  - Tipo e dimensão dos dados
  - Operações
    - quais devem ser suportadas?
  - Instruções auxiliares
    - jumps, conditions, branches
    - fetch-decode-execute (implícito)!



27

Variáveis da Arquitetura de Computadores

- Formato das instruções
  - Tamanho variável
    - Código mais pequeno
    - maior flexibilidade
    - *Instruction fetch* em vários passos
  - Tamanho fixo
    - *Instruction fetch* e *decode* mais simples
    - Mais simples de implementar em *pipeline*

28

Variáveis da Arquitetura de Computadores

- Número de registos: muitos ou poucos?
  - Vantagens de um número pequeno de registos
    - Menos hardware
    - Acesso mais rápido
    - Menos bits para identificação do registo
    - Mudança de contexto mais rápida
  - Vantagens de um número elevado de registos
    - Menos acessos à memória
    - Variáveis em registos
  - Certos registos podem ter restrições de utilização

29

Variáveis da Arquitetura de Computadores

- Localização dos operandos
  - Acumulador
    - Resultado das operações é armazenado num registo especial designado de acumulador
  - Baseados em *Stack*
    - Operandos e resultado armazenados numa *stack* de registos
  - *Register-Memory*
    - Operandos residem em registos ou em memória
  - *Load-store architecture*
    - Operandos residem em registos de uso geral.

30

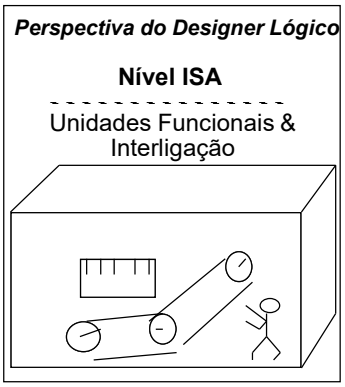
Exemplos de ISAs (*Instruction Set Architecture*)

- Intel x86
  - Computadores Pessoais
  - Servidores
- MIPS
  - Equipamentos de rede (CISCO)
  - Sistemas Embebidos
- IBM
  - Mainframes
- ARM
  - Sistemas Embebidos

31

Organização da máquina

- Características operativas e de performance das principais unidades funcionais
  - (ALU, Registos, *Shifters*, Unidades Lógicas, ...)
- De que modo esses componentes são interligados
- Fluxo de informação entre componentes
- Lógica e meios através dos quais esse fluxo é controlado
- Coreografia das Unidades Funcionais para implementar a *Instruction Set Architecture*.



32

Resumindo…

- Arquitetura é a visão que o programador tem do computador
  - Define-se (basicamente) pelo conjunto de instruções e localização dos operandos
- Microarquitetura é o modo de implementar no hardware a arquitetura.

33

Resumindo…

- O conjunto de instruções
  - É o conjunto de todas as instruções que um processador pode implementar
- Diferentes processadores têm diferentes conjuntos de instruções
  - Mas muitos aspetos são comuns (pelo menos ao nível dos conceitos).

34

Índice

- Conceitos fundamentais em Arquitectura de Computadores
  - Os elementos básicos de um computador
  - Modelo de Von Neumann
  - O ciclo básico de execução de uma instrução
- Arquitetura de Computadores
  - *Arquitetura do Conjunto de Instruções*
- Introdução à Arquitetura MIPS

35

Arquitetura MIPS

- Foi desenvolvida nos anos 80, em Stanford, por John Henessy.
- É usada atualmente pela Cisco, Nintendo e em muitos sistemas de computação dedicada (controladores, etc.)
  - Em 2004 já tinham sido vendidos mais de 300 milhões de processadores MIPS.
- É uma arquitetura RISC (Reduced Instruction Set Computer)

36

Linguagem *Assembly*

- Instruções: são comandos em linguagem de computador
  - Linguagem *assembly* é formato das instruções para humano ler.

    add $t0, $t1, $t2
  - Linguagem máquina é o formato das instruções para computador ler.

    0x012a4020

- Depois de aprender uma arquitetura é fácil aprender outras por comparação.

37

Critérios de Seleção de um Conjunto de Instruções (*ISA*)

- A escolha de uma arquitetura para o conjunto de instruções deve garantir:
  - A simplicidade da máquina que o implementa;
  - A clareza da sua aplicação aos problemas que realmente importam;
  - Uma solução tão rápida quanto possível dos problemas.

- 1º Princípio: A regularidade favorece a Simplicidade
- 2º Princípio: *Smaller is Faster*

38

As instruções da arquitetura MIPS

- Adição: a = b + c;
- A instrução *assembly* correspondente é:

  add a, b, c

- **add** é a mnemónica que indica a operação a realizar
- **b** e **c** são os operandos fonte
- **a** é o operando destino (quem guarda o resultado)

39

As instruções da arquitetura MIPS

- Subtração: a = b - c;
- A instrução *assembly* correspondente é similar à adição, apenas muda a mnemónica:

  sub a, b, c

- **sub** é a mnemónica (indica a operação)
- **b** e **c** são os operandos fonte
- **a** é o operando destino

40

1º Princípio de Design

- Todas as instruções aritméticas seguem este padrão.
  - Dois operandos fonte e um destino
- **A simplicidade favorece a regularidade.**
  - O formato das instruções é sempre consistente
  - São mais simples de codificar e de processar em hardware

41

Múltiplas Instruções

- E como se resolve:

  a = b + c – d;

- Operações mais complexas são codificadas em múltiplas instruções do MIPS.
- MIPS:

  add t, b, c

  sub a, t, d

42

2º Princípio de Design

- Tornar rápido o caso comum
  - O MIPS apenas tem instruções simples e frequentes
  - O hardware que implementa essas instruções simples é simples, pequeno e rápido
  - As operações mais complexas (menos comuns) são executadas usando múltiplas instruções simples
    - Exemplo: somar 2 operandos em memória.

```
lw  t1, op1
lw  t2, op2
add dst, t1,t2
```

- O MIPS é um processador **RISC**
  - Outras arquiteturas, como a família x86, segue uma filosofia CISC (Complex Instruction Set Computer)

Operandos

- Os operandos podem estar localizados:
  - Nos registos internos
  - Na memória (apenas nas instruções de acesso à memória)
    - lw e sw
  - Na própria instrução (constantes/imediatos)

Operandos: Registos

- O MIPS tem 32 registos de 32 bits.
  - Numerados de 0 a 31;
  - Com palavras de 32 bits
- O acesso a informação contida nos registos é mais rápido do que o acesso à memória.
  - Porque "Smaller is Faster"
    - É mais rápido aceder a 1 de 32 registos do que a 1 posição de entre milhões na memória.
- A arquitetura MIPS é de 32 bits porque opera com dados de 32 bits.

45

Os registos do MIPS

- Registos:
  - São indicados com o símbolo $
  - Por exemplo $0, "o registo zero" ou "dólar zero"
- Alguns registos são usados com funções específicas:
  - $0 guarda a constante zero
  - Os registos $s0-$s7 guardam variáveis (chamam-se *saved registers*)
  - Os registos $t0-$t9, guardam valores temporários.

46

Os Registos do MIPS

Name	Register Number	Usage
`$0`	0	the constant value 0
`$at`	1	assembler temporary
`$v0-$v1`	2-3	Function return values
`$a0-$a3`	4-7	Function arguments
`$t0-$t7`	8-15	temporaries
`$s0-$s7`	16-23	saved variables
`$t8-$t9`	24-25	more temporaries
`$k0-$k1`	26-27	OS temporaries
`$gp`	28	global pointer
`$sp`	29	stack pointer
`$fp`	30	frame pointer
`$ra`	31	Function return address

47

A instrução add de novo

- Adição: a = b + c;
- $t0 -> a
- $t1 -> b
- $t2 -> c

add $t0, $t1, $t2

48

Operandos: Memória

- Um problema real não pode ser resolvido apenas com 32 registos de memória.
  - Para armazenar mais dados usa-se a memória externa.
  - A memória é grande, mas lenta…
- Então…
  - Procura-se que as variáveis usadas mais frequentemente sejam guardadas em registos.
- Para efetuar operações aritméticas com operandos em memória
  - 1º carregam-se os dados em registos
  - 2º faz-se a operação
  - 3º Guarda-se o resultado

49

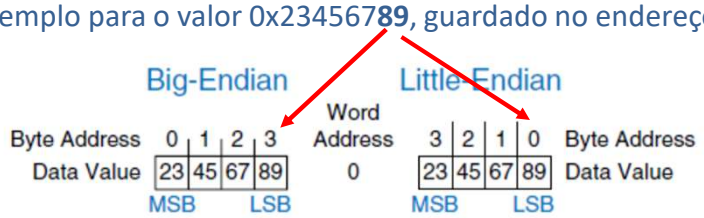
Operandos em Memória

- A memória é usada para armazenar dados
  - Podem ser arrays, estruturas, etc.
- A memória no MIPS é *byte addressable*.
  - É possível endereçar cada byte individualmente.
- Cada **palavra** (4 bytes) em memória tem que ser armazenada num endereço múltiplo de 4
  - Alinhamento das palavras em memória
- Problema:
  - Qual o ordem dos bytes? Isto é, o byte mais significativo coloca-se no endereço de memória mais alto ou mais baixo?

50

Endereçamento de Palavras na Memória

- Alguns processadores usam representação Big-Endian, isto é, o fim do número está no endereço mais alto.
  - Ou seja o byte menos significativo do número está no endereço de memória mais alto.
- Outros usam representação Little-Endian, isto é, o fim do número está no endereço de memória mais baixo:
  - Ou seja o byte menos significativo do número está no endereço de memória mais baixo.
- Exemplo para o valor 0x23456789, guardado no endereço 0:



51

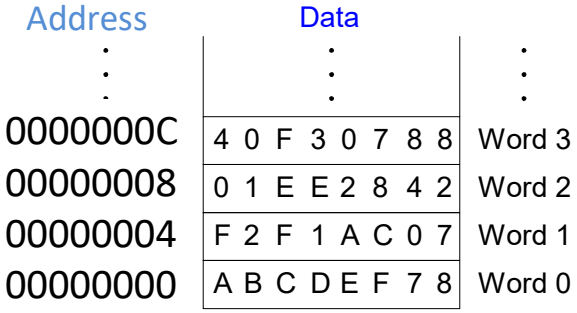
Instruções para acesso à memória

- Acesso à memoria para leitura: ***load***
- Mnemónica: load word (lw)
- Formato:
  - lw $t0, 8($t1)
- Determinação do endereço:
  - Soma-se ao endereço base (o valor contido em $t1) o valor 8
  - Endereço = $t1+8
- Resultado:
  - O registo $t0 fica com a palavra armazenada na memória no endereço $t1+8.

52

Instruções para acesso à memória

- Exemplo ler a palavra do endereço 4 para o registo $t2.
  - lw $t2, 4($0)
- $t2 fica com o valor 0xF2F1AC07



Instruções para acesso à memória

- Acesso à memoria para escrita: ***store***
- Mnemónica: store word (sw)
- Formato:
  - sw $t0, 4($0)
- Determinação do endereço:
  - Tal como no lw
- Resultado:
  - O valor contido no registo $t0 é escrito na memória na posição 4.

Instruções para acesso à memória

- Já vimos que o MIPS é ***byte addressable***.
- Então deve ser possível fazer **load** e/ou **store** de apenas um byte.
- Isso é feito com as instruções **lb** e **sb**

55

Big Endian, Little Endian?

- Numa máquina Big Endian, qual o resultado (em $t1) das seguintes instruções:
  - Suponha que $t0 contem 0x12345678.
  - sw $t0, 0($s0)
  - lb $t1, 1($s0)
- $t0 vai ser armazenado nos endereços a partir de $s0
  - $s0+0: 0x12 0b 0001 0010
  - $s0+1: 0x34
  - $s0+2: 0x56
  - $s0+3: 0x78
- Então $t1 assume o valor 0x34.

56

Operandos: Constantes/Imediatos

- As instruções lw/sw usam constantes.
- São valores que estão **imediatamente** disponíveis na instrução
  - Codificados como um número representado em complemento para 2 com 16 bits.
- As instruções aritméticas e lógicas também podem usar imediatos.
- Por exemplo:
  - a = a+4; -> addi $t0, $t0, 4

57

Linguagem Máquina

- A representação binária das instruções.
  - Os computadores só entendem 0's e 1's.
- As instruções (no MIPS) são codificadas em palavras de 32 bits:
  - A simplicidade favorece a regularidade:
    - Palavras de 32 bits para dados e instruções.
- Existem 3 tipos de instruções possíveis:
  - Tipo R: para operandos em registos
  - Tipo I: para um operando imediato
  - Tipo J: para saltos

58