



UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
SERGIPE



DEPARTAMENTO
DE
COMPUTAÇÃO

Linguagem de máquina e de montagem

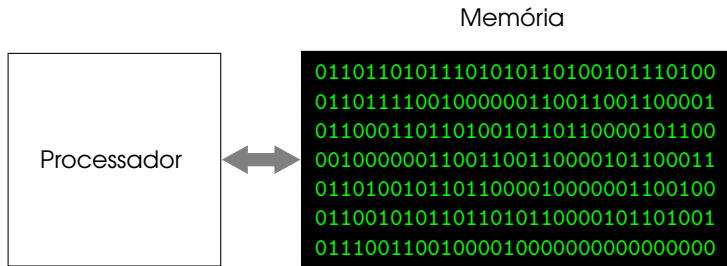
Arquitetura de Computadores

Bruno Prado

Departamento de Computação / UFS

Introdução

- ▶ O que é linguagem de máquina?
 - ▶ É a representação em formato binário das instruções que o processador é capaz de entender e executar



Introdução

- ▶ O que é linguagem de montagem (*assembly*)?
 - ▶ É uma linguagem de programação de baixo nível que utiliza mnemônicos e dados em formatos decimal ou hexadecimal para descrição das instruções

Linguagem
de montagem

```
l32 r1, [0x40]  
cmpi r1, 0  
beq 2  
subi r1, r1, 1  
bun -4  
s32 [0x40], r1  
int 0
```



Memória

```
01101101011101010110100101110100  
01101111001000000110011001100001  
01100011011010010110110000101100  
00100000011001100110000101100011  
01101001011011000010000001100100  
01100101011011010110000101101001  
01110011001000010000000000000000
```

Introdução

- ▶ O que é linguagem de montagem (*assembly*)?
 - ▶ É uma linguagem de programação de baixo nível que utiliza mnemônicos e dados em formatos decimal ou hexadecimal para descrição das instruções

Linguagem
de montagem

```
l32 r1, [0x40]
cmpi r1, 0
beq 2
subi r1, r1, 1
bun -4
s32 [0x40], r1
int 0
```



Memória

```
01101101011101010110100101110100
01101111001000000110011001100001
01100011011010010110110000101100
00100000011001100110000101100011
01101001011011000010000001100100
01100101011011010110000101101001
01110011001000010000000000000000
```

O montador (*assembler*) é responsável por traduzir o código de montagem para linguagem de máquina

Introdução

- ▶ Representação binária, decimal e hexadecimal
 - ▶ Normalmente os seres humanos trabalham com números representados em base decimal (10 dígitos)
 - ▶ Os dados e as instruções nos computadores são representadas em formato binário (2 dígitos)

Introdução

- ▶ Representação binária, decimal e hexadecimal
 - ▶ Normalmente os seres humanos trabalham com números representados em base decimal (10 dígitos)
 - ▶ Os dados e as instruções nos computadores são representadas em formato binário (2 dígitos)

$$\begin{aligned}123_{10} &= 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0 \\&= 1 \times 2^6 + 59 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 27 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 11 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 3 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\&= 01111011_2\end{aligned}$$

Introdução

- ▶ Representação binária, decimal e hexadecimal
 - ▶ Normalmente os seres humanos trabalham com números representados em base decimal (10 dígitos)
 - ▶ Os dados e as instruções nos computadores são representadas em formato binário (2 dígitos)

$$\begin{aligned}123_{10} &= 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0 \\&= 1 \times 2^6 + 59 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 27 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 11 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 3 \\&= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\&= 01111011_2\end{aligned}$$

A notação posicional pode ser utilizada em qualquer base numérica

Introdução

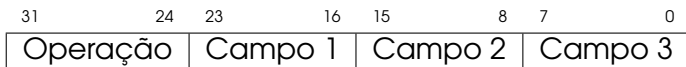
- ▶ Representação binária, decimal e hexadecimal
 - ▶ O formato hexadecimal permite codificar diretamente números binários agrupados em *nibbles*, reduzindo significativamente a quantidade de dígitos

0110 ₂	0100 ₂	1110 ₂	0110 ₂	1001 ₂	0100 ₂	1000 ₂	1101 ₂
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
6 ₁₆	4 ₁₆	E ₁₆	6 ₁₆	9 ₁₆	4 ₁₆	8 ₁₆	D ₁₆

$$01100100111001101001010010001101_2 = 64E6948D_{16}$$

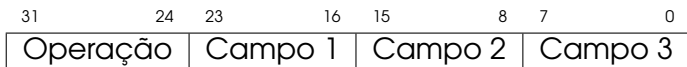
Introdução

- ▶ Como entender, organizar e traduzir as instruções para linguagem de máquina?
 - ▶ Todas as informações são números em formato binário
 - ▶ É preciso fazer as conversões numéricas e atender ao formatos definidos na especificação (*datasheet*)



Introdução

- ▶ Como entender, organizar e traduzir as instruções para linguagem de máquina?
 - ▶ Todas as informações são números em formato binário
 - ▶ É preciso fazer as conversões numéricas e atender ao formatos definidos na especificação (*datasheet*)



Regularidade



Simplicidade

Introdução

- ▶ Paradigmas de computação
 - ▶ *Complex Instruction Set Computing* (CISC)
 - ▶ Focado na linguagem de programação, simplificando a tradução para linguagem de máquina e deixando a arquitetura do processador mais complexa
 - ▶ *Reduced Instruction Set Computing* (RISC)
 - ▶ Centrado no funcionamento do processador, simplificando a arquitetura de hardware e tornando o software mais complexo (incluindo o compilador)

Introdução

- ▶ Paradigmas de computação
 - ▶ *Complex Instruction Set Computing* (CISC)
 - ▶ Focado na linguagem de programação, simplificando a tradução para linguagem de máquina e deixando a arquitetura do processador mais complexa
 - ▶ Instruções com operandos em memória
 - ▶ *Reduced Instruction Set Computing* (RISC)
 - ▶ Centrado no funcionamento do processador, simplificando a arquitetura de hardware e tornando o software mais complexo (incluindo o compilador)
 - ▶ Arquitetura de carregamento-armazenamento

Introdução

- ▶ Paradigmas de computação
 - ▶ *Complex Instruction Set Computing* (CISC)
 - ▶ Focado na linguagem de programação, simplificando a tradução para linguagem de máquina e deixando a arquitetura do processador mais complexa
 - ▶ Instruções com operandos em memória
 - ▶ Maior densidade de código
 - ▶ *Reduced Instruction Set Computing* (RISC)
 - ▶ Centrado no funcionamento do processador, simplificando a arquitetura de hardware e tornando o software mais complexo (incluindo o compilador)
 - ▶ Arquitetura de carregamento-armazenamento
 - ▶ Menor densidade de código

Introdução

- ▶ Paradigmas de computação
 - ▶ *Complex Instruction Set Computing* (CISC)
 - ▶ Focado na linguagem de programação, simplificando a tradução para linguagem de máquina e deixando a arquitetura do processador mais complexa
 - ▶ Instruções com operandos em memória
 - ▶ Maior densidade de código
 - ▶ Ex: IBM, Intel x86, Z80, ...
 - ▶ *Reduced Instruction Set Computing* (RISC)
 - ▶ Centrado no funcionamento do processador, simplificando a arquitetura de hardware e tornando o software mais complexo (incluindo o compilador)
 - ▶ Arquitetura de carregamento-armazenamento
 - ▶ Menor densidade de código
 - ▶ Ex: ARM, MIPS, RISC-V, ...

Introdução

- ▶ Paradigmas de computação
 - ▶ *Complex Instruction Set Computing* (CISC)
 - ▶ Focado na linguagem de programação, simplificando a tradução para linguagem de máquina e deixando a arquitetura do processador mais complexa
 - ▶ Instruções com operandos em memória
 - ▶ Maior densidade de código
 - ▶ Ex: IBM, Intel x86, Z80, ...
 - ▶ *Reduced Instruction Set Computing* (RISC)
 - ▶ Centrado no funcionamento do processador, simplificando a arquitetura de hardware e tornando o software mais complexo (incluindo o compilador)
 - ▶ Arquitetura de carregamento-armazenamento
 - ▶ Menor densidade de código
 - ▶ Ex: ARM, MIPS, RISC-V, ...

Convergência

CISC \rightleftharpoons RISC

Introdução

- ▶ Por que escolher uma arquitetura RISC?
 - ▶ A formatação regular e simples das instruções permite a decodificação e execução mais eficiente das operações, reduzindo a área de silício necessária, assim como o custo unitário e o consumo de potência

Introdução

- ▶ Por que escolher uma arquitetura RISC?
 - ▶ A formatação regular e simples das instruções permite a decodificação e execução mais eficiente das operações, reduzindo a área de silício necessária, assim como o custo unitário e o consumo de potência
 - ▶ Na arquitetura de carregamento-armazenamento é reduzido o número de acessos à memória e a latência das operações que são realizadas exclusivamente em registradores, explorando os princípios de localidade espacial e temporal

Introdução

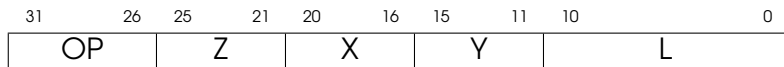
- ▶ Por que escolher uma arquitetura RISC?
 - ▶ A formatação regular e simples das instruções permite a decodificação e execução mais eficiente das operações, reduzindo a área de silício necessária, assim como o custo unitário e o consumo de potência
 - ▶ Na arquitetura de carregamento-armazenamento é reduzido o número de acessos à memória e a latência das operações que são realizadas exclusivamente em registradores, explorando os princípios de localidade espacial e temporal
 - ▶ Simplifica a implementação de técnicas para execução sobreposta (*pipeline*) ou paralela (superescalar) de instruções no processador

Linguagem de máquina

- ▶ Arquitetura Poxim
 - ▶ *Complexity-Reduced Instruction Set Processor* (CRISP)
 - ▶ Didática, hipotética e simples com 32 bits
 - ▶ Memória Von Neumann de 32 KiB
 - ▶ 3 formatos de instruções

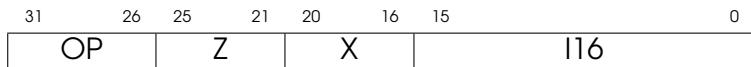
Linguagem de máquina

- ▶ Formato U (OP, Z, X, Y, L)
 - ▶ 6 bits para operação (OP)
 - ▶ 5 bits para operandos (Z, X, Y)
 - ▶ 11 bits para uso livre (L)



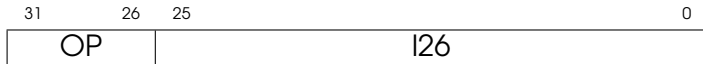
Linguagem de máquina

- ▶ Formato F (OP, Z, X, I16)
 - ▶ 6 bits para operação (OP)
 - ▶ 5 bits para operandos (Z, X)
 - ▶ 16 bits para imediato (I16)



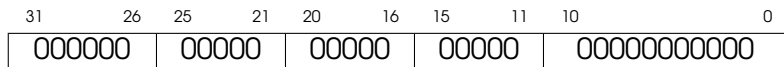
Linguagem de máquina

- ▶ Formato S (OP, I26)
 - ▶ 6 bits para operação (OP)
 - ▶ 26 bits para imediato (I26)



Linguagem de máquina

- ▶ Operação ociosa
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Pseudo-instrução nop
 - ▶ Nenhuma ação é realizada

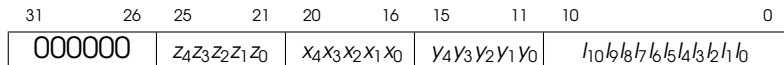


Linguagem de máquina

- ▶ Operações aritméticas e lógicas
 - ▶ Adição (add, addi)
 - ▶ Atribuição imediata (mov, movs)
 - ▶ Bit a bit (and, or, not, xor)
 - ▶ Comparação (cmp, cmpi)
 - ▶ Deslocamento (sla, sll, sra, srl)
 - ▶ Divisão (div, divs, divi)
 - ▶ Multiplicação (mul, muls, muli)
 - ▶ Subtração (sub, subi)

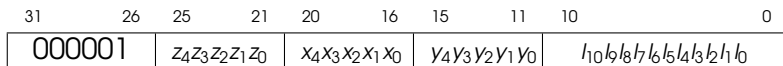
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de atribuição imediata (mov)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Sem extensão de sinal
 - ▶ $R[z] = 0^{11} : x : y : l$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de atribuição imediata (movs)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Com extensão de sinal
 - ▶ $R[z] = x_4 : x : y : l$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de adição com registradores (add)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ $R[z] = R[x] + R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0										
000010				$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$				$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$				$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$				—			

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$
 - ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[x]_{31} = R[y]_{31} \wedge R[z]_{31} \neq R[x]_{31})$
 - ▶ $CY \leftarrow (R[z]_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de subtração com registradores (sub)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ $R[z] = R[x] - R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0										
000011				$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$				$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$				$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$				—			

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$
 - ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[x]_{31} \neq R[y]_{31} \wedge R[z]_{31} \neq R[x]_{31})$
 - ▶ $CY \leftarrow (R[z]_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de multiplicação com registradores (mul)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Sem sinal
 - ▶ $R[l_{4:0}] : R[z] = R[x] \times R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	000	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$		

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[l_{4:0}] : R[z] = 0)$
 - ▶ $CY \leftarrow (R[l_{4:0}] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de deslocamento para esquerda (sl)
- ▶ Tipo U
- ▶ Lógico (sem sinal)
- ▶ $R[z] : R[x] = (R[z] : R[y]) \times 2^{l_{4:0}+1}$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	001	—	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$	

- ▶ Campos afetados
- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] : R[x] = 0)$
- ▶ $CY \leftarrow (R[z] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de multiplicação com registradores (muls)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Com sinal
 - ▶ $R[l_{4:0}] : R[z] = R[x] \times R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	010	—	—	$-l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$		

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[l_{4:0}] : R[z] = 0)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[l_{4:0}] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de deslocamento para esquerda (sla)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Aritmético (com sinal)
 - ▶ $R[z] : R[x] = (R[z] : R[y]) \times 2^{l_{4:0}+1}$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	011	—	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$	

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] : R[x] = 0)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[z] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de divisão com registradores (div)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Sem sinal
 - ▶ $R[l_{4:0}] = R[x] \bmod R[y]$, $R[z] = R[x] \div R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	100	—	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$	

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$
 - ▶ $ZD \leftarrow (R[y] = 0)$
 - ▶ $CY \leftarrow (R[l_{4:0}] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de deslocamento para direita (srl)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Lógico (sem sinal)
 - ▶ $R[z] : R[x] = (R[z] : R[y]) \div 2^{l_{4:0}+1}$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	101	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$		

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] : R[x] = 0)$
 - ▶ $CY \leftarrow (R[z] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de divisão com registradores (divs)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Com sinal
 - ▶ $R[l_{4:0}] = R[x] \bmod R[y]$, $R[z] = R[x] \div R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	110	—	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$	

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$
 - ▶ $ZD \leftarrow (R[y] = 0)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[l_{4:0}] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de deslocamento para direita (sra)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ Aritmético (com sinal)
 - ▶ $R[z] : R[x] = (R[z] : R[y]) \div 2^{l_{4:0}+1}$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	111	—	—	—	$l_4 l_3 l_2 l_1 l_0$	

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (R[z] : R[x] = 0)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[z] \neq 0)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de comparação com registradores (cmp)
 - ▶ Tipo U
 - ▶ $CMP = R[x] - R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0		
000101				—		$x_4x_3x_2x_1x_0$		$y_4y_3y_2y_1y_0$		—	

- ▶ Campos afetados
 - ▶ $ZN \leftarrow (CMP = 0)$
 - ▶ $SN \leftarrow (CMP_{31} = 1)$
 - ▶ $OV \leftarrow (R[x]_{31} \neq R[y]_{31}) \wedge (CMP_{31} \neq R[x]_{31})$
 - ▶ $CY \leftarrow (CMP_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação bit a bit (and)

- ▶ Tipo U

- ▶ $R[z] = R[x] \text{ and } R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0										
000110				$Z_4Z_3Z_2Z_1Z_0$				$X_4X_3X_2X_1X_0$				$Y_4Y_3Y_2Y_1Y_0$				—			

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação bit a bit (or)

- ▶ Tipo U

- ▶ $R[z] = R[x] \text{ or } R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
000111	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	—					

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação bit a bit (not)

- ▶ Tipo U

- ▶ $R[z] = \text{not } R[x]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
001000				$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$			$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$		—

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação bit a bit (xor)

- ▶ Tipo U

- ▶ $R[z] = R[x] \mathbf{xor} R[y]$

31	26	25	21	20	16	15	11	10	0
001001	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$y_4 y_3 y_2 y_1 y_0$	—					

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de adição imediata (addi)

- ▶ Tipo F

- ▶ $R[z] = R[x] + i_{15:i}^{16}$

31	26	25	21	20	16	15	0
010010	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$i_{15} i_{14} i_{13} i_{12} i_{11} i_{10} i_9 i_8 i_7 i_6 i_5 i_4 i_3 i_2 i_1 i_0$				

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$

- ▶ $OV \leftarrow (R[x]_{31} = i_{15}) \wedge (R[z]_{31} \neq R[x]_{31})$

- ▶ $CY \leftarrow (R[z]_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

► Operação de subtração imediata (subi)

► Tipo F

$$\text{► } R[z] = R[x] - i_{15:0}$$

31	26	25	21	20	16	15	0
010011	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$i_{15} i_{14} i_{13} i_{12} i_{11} i_{10} i_9 i_8 i_7 i_6 i_5 i_4 i_3 i_2 i_1 i_0$				

► Campos afetados

- $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$
- $SN \leftarrow (R[z]_{31} = 1)$
- $OV \leftarrow (R[x]_{31} \neq i_{15}) \wedge (R[z]_{31} \neq R[x]_{31})$
- $CY \leftarrow (R[z]_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de multiplicação imediata (mul)

- ▶ Tipo F

- ▶ Com sinal

- ▶ $R[z] = R[x] \times i_{15:16} : i$

31	26	25	21	20	16	15	0
010100	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$i_{15} i_{14} i_{13} i_{12} i_{11} i_{10} i_9 i_8 i_7 i_6 i_5 i_4 i_3 i_2 i_1 i_0$				

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $OV \leftarrow (R[z]_{63:32} \neq 0)$

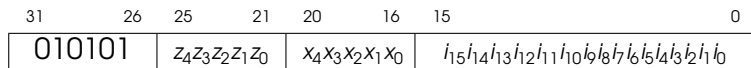
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de divisão imediata (divi)

- ▶ Tipo F

- ▶ Com sinal

- ▶ $R[z] = R[x] \div i_{15} : i$



- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $ZD \leftarrow (i = 0)$

- ▶ $OV \leftarrow 0$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de resto imediato (remi)

- ▶ Tipo F

- ▶ Com sinal

- ▶ $R[z] = R[x] \bmod i_{15} : i$

31	26	25	21	20	16	15	0
010110	$z_4 z_3 z_2 z_1 z_0$	$x_4 x_3 x_2 x_1 x_0$	$i_{15} i_{14} i_{13} i_{12} i_{11} i_{10} i_9 i_8 i_7 i_6 i_5 i_4 i_3 i_2 i_1 i_0$				

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (R[z] = 0)$

- ▶ $ZD \leftarrow (i = 0)$

- ▶ $OV \leftarrow 0$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de comparação imediata (cmpi)

- ▶ Tipo F

- ▶ $CMPI = R[x] - i_{15:0}$

31	26	25	21	20	16	15	0
010111	—	$x_4x_3x_2x_1x_0$	$i_{15}i_{14}i_{13}i_{12}i_{11}i_{10}i_9i_8i_7i_6i_5i_4i_3i_2i_1i_0$				

- ▶ Campos afetados

- ▶ $ZN \leftarrow (CMPI = 0)$

- ▶ $SN \leftarrow (CMPI_{31} = 1)$

- ▶ $OV \leftarrow (R[x]_{31} \neq i_{15}) \wedge (CMPI_{31} \neq R[x]_{31})$

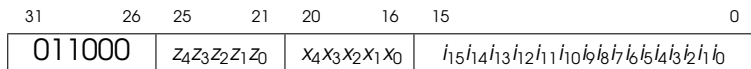
- ▶ $CY \leftarrow (CMPI_{32} = 1)$

Linguagem de máquina

- ▶ Operações de leitura/escrita da memória
 - ▶ 8 bits (l8, s8)
 - ▶ 16 bits (l16, s16)
 - ▶ 32 bits (l32, s32)

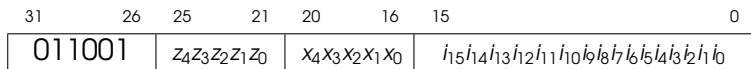
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de leitura de 8 bits da memória (l8)
 - ▶ Tipo F
 - ▶ $R[z] = MEM \left[R[x] + i_{15} : i \right]$



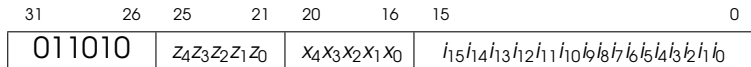
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de leitura de 16 bits da memória (I16)
 - ▶ Tipo F
 - ▶ $R[z] = MEM \left[\left(R[x] + i_{15}^{16} : i \right) \ll 1 \right]$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de leitura de 32 bits da memória (l32)
 - ▶ Tipo F
 - ▶ $R[z] = MEM \left[\left(R[x] + i_{15:16} \right) \ll 2 \right]$

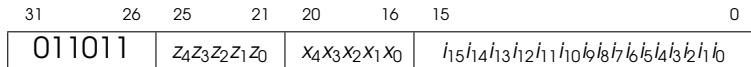


Linguagem de máquina

- ▶ Operação de escrita de 8 bits na memória (s8)

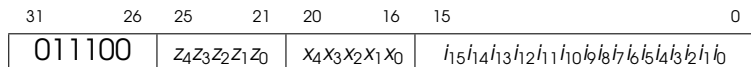
- ▶ Tipo F

- ▶ $MEM \left[R[x] + i_{15}^{16} : i \right] = R[z]$



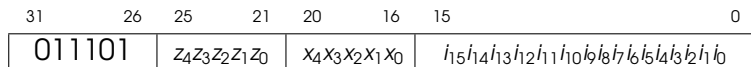
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de escrita de 16 bits na memória (s16)
 - ▶ Tipo F
 - ▶ $MEM \left[\left(R[X] + i_{15:16} \right) \ll 1 \right] = R[Z]$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de escrita de 32 bits na memória (s32)
 - ▶ Tipo F
 - ▶ $MEM \left[\left(R[X] + i_{15:16} \right) \ll 2 \right] = R[Z]$



Linguagem de máquina

- ▶ Operações de controle de fluxo
 - ▶ Desvio condicional (bae, bat, bbe, bbt, beq, bge, bgt, biv, ble, blt, bne, bni, bnz, bzd)
 - ▶ Desvio incondicional (bun)
 - ▶ Interrupção (int)

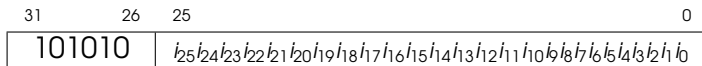
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bae)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição AE (sem sinal)

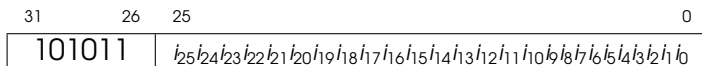
- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A \geq B \rightarrow A - B \geq 0 \equiv AE \leftarrow CY = 0$$

Linguagem de máquina

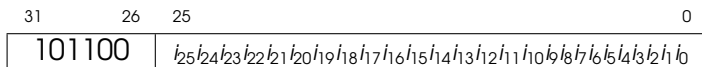
- ▶ Operação de desvio condicional (bat)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição AT (sem sinal)
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A > B \rightarrow A - B > 0 \equiv AT \leftarrow (ZN = 0 \wedge CY = 0)$$

Linguagem de máquina

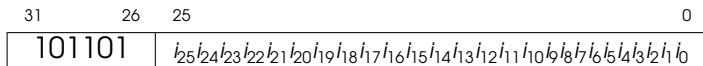
- ▶ Operação de desvio condicional (bbe)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição *BE* (sem sinal)
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A \leq B \rightarrow A - B \leq 0 \equiv BE \quad \leftarrow \quad (ZN = 1 \vee CY = 1)$$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bbt)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição *BT* (sem sinal)
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A < B \rightarrow A - B < 0 \equiv BT \leftarrow CY = 1$$

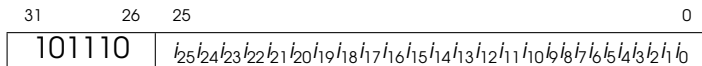
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (beq)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição EQ

- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A = B \rightarrow A - B = 0 \equiv EQ \leftarrow ZN = 1$$

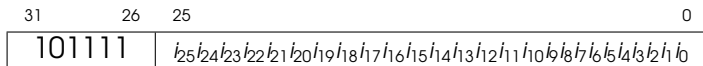
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bge)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição *GE* (com sinal)

- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A \geq B \rightarrow A - B \geq 0 \equiv GE \quad \leftarrow \quad SN = OV$$

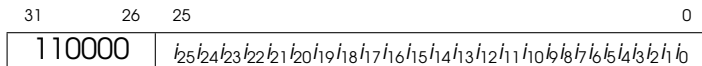
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bgt)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição *GT* (com sinal)

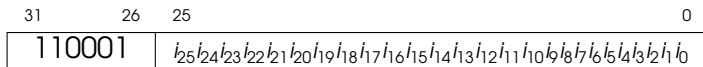
- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A > B \rightarrow A - B > 0 \equiv GT \leftarrow (ZN = 0 \wedge SN = OV)$$

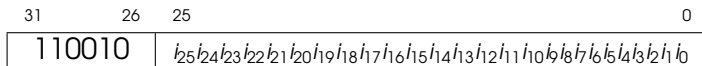
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (biv)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição IV
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (ble)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição *LE* (com sinal)
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A \leq B \rightarrow A - B \leq 0 \equiv LE \quad \leftarrow \quad (ZN = 1 \vee SN \neq OV)$$

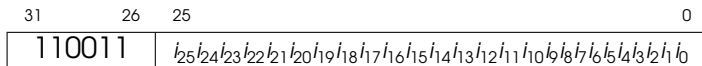
Linguagem de máquina

► Operação de desvio condicional (blt)

► Tipo S

► Condição LT (com sinal)

► $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A < B \rightarrow A - B < 0 \equiv LT \quad \leftarrow \quad SN \neq OV$$

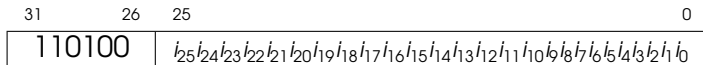
Linguagem de máquina

► Operação de desvio condicional (bne)

► Tipo S

► Condição *NE*

► $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$A \neq B \rightarrow A - B \neq 0 \equiv NE \quad \leftarrow \quad ZN = 0$$

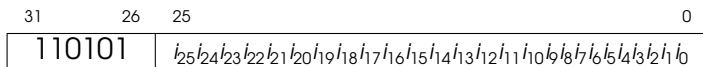
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bni)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição *NI*

- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



$$NI \leftarrow IV = 0$$

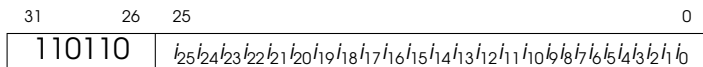
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bnz)

- ▶ Tipo S

- ▶ Condição *NZ*

- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



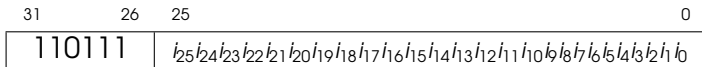
$$NZ \leftarrow ZD = 0$$

Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio incondicional (bun)

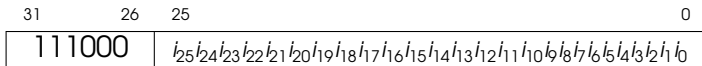
- ▶ Tipo S

- ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



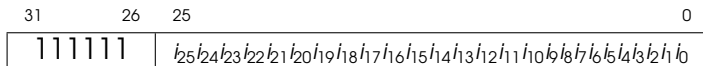
Linguagem de máquina

- ▶ Operação de desvio condicional (bzd)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Condição ZD
 - ▶ $PC = PC + 4 + \left[\left(i_{25}^6 : i \right) \ll 2 \right]$



Linguagem de máquina

- ▶ Operação de interrupção (int)
 - ▶ Tipo S
 - ▶ Se $i = 0$, a execução é finalizada



Exemplo

- ▶ Considerando o código fonte abaixo, faça sua tradução para código de montagem e depois o converta para linguagem de máquina
 - ▶ Execute passo a passo o programa
 - ▶ Verifique os resultados obtidos

```
1 // Inteiros com tamanho fixo
2 #include <stdint.h>
3 // Função principal
4 int main() {
5     // Variáveis em memória
6     uint32_t i, n = 5, r = 1;
7     // Controle iterativo
8     for(i = 2; i <= n; i++) {
9         // Multiplicação
10        r = r * i;
11    }
12    // Retorno sem erros
13    return 0;
14 }
```


Exercício

- ▶ Considerando a arquitetura Poxim, construa um simulador que realize o carregamento da programação (código binário representado em formato hexadecimal) e execute passo a passo o seu comportamento (fluxo de execução em arquivo)

Programação

```
0xDC000007
0x00000000
:
:
0x00000000
0x00200007
0x00400003
0x10611404
0xFC000000
```

Simulador

Resultado

```
[START OF SIMULATION]
0x00000000:  bun 7 ...
0x00000020:  mov r1,7 ...
0x00000024:  mov r2,3 ...
0x00000028:  div r4,r3,r1,r2 ...
0x0000002C:  int 0 ...
[END OF SIMULATION]
```

- ▶ Implemente o simulador utilizando as linguagens de programação suportadas, obtendo os argumentos de entrada e de saída por linha de comando