

Aula 1

- Conceitos fundamentais em Arquitetura de Computadores
 - Arquitetura básica de um sistema computacional
 - Arquitetura básica do CPU
 - O ciclo de execução de uma instrução
 - Níveis de representação
 - Codificação de instruções
 - *Instruction Set Architecture* (ISA)
 - Classes de instruções

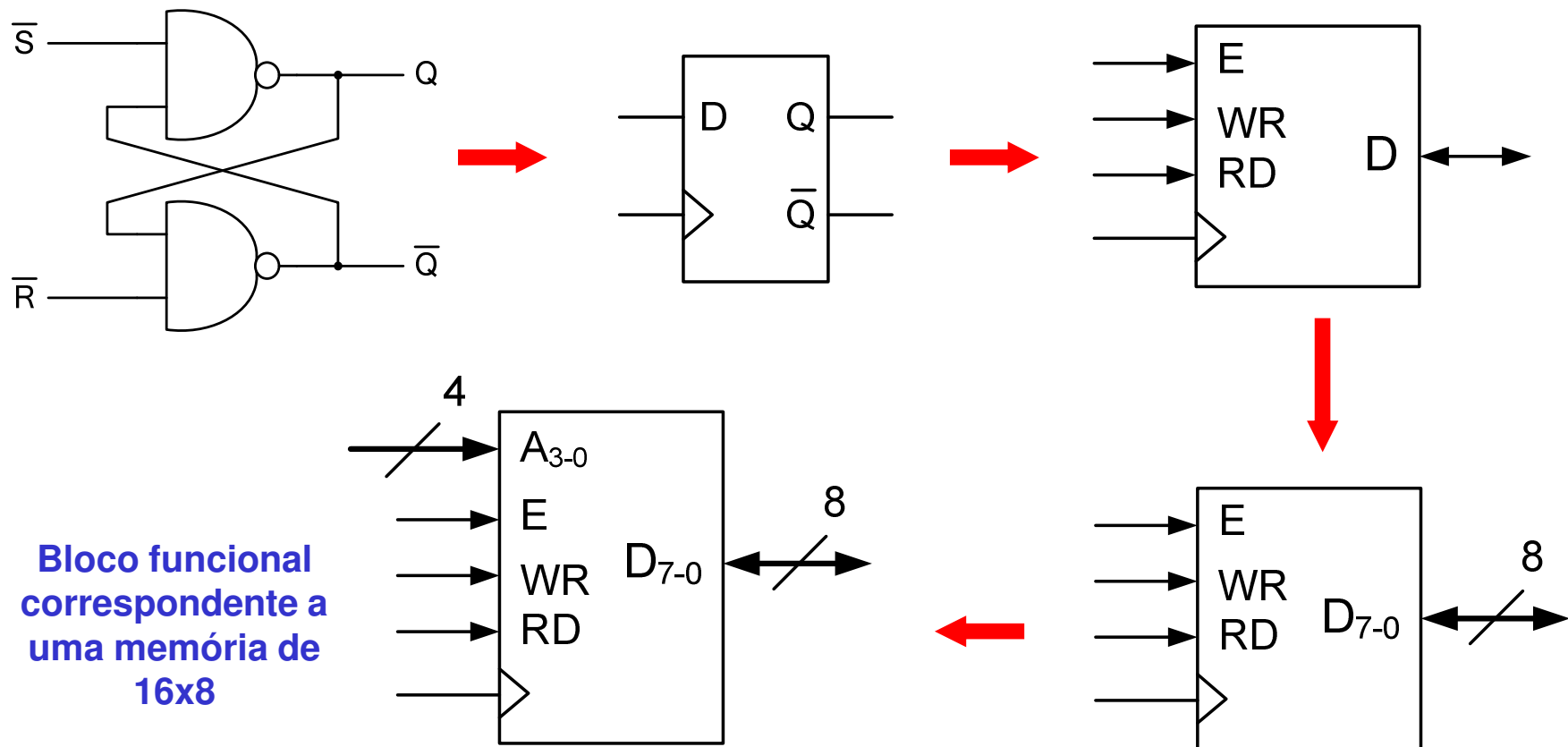
Bernardo Cunha, José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira

Arquitetura de Computadores e Sistemas Digitais

- Arquitetura de Computadores é uma das áreas de aplicação direta dos conceitos, técnicas e metodologias aprendidas nas duas UCs de Sistemas Digitais
- Em Arquitetura de Computadores, contudo, trabalha-se num nível de abstração diferente
- Recorre-se, na maior parte das vezes, a **blocos funcionais complexos** com cuja síntese, normalmente, não temos que nos preocupar (isso não significa que a sua funcionalidade não tenha que ser totalmente compreendida)

Exemplo: memória RAM 16x8

- Por exemplo, uma "Memória" (um dispositivo com capacidade para armazenar informação digital binária) pode ser construída à custa de blocos básicos bem conhecidos dos sistemas digitais: **flip-flops**

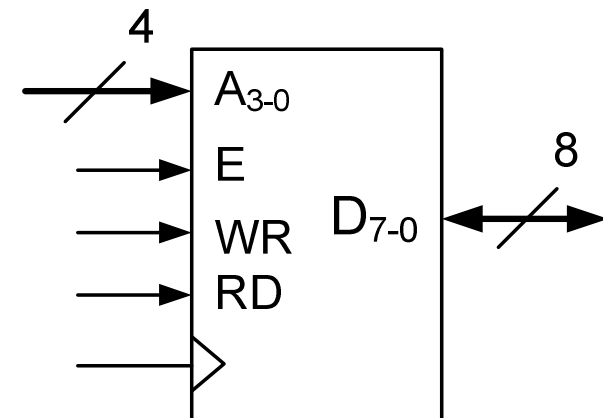


Exemplo: memória RAM 16x8 – VHDL

- O mesmo bloco pode, contudo, ser modelado numa linguagem de descrição de hardware, por exemplo VHDL, usando para isso uma mera descrição comportamental:

```
entity RAM_16_8 is
  port ( clk      : in std_logic;
        addr     : in std_logic_vector(3 downto 0);
        enable    : in std_logic;
        wr       : in std_logic;
        rd       : in std_logic;
        data_io  : inout std_logic_vector(7 downto 0));
end RAM_16_8;
```

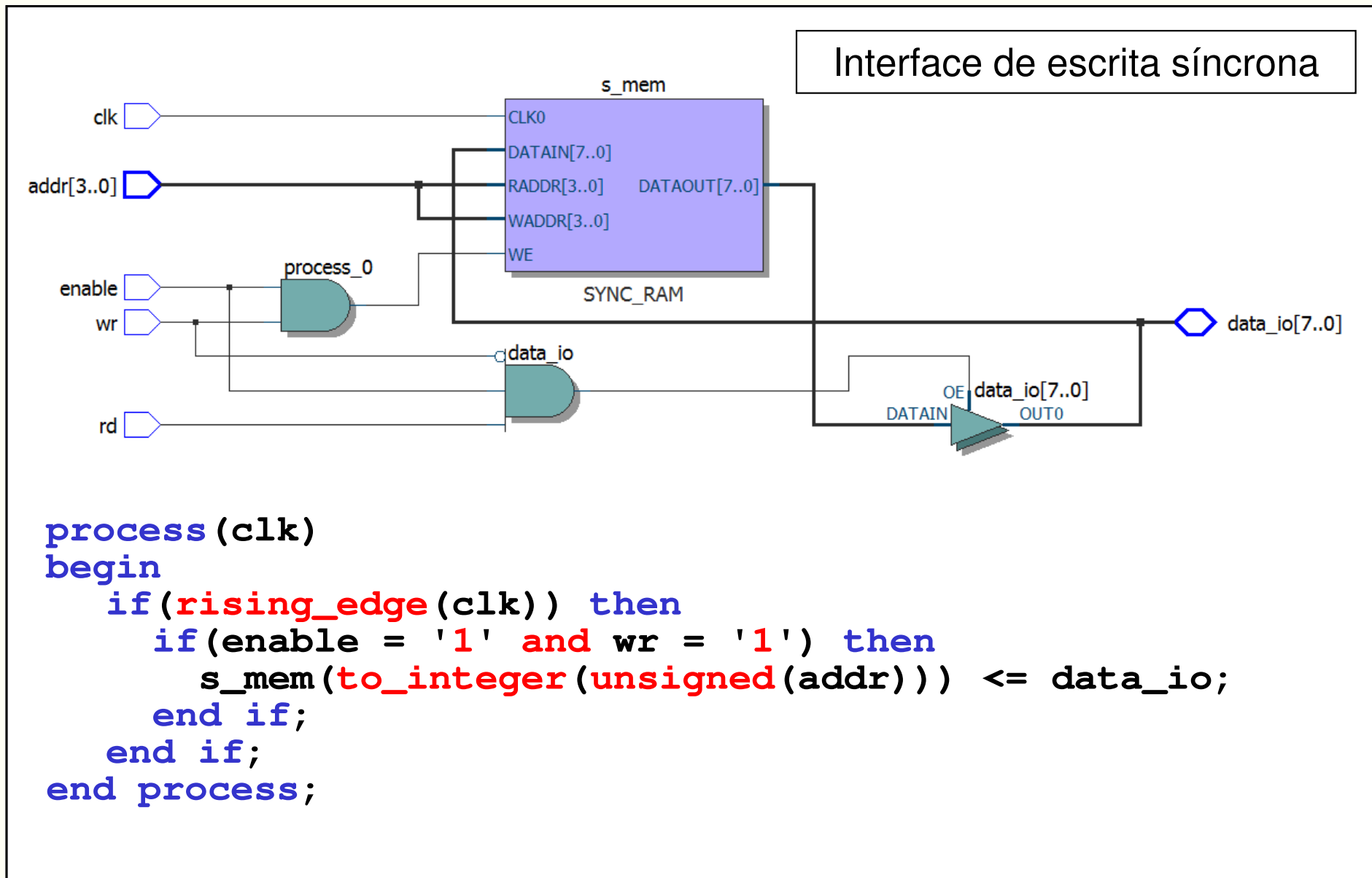
Escrita síncrona e leitura assíncrona.
O barramento de dados é bidirecional.



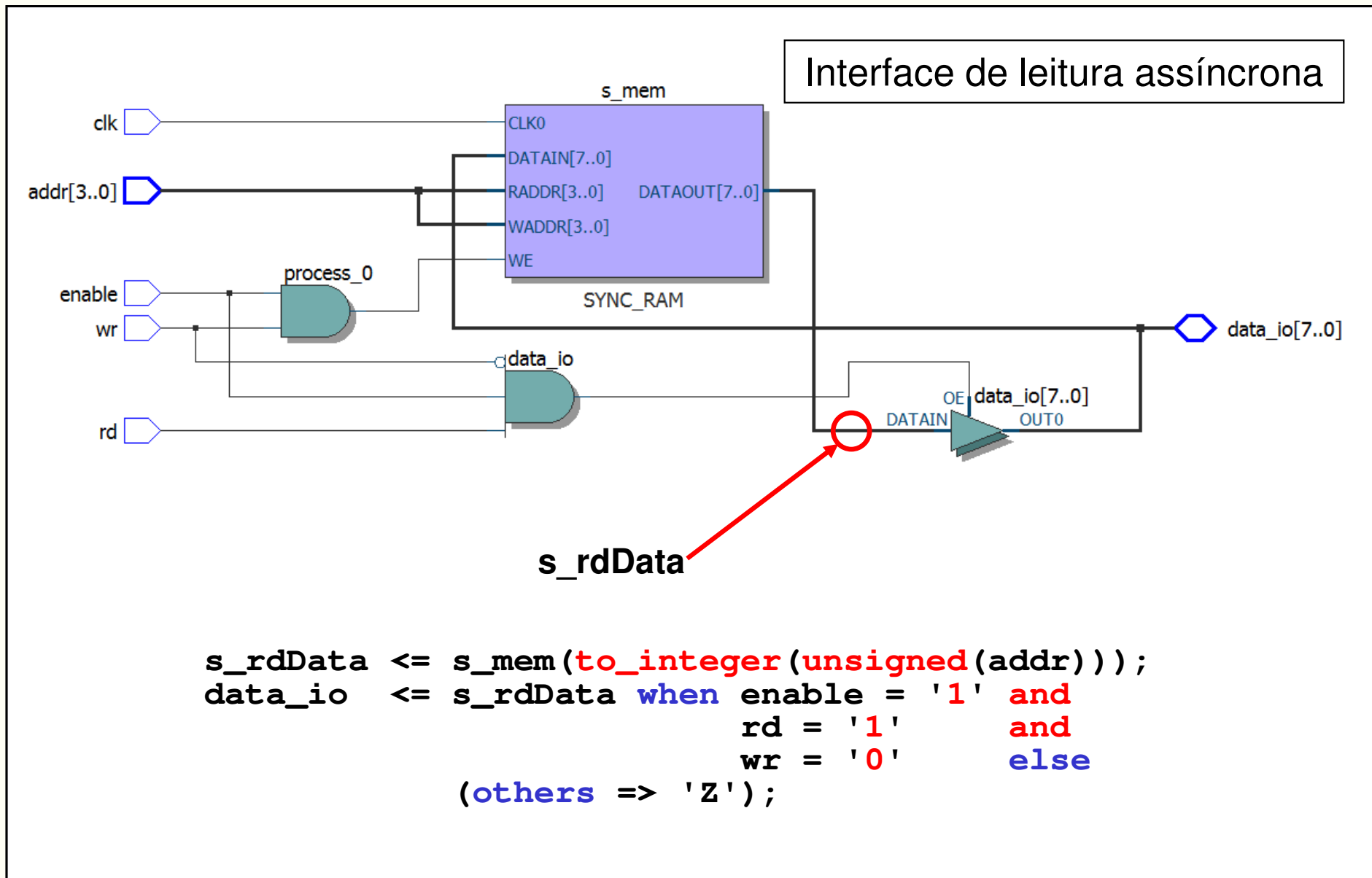
Exemplo: memória RAM 16x8 – VHDL

```
architecture Behavioral of RAM_16_8 is
    subtype TData is std_logic_vector(7 downto 0);
    type TMemory is array(0 to 15) of TData;
    signal s_mem : TMemory;
    signal s_rdData : std_logic_vector(7 downto 0);
begin
    process(clk)
    begin
        if(rising_edge(clk)) then
            if(enable = '1' and wr = '1') then
                s_mem(to_integer(unsigned(addr))) <= data_io;
            end if;
        end if;
    end process;
    s_rdData <= s_mem(to_integer(unsigned(addr)));
    data_io <= s_rdData when enable = '1' and rd = '1' and
        wr = '0' else (others => 'Z');
end Behavioral;
```

Exemplo: memória RAM 16x8 - síntese



Exemplo: memória RAM 16x8 - síntese



A máquina e a sua linguagem

- Princípios básicos dos computadores atuais:
 - As instruções são representadas da mesma forma que os números
 - Os programas são armazenados em memória, para serem lidos e escritos, tal como os números
- Estes princípios formam os fundamentos do conceito da arquitetura **"stored-program"**
 - O conceito "stored-program" implica que na memória possa residir, ao mesmo tempo, informação de natureza tão variada como: o código fonte de um programa em C, um editor de texto, um compilador, e o próprio programa resultante da compilação

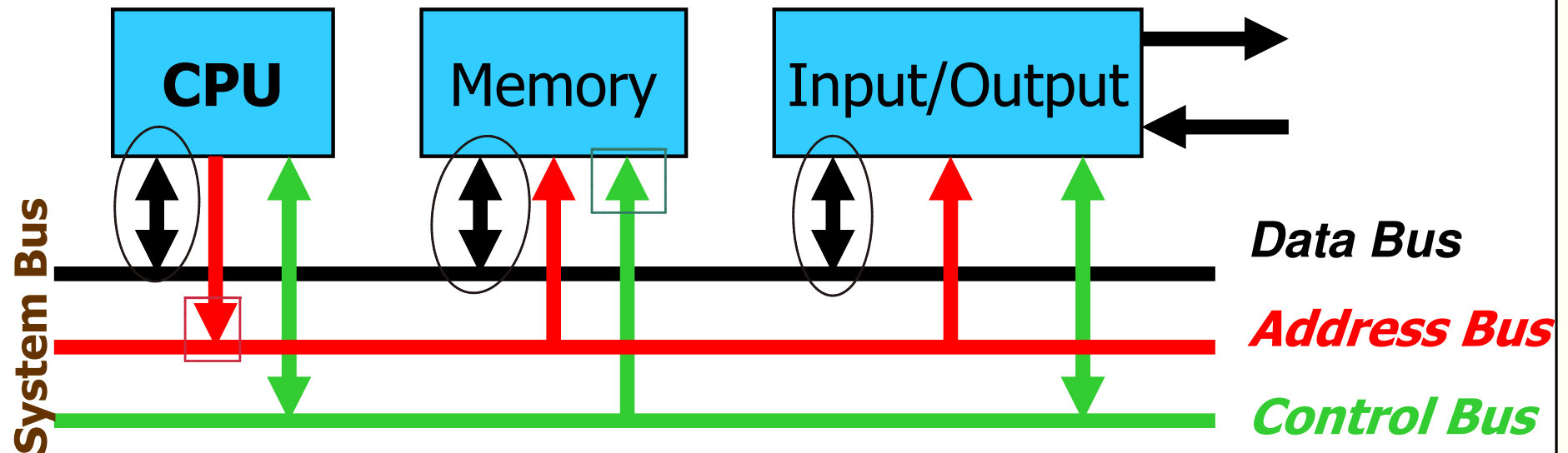
Arquitetura básica de um sistema computacional

- Unidades fundamentais que constituem um computador
 - **CPU** – responsável pelo processamento da informação através da execução de uma sequência de instruções (programa) armazenadas em memória
 - **Memória** – responsável pelo armazenamento de:
 - Programas
 - Dados para processamento
 - Resultados
 - **Unidades de I/O** – responsáveis pela comunicação com o exterior
 - **Unidades de entrada** – permitem a receção de informação vinda do exterior (dados, programas) e que é armazenada em memória
 - **Unidades de saída** – permitem o envio de resultados para o exterior
- Um computador é um sistema digital complexo

Cada um destes blocos é um sistema digital!

Arquitetura básica de um sistema computacional

- Modelo de von Neumann



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

Arquitetura básica de um sistema computacional

- **Endereço** (*address*) – um número (único) que identifica cada registo de memória. Os endereços são contados sequencialmente, começando em 0
 - Exemplo: o conteúdo da posição de memória 0x2000 é 0x32 – (0x2000 é o endereço, 0x32 o valor armazenado)
- **Espaço de endereçamento** (*address space*) – a gama total de endereços que o CPU consegue referenciar (depende da dimensão do barramento de endereços).
 - Exemplo: um CPU com um barramento de endereços de 16 bits pode gerar endereços na gama: 0x0000 a 0xFFFF (i.e., 0 a $2^{16}-1$)
 - Qual o espaço de endereçamento de um processador com um barramento de endereços de 32 bits?

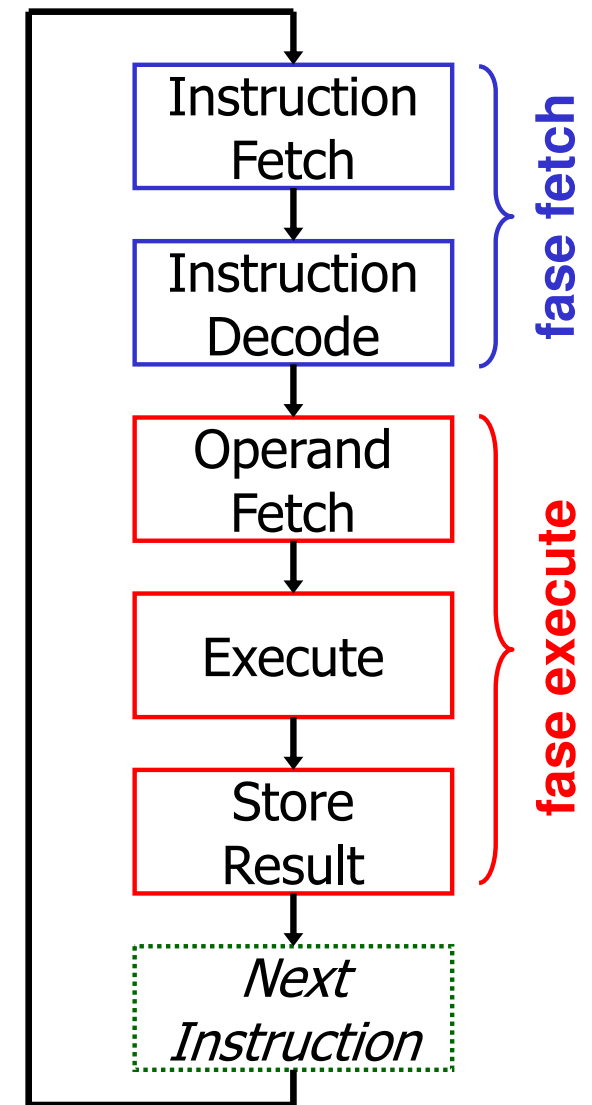
$$2^{32}$$

Arquitetura básica do CPU

- **Secção de dados** (*datapath*) – elementos operativos/funcionais para encaminhamento, processamento e armazenamento de informação
 - Multiplexers
 - Unidade Aritmética e Lógica (ALU) – Add, Sub, And, Or...
 - Registos internos
- **Unidade de controlo** – responsável pela coordenação dos elementos do *datapath*, durante a execução de um programa
 - Gera os sinais de controlo que adequam a operação de cada um dos recursos da secção de dados às necessidades da instrução que estiver a ser executada
 - Dependendo da arquitetura, pode ser uma máquina de estados ou um elemento meramente combinatório
- Independentemente da Unidade de Controlo ser combinatória ou sequencial, **o CPU é sempre uma máquina de estados síncrona**

Ciclo-base de execução de uma instrução

- **Instruction fetch:** leitura do código máquina da instrução (instrução reside em memória)
- **Instruction decode:** descodificação da instrução pela unidade de controlo
- **Operand fetch:** leitura do(s) operando(s)
- **Execute:** execução da operação especificada pela instrução
- **Store result:** armazenamento do resultado da operação no destino especificado na instrução



Níveis de Representação

High-level language
program (in C)

```
unsigned char toUpper(unsigned char c)
{
    if(c >= 'a' && c <= 'z')
        return (c - 0x20);
    else
        return c;
}
```

↓
Compiler

Assembly language
program (for MIPS)

```
toUpper:    addiu $5,$4,-97
            sltiu $1,$5,26
            or     $2,$4,$0
            beq    $1,$0,else
            addiu  $2,$4,-32
else:       jr     $31
```

↓
Assembler

Binary machine language
program (for MIPS)

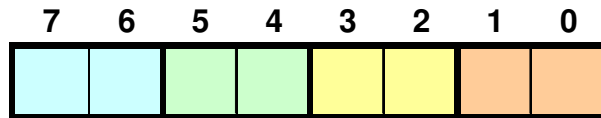
00100100100001001111111110011111	(0x2485ff9f)
00101100101000010000000000011010	(0x2ca1001a)
00000000100000000001000000100101	(0x00801025)
00010000001000000000000000000001	(0x10200001)
0010010010000010111111111100000	(0x2482ffe0)
00000011111000000000000000001000	(0x03e00008)

Codificação das instruções

- A **codificação de uma instrução**, sob a forma de um número expresso em binário, terá que ter toda a informação de que o CPU necessita para a sua execução
- Qual a operação a realizar?
- Qual a localização dos operandos (se existirem)?
 - podem estar em **registos internos do CPU** ou na **memória externa**. No 1º caso deverá ser especificado o número de um registo; no 2º um endereço de memória
- Onde colocar o resultado?
 - **Registos internos / memória**
- Qual a próxima instrução a executar?
 - 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

Exemplo - CPU hipotético

Formato de codificação das instruções (8 bits)



Formato 1

Oper. Rdest Rop1 Rop2



Formato 2

Oper. Reg. End. Memória

Registos Internos do CPU:

00	Reg. 0
01	Reg. 1
10	Reg. 2
11	Reg. 3

Operações possíveis:

- 00 Somar o conteúdo de dois registos
- 01 Ler da memória para um registo interno do CPU (LOAD)
- 10 Escrever o conteúdo de um registo interno na memória (STORE)
- 11 Não definida (N.D.)

Exemplo de programa em código máquina para este processador

Hex Binary

0x58 01011000

0x79 01111001

0x15 00010101

0x07 00000111

0x8A 10001010

Ler o conteúdo da posição de memória 8 para o registo interno 1

Ler o conteúdo da posição de memória 9 para o registo interno 3

Somar o conteúdo do reg. 1 c/ o reg. 1 e depositar o result. no reg. 1

Somar o conteúdo do reg. 1 c/ o reg. 3 e depositar o result. no reg. 0

Escrever o conteúdo do reg. 0 na posição de memória 10

Qual é a expressão aritmética implementada neste programa?

Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA)

- **Instruction Set**: coleção de todas as operações/instruções que o processador pode executar
- **Instruction Set Architecture (ISA)**
 - *... os atributos de um sistema computacional tal como são vistos pelo programador, i.e. a estrutura concetual e o comportamento funcional, de forma distinta e independente da organização do fluxo de informação e dos respetivos elementos de controlo, do desenho lógico e da implementação física.* — Amdahl, Blaaw, and Brooks, 1964
- Arquitetura de Computadores =
Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA) + Organização da Máquina

Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA)

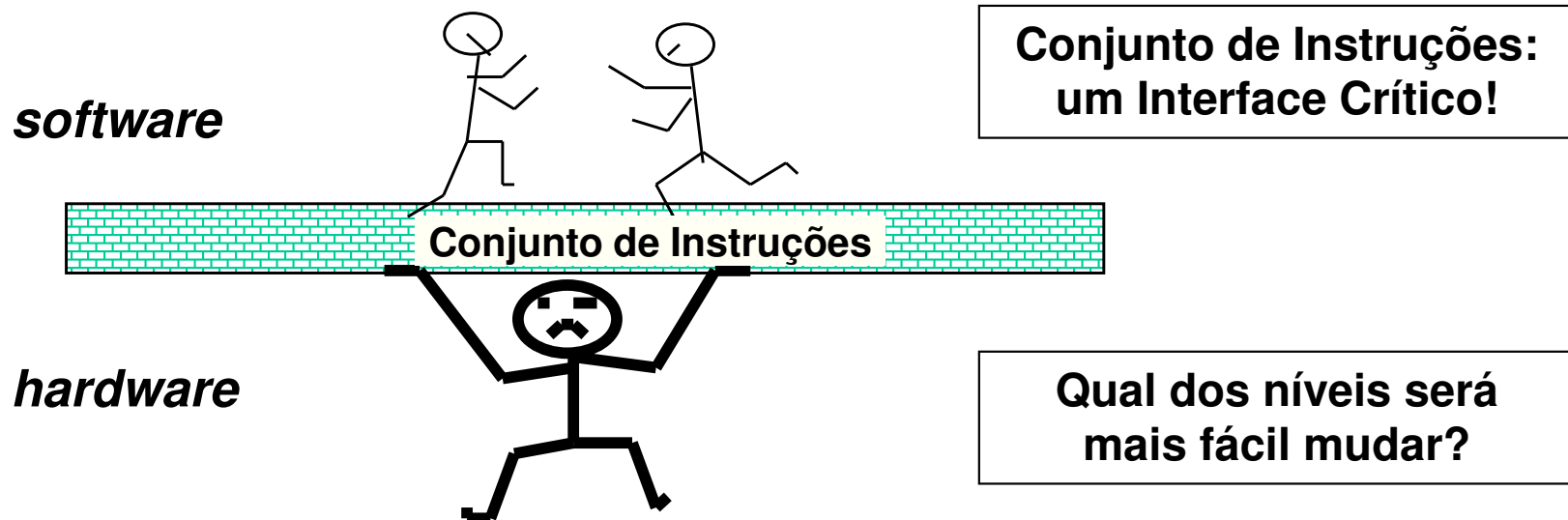
- Também designada por "modelo de programação"
- Descreve tudo o que o programador necessita de saber para programar corretamente, em *assembly*, um determinado processador
- Uma importante abstração que representa a **interface entre o nível mais básico de software e o hardware**
- Descreve a funcionalidade, de forma independente do hardware que a implementa. Pode assim falar-se de "**arquitetura**" e "**implementação de uma arquitetura**"
- Exemplo em que a mesma arquitetura do conjunto de instruções tem 2 implementações físicas distintas:
 - Processadores AMD compatíveis com Intel x86

Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA)

- Alguns exemplos de ISAs:
 - MIPS
 - ARM (Nintendo DS, iPod, Canon PowerShot, smartphones, ...)
 - Intel x86 (PCs, MACs)
 - PowerPC
 - Cell (playstation 3)

Arquitetura do Conjunto de Instruções (ISA)

- Requisitos básicos da Arquitetura do Conjunto de Instruções:
 - Fácil de entender e programar
 - Desenvolvimento de compiladores eficientes
 - Implementação simples e eficiente em hardware
 - Com o melhor desempenho possível
 - Eficiente do ponto de vista energético
 - Com o menor custo possível



Classes de instruções

- Um dada arquitetura pode ter um ISA com centenas de instruções
- É possível, no entanto, considerar a existência de um grupo limitado de classes de instruções comuns à generalidade das arquiteturas
- Classes de instruções:
 - **Processamento**
 - Aritméticas e lógicas
 - **Transferência de informação**
 - Cópia entre registos internos e entre registos internos e memória
 - **Controlo de fluxo de execução**
 - Alteração da sequência de execução (estruturas condicionais, ciclos, chamadas a funções,...)

Questões

- O que é um endereço? *Um endereço é um número, por exemplo 0x2000, que identifica um endereço de memória.*
- O que é o espaço de endereçamento de um processador? *É o número total de endereços de um processador, se este tem 16 bits, tem 2^{16} endereços, ou seja, o espaço de endereçamento é 2^{16} .*
- ③ • Como se organiza internamente um processador? Quais são os blocos fundamentais da secção de dados? Para que serve a unidade de controlo?
- ④ • O que é o conceito "stored-program"?
- ⑤ • Como se codifica uma instrução? Que informação fundamental deverá ter o código de uma instrução?
- ⑥ • O que é o ISA?
- ⑦ • Quais são as classes de instruções que agrupam as instruções de uma arquitetura?

③ Um processador internamente organiza-se pela secção de dados e unidade de controlo.

Orde a secção de dados é responsável pelos elementos operacionais, como ALUs, para o encaminhamento, processamento e armazenamento de informações

EPA

E a unidade de controlo é responsável pela coordenação dos elementos da secção de dados.

Os blocos fundamentais são os multiplexers, ALUs e registos internos.

④ O conceito stored-program tem como objetivo armazenar as instruções do programa na mesma memória usada para os dados.

Introduzido pelo matemático John von Neumann, esse modelo permite que o processador busque e execute instruções diretamente da memória, tornando os computadores mais flexíveis e programáveis. É a base da arquitetura dos computadores modernos.

⑤ Uma instrução é codificada através de uma sequência de bits que o processador pode interpretar e executar.

É fundamental que o código de uma instrução tenha

- O código de operações
- Os operandos
- Modo de endereçamento

⑥ O ISA é o modelo que define como o CPU funciona e entende as instruções.

O ISA define quantos registos o CPU tem, que tipo de dados suporta, como é que acessa a memória, etc.

⑦ As classes de instruções que agrupam as instruções de uma arquitetura são:

- Processamento
- Transferência de informações
- Controlo de fluxo de execução