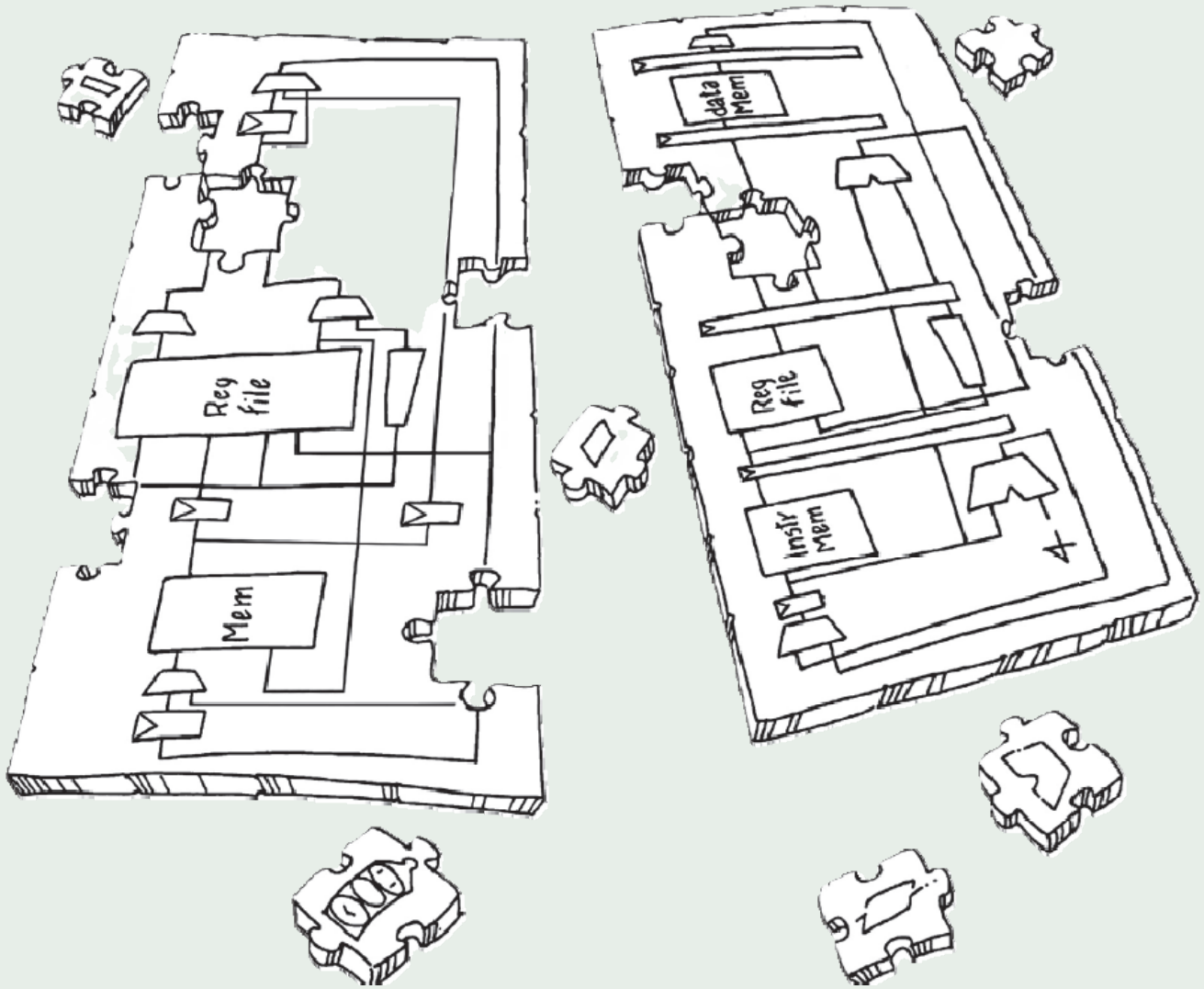


Fonte: Adaptado de Digital Design and Computer Architecture RISC-V Edition Sarah L. Harris David Harris

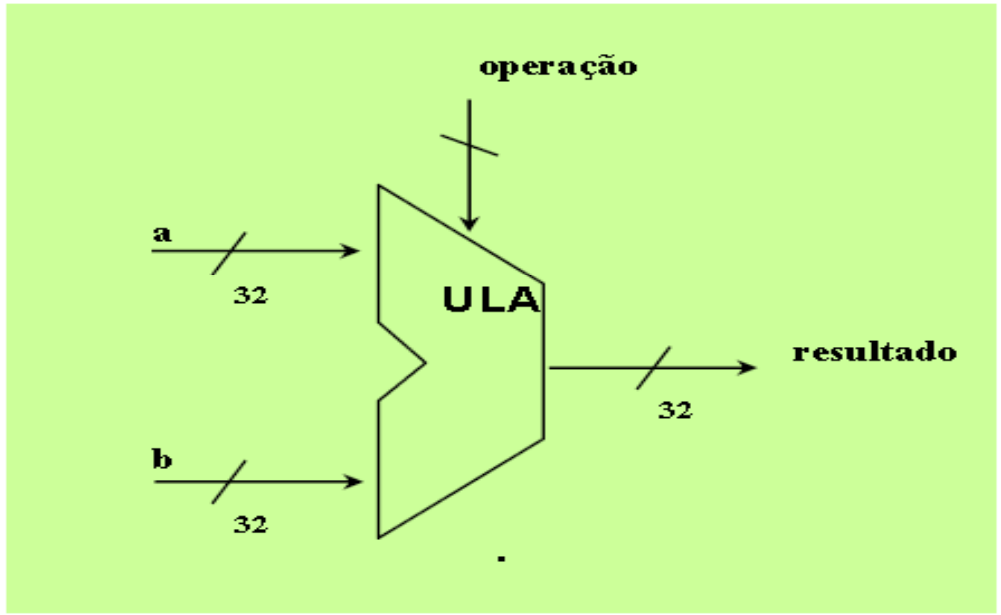
Arquitetura e Organização de Computadores 1

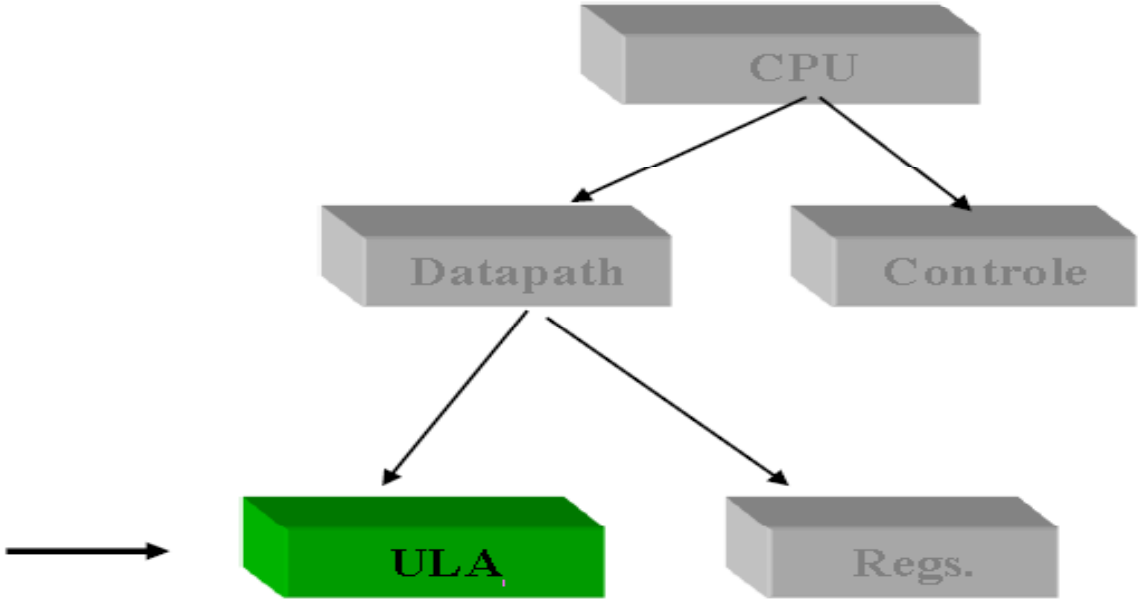
Prof. Luciano de Oliveira Neris
luciano@dc.ufscar.br

ULA / Circuitos Somadores

Unidade Lógica e Aritmética (ULA)

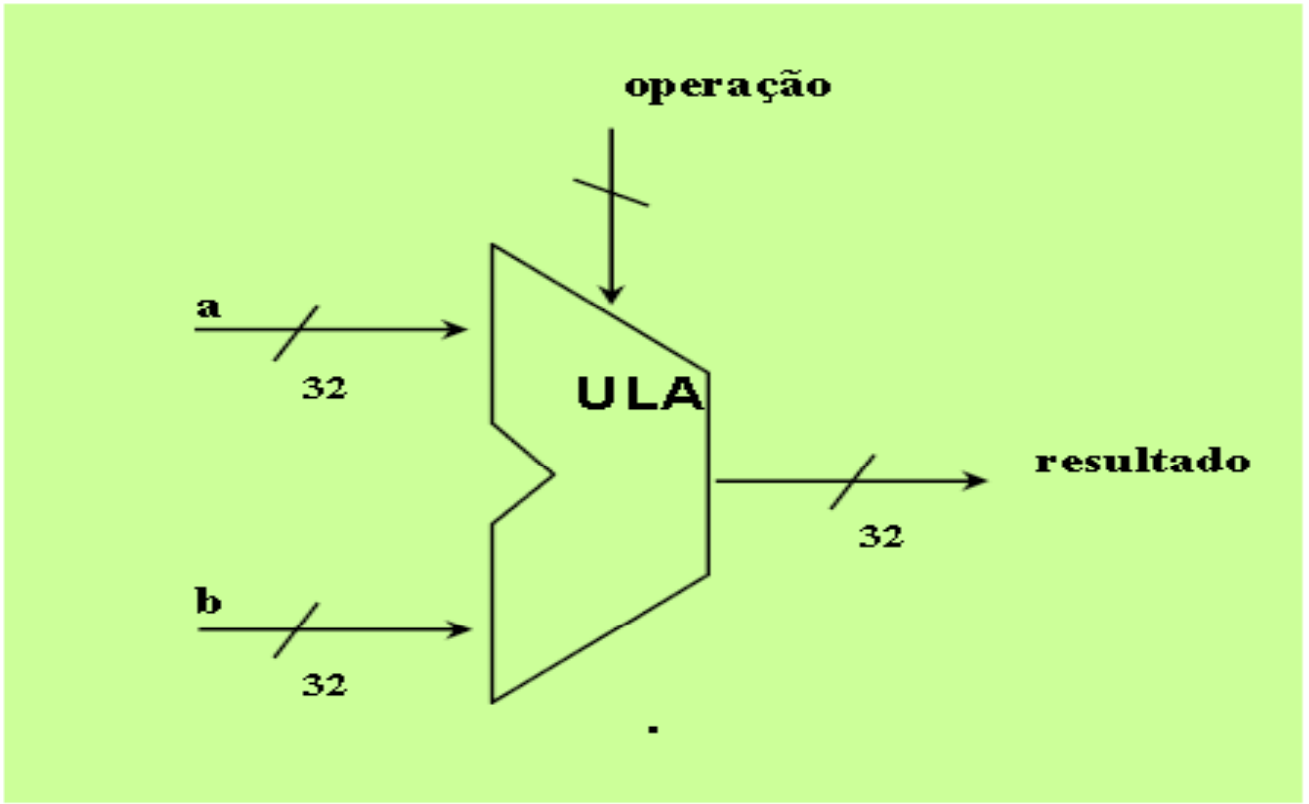
- **ULA: "Motor" do computador** -> dispositivo que executa operações aritméticas (add, sub, etc) e lógicas (AND, OR, etc).





Unidade Lógica e Aritmética (ULA)

- Como projetar e implementar uma ULA ?



Números

Números

- Bits são apenas bits (sem nenhum significado inerente)
  - convenções definem a relação entre bits e números
- Números Binários (base 2)
  - 0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 1000 1001...
  - decimal: $0...2^{n-1}$
- Naturalmente resultam em algumas sofisticações:
  - números são finitos (overflow)
  - números fracionários e reais
  - números negativos
- Como representamos números negativos?

  ... ou seja, que padrões de bits representam os números?

Números

- Representação em Complemento de 2 (C2):
  - Desenvolvida para tornar os circuitos aritméticos mais simples (e consequentemente mais rápidos)
  - Se o número for positivo:
    - Representação binária normal (bit mais significativo= 0)
  - Se o número for negativo:
    - Comece com o número binário positivo
    - Inverta todos os bits
    - Adicione 1 ao resultado
    - * Número Negativo em C2: primeiro bit = 1

Números

- Números com Sinal x Números sem Sinal
  - unsigned 1-byte: 0:255
  - signed 1-byte: -128:+127
- Inteiros são armazenados utilizando-se a notação complemento de 2.
    - Ex: Como armazenar -23 utilizando 2-bytes ?
      - 23 em binárito usando 2 bytes é 0000 0000 0001 0111
      - Calculando o complemento: 1111 1111 1110 1000
      - Somar 1: 1111 1111 1110 1001
      - -23 representado como complemento de 2 em 2 bytes= FFE9
- **Vantagem** do C-2: O mesmo hardware para efetuar adição trabalha da mesma forma, independente de se interpretar o número como sendo com ou sem sinal.
- A ISA normalmente contém instruções distintas para se trabalhar com números com ou sem sinal.

Operações em Complemento de 2

- Números Binários Negativos - Complemento de 2

(a) 01010110

-2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
0	1	0	1	0	1	1	0

$$64 + 16 + 4 + 2 = +\mathbf{86}$$

(b) 10101010

-2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
1	0	1	0	1	0	1	0

$$-128 + 32 + 8 + 2 = \mathbf{-86}$$

Operações em Complemento de 2

- Convertendo um número de n bits em números com mais de n bits:
  - Um dado imediato de 16 bits convertido para 32 bits
    - Copiar o bit mais significativo (o bit de sinal) para outros bits

0010 -> 0000 0010
1010 -> 1111 1010

  - Operação conhecida como “extensão de sinal (sign extension) “

Adição & Subtração

- Como no ensino fundamental: vai-um / vem / um ()

```
   0111          0111          0110
 + 0110        - 0110        - 0101
```

- Operações em complemento de 2
  - subtração usando soma de números negativos

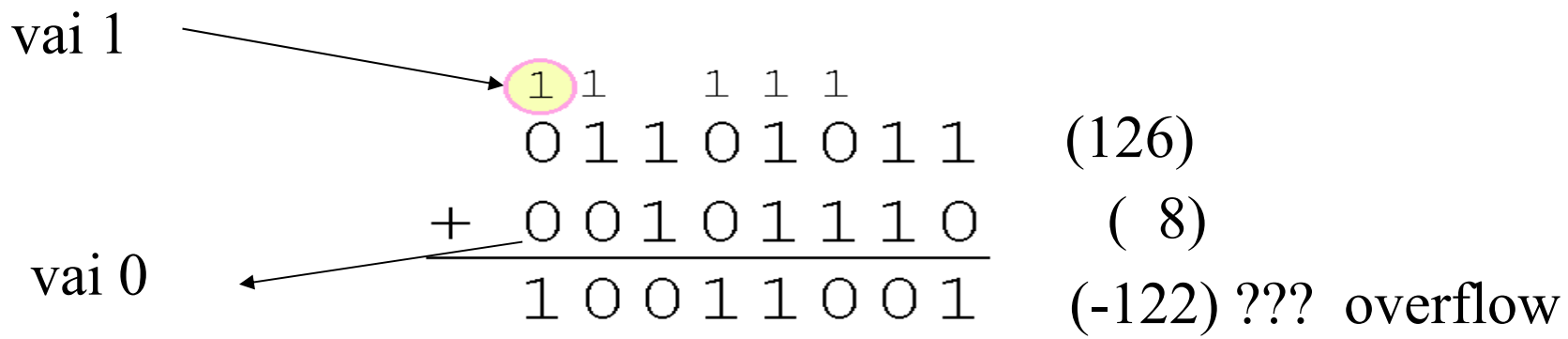
```
   0111
 + 1010
```

- Overflow (resultado muito grande para ser armazenado em x bits):
  - P.ex., somando dois números de n-bits não resulta em n-bits

```
   0111
 + 0001
  10000
```

Detectando Overflow

- Teste Eficiente p/ detectar o overflow: Se o “vai-um”que chega no bit de sinal for igual ao “vai-um” que sai do bit de sinal, não ocorreu overflow. Se forem diferentes, overflow!



Efeitos do Overflow

- Dispara uma exceção (interrupt)
  - A instrução salta para endereço predefinido para a rotina de exceção
  - O endereço da instrução interrompida é salvo para possível retorno

- Nem sempre se requer a detecção do overflow

Números sem sinal são normalmente usados para calcular endereços de acesso à memória, e neste caso o overflow não é considerado um problema, pois os números em questão são limitados pelo tamanho da memória endereçável.

Obs: Ling. C não especifica a detecção de overflow.

Números

- **Representação hexadecimal:** *Forma de representação numérica utilizando 16 dígitos:*
  - **0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F**
- *Conveniente para a representação de grupos de bits (bit-patterns).*
  - ***4 bits = 1 dígito hexadecimal***
- *Computadores são normalmente organizados utilizando uma quantidade de bits que é um múltiplo de 4 → Notação hexadecimal é conveniente para representar endereços de memória, instruções, etc.*

Números

Bit pattern	Hexadecimal representation
0000	0
0001	1
0010	2
0011	3
0100	4
0101	5
0110	6
0111	7
1000	8
1001	9
1010	A
1011	B
1100	C
1101	D
1110	E
1111	F

10
11
12
13
14
15

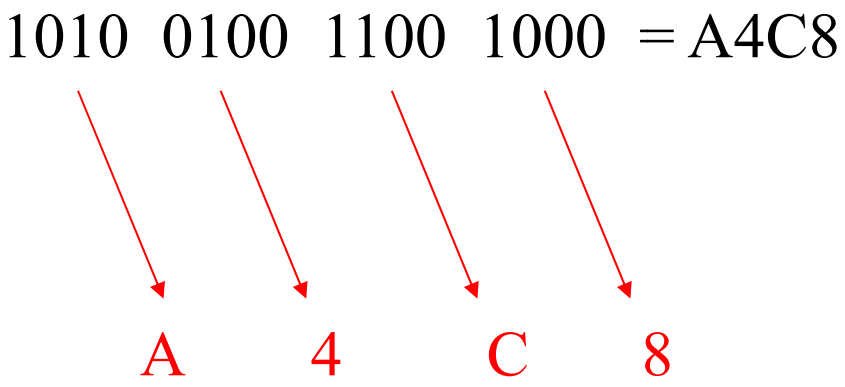
Números

- Exemplo: Calcule a representação hexadecimal da seguinte sequencia de bits:

1010010011001000

Números

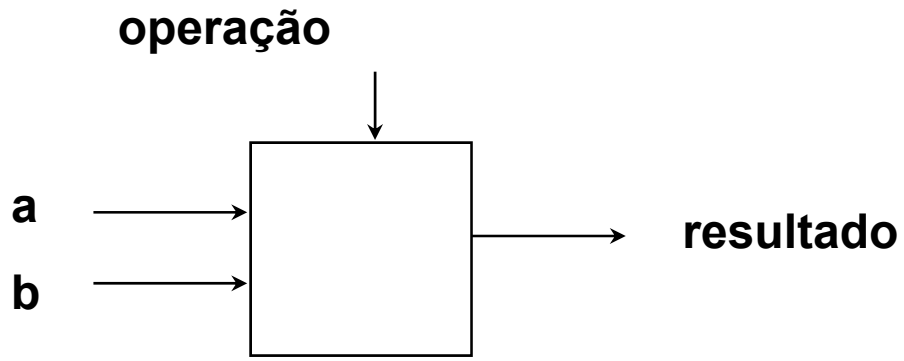
- Exemplo: Calcule a representação hexadecimal da seguinte sequencia de bits:



ULA

ULA de 1 bit

- Considere uma ULA para suportar apenas as instruções **AND** e **OR**

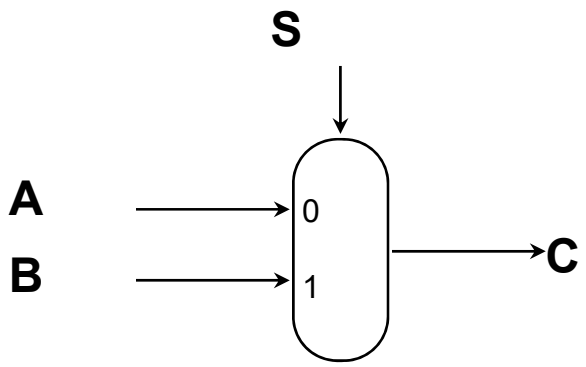


op	a	b	res

- Possível implementação: ?

Construindo uma ULA de 1 bit

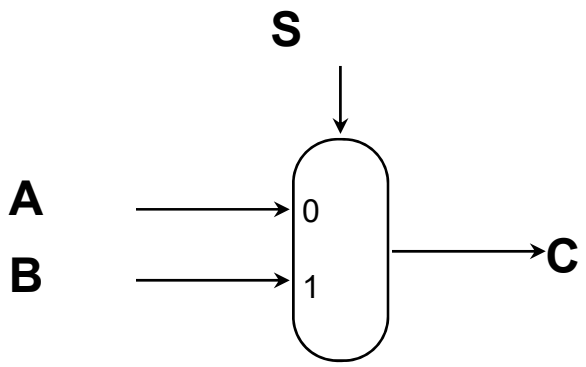
- Multiplexador (MUX): Seleciona uma das entradas para a saída, baseado numa entrada de controle



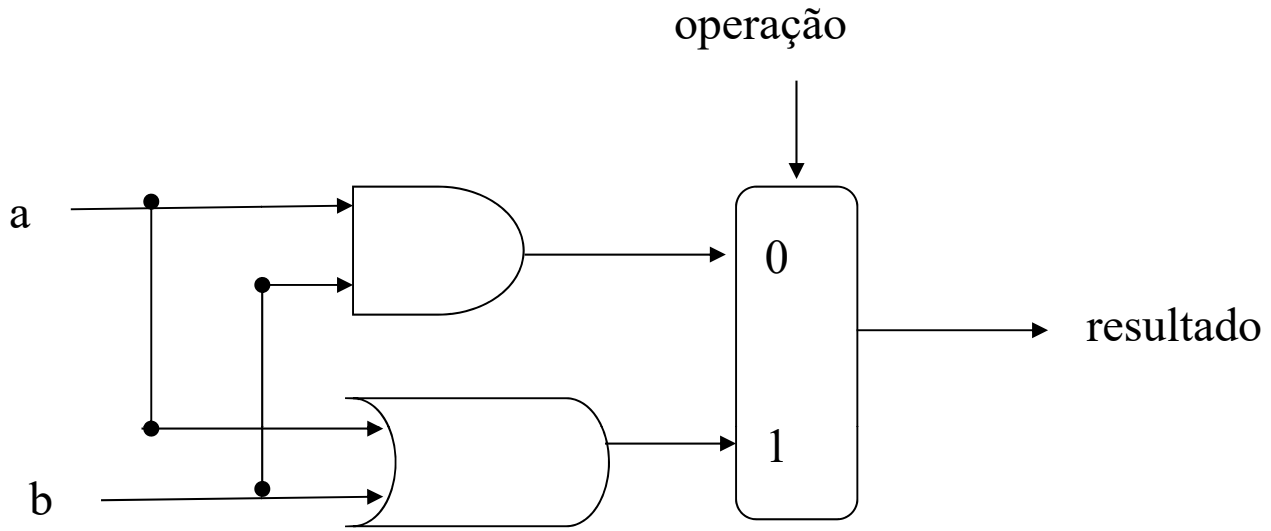
- Nossa ULA pode ser construída usando um MUX

Construindo uma ULA de 1 bit

- Considere uma ULA para suportar apenas as instruções **AND** e **OR**

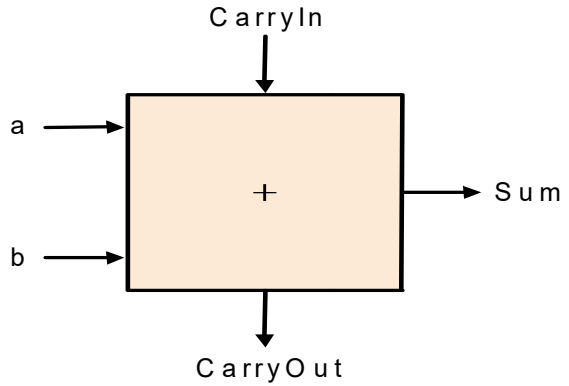


- Possível implementação:



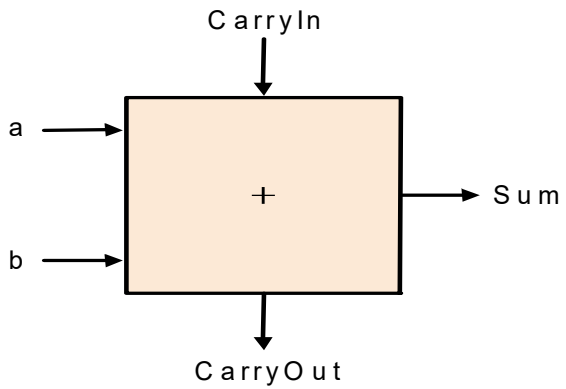
Construindo uma ULA de 1 bit

- Incluir recursos para executar a operação de Adição na nossa ULA:
- Considere um circuito somador de 1-bit:



Construindo uma ULA de 1 bit

- Incluir recursos para executar a operação de Adição na nossa ULA:
- Seja a ULA de 1-bit para soma:



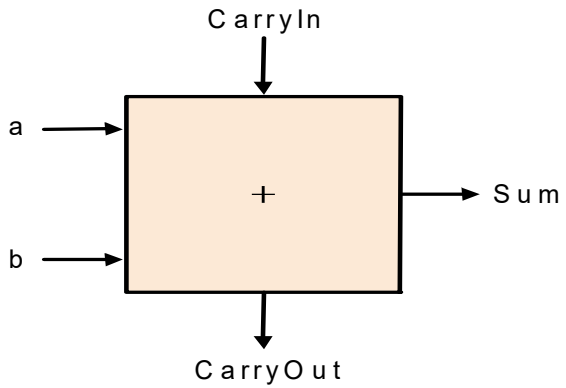
Expressões p/ CarryOut e Sum:

```
CarryOut = (a and b) or ((a xor b) and CarryIn)

Sum = (a xor b) xor CarryIn
```

Construindo uma ULA de 1 bit

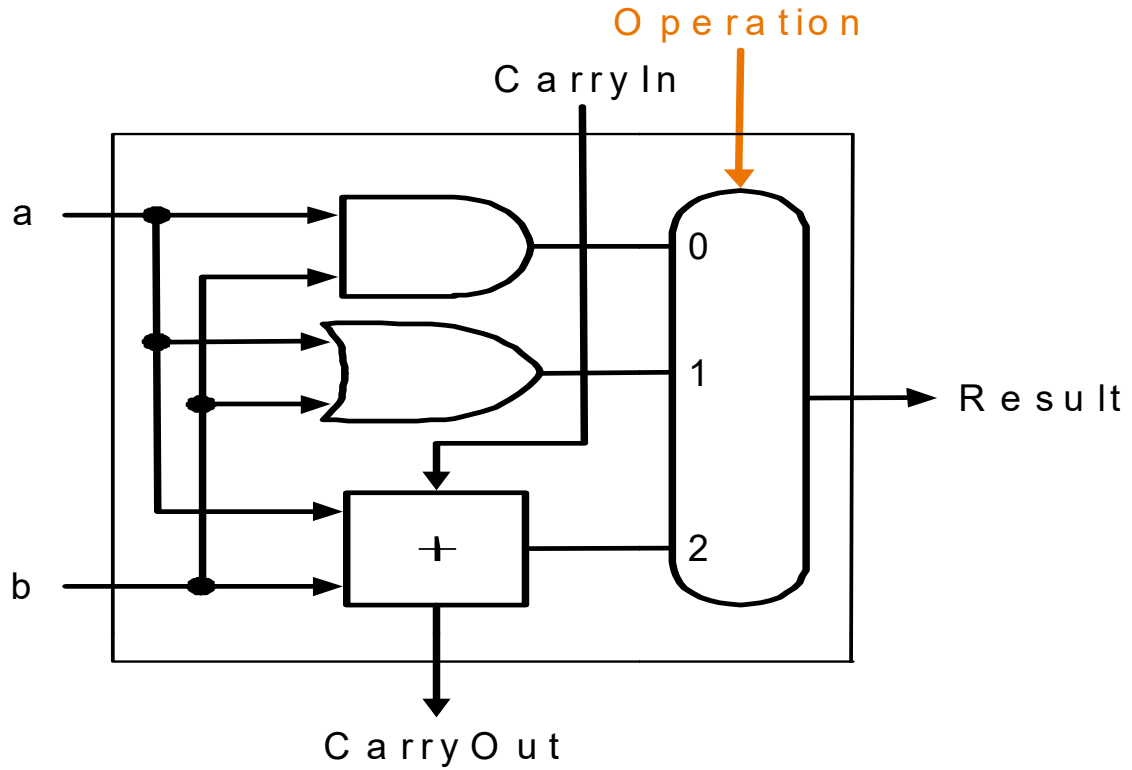
- Incluir recursos para executar a operação de Adição na nossa ULA:
- Temos o somador de 1 bit:



- Agora, podemos acoplar o somador de 1 bit à ULA p/ AND e OR anteriormente projetada:

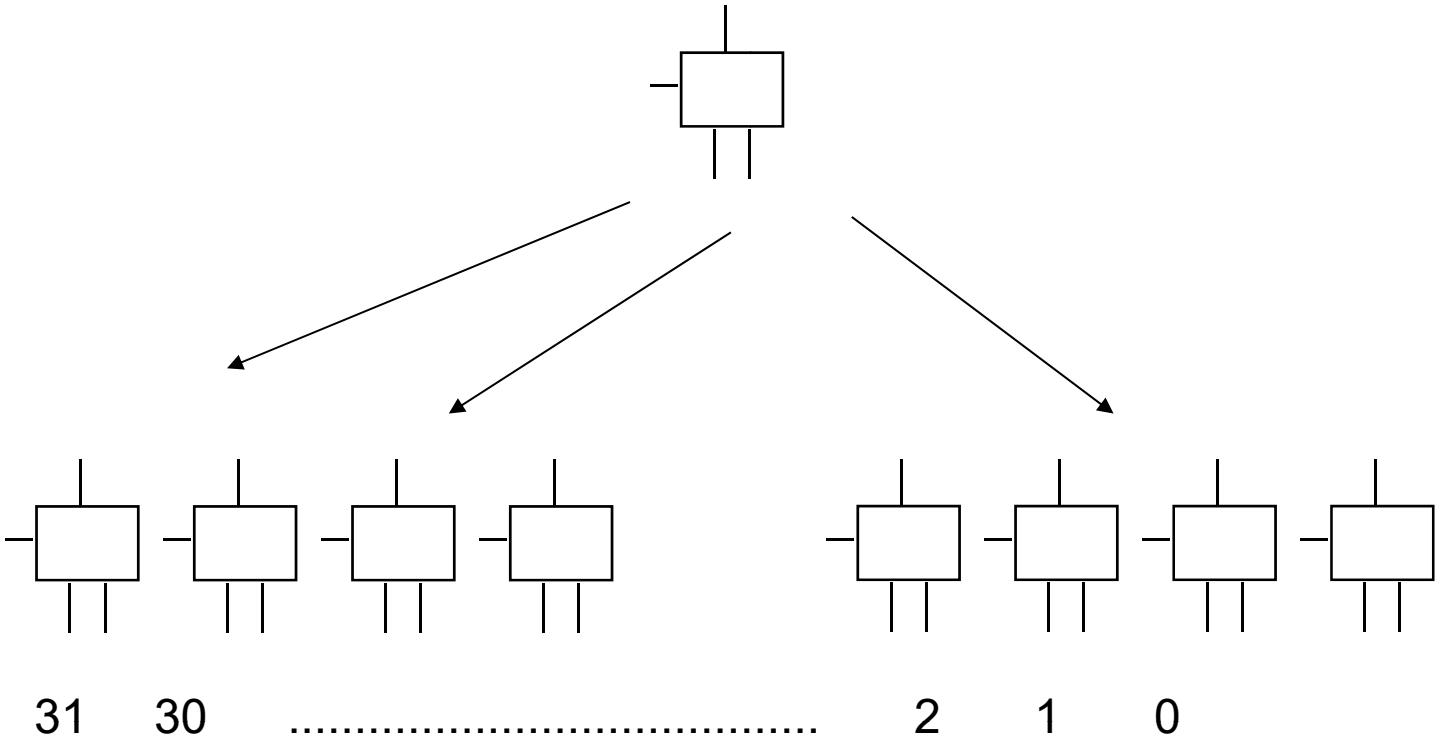
Construindo uma ULA de 1 bit

ULA para efetuar ADD, AND e OR com duas entradas de 1 bit:

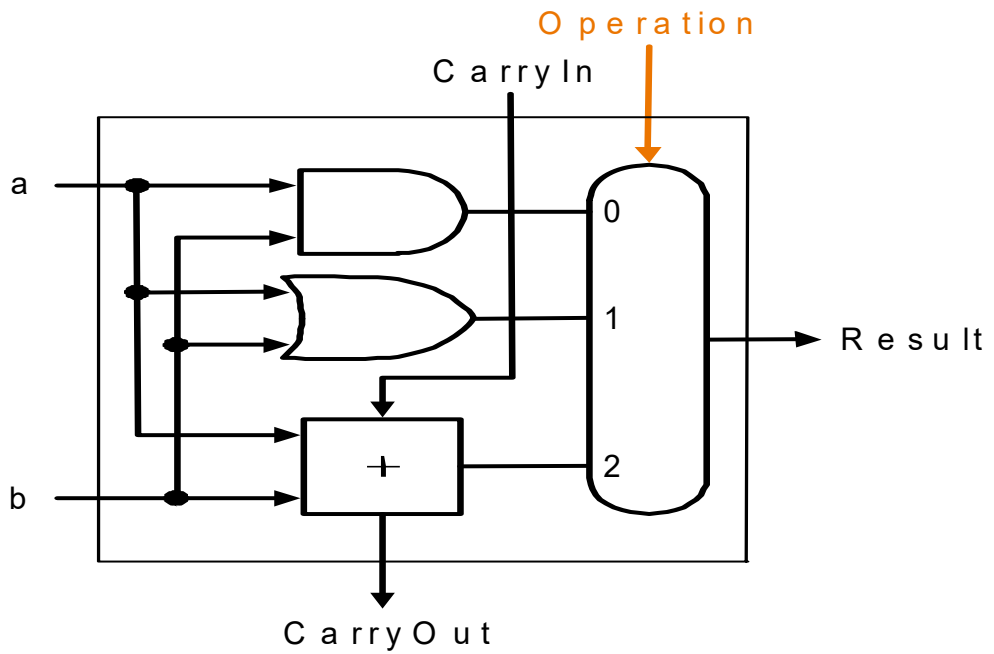


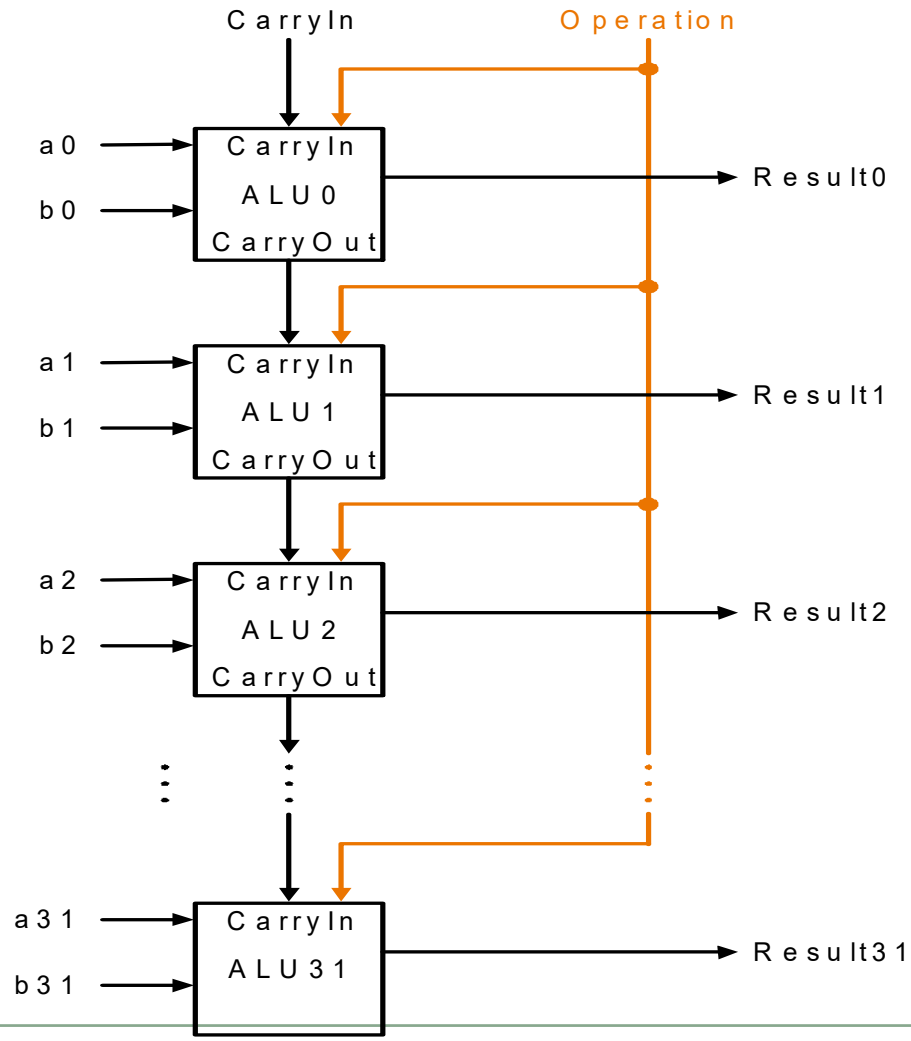
Construindo uma ULA de 32 bit

Projetar uma ULA de 1 bit, e replicá-la 32 vezes



Construindo uma ULA de 32 bit





Obs: este esquema é conhecido como somador *ripple carry* (vai-um-propagado)

Incluindo a subtração (a-b) na ULA

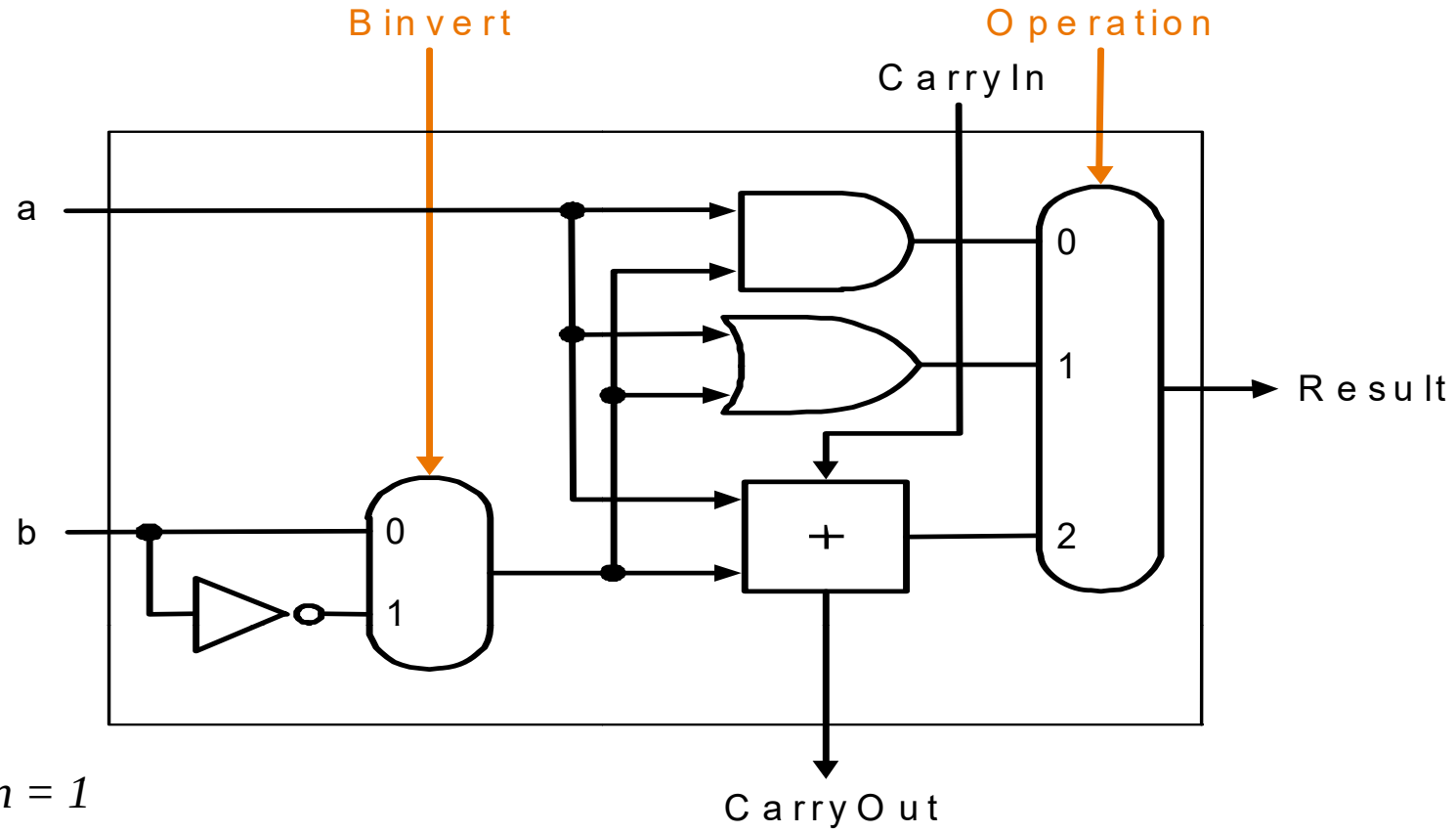
- Para subtrair (a-b) na ULA construída anteriormente, usar a técnica do complemento de 2: apenas negar b e somar.

- Como negar um dos operandos de entrada, de maneira eficiente ?

Incluindo a subtração (a-b) na ULA

- Como negar um dos operandos de entrada, de maneira eficiente ?

Solução:



subtração: inverte b e faz CarryIn = 1

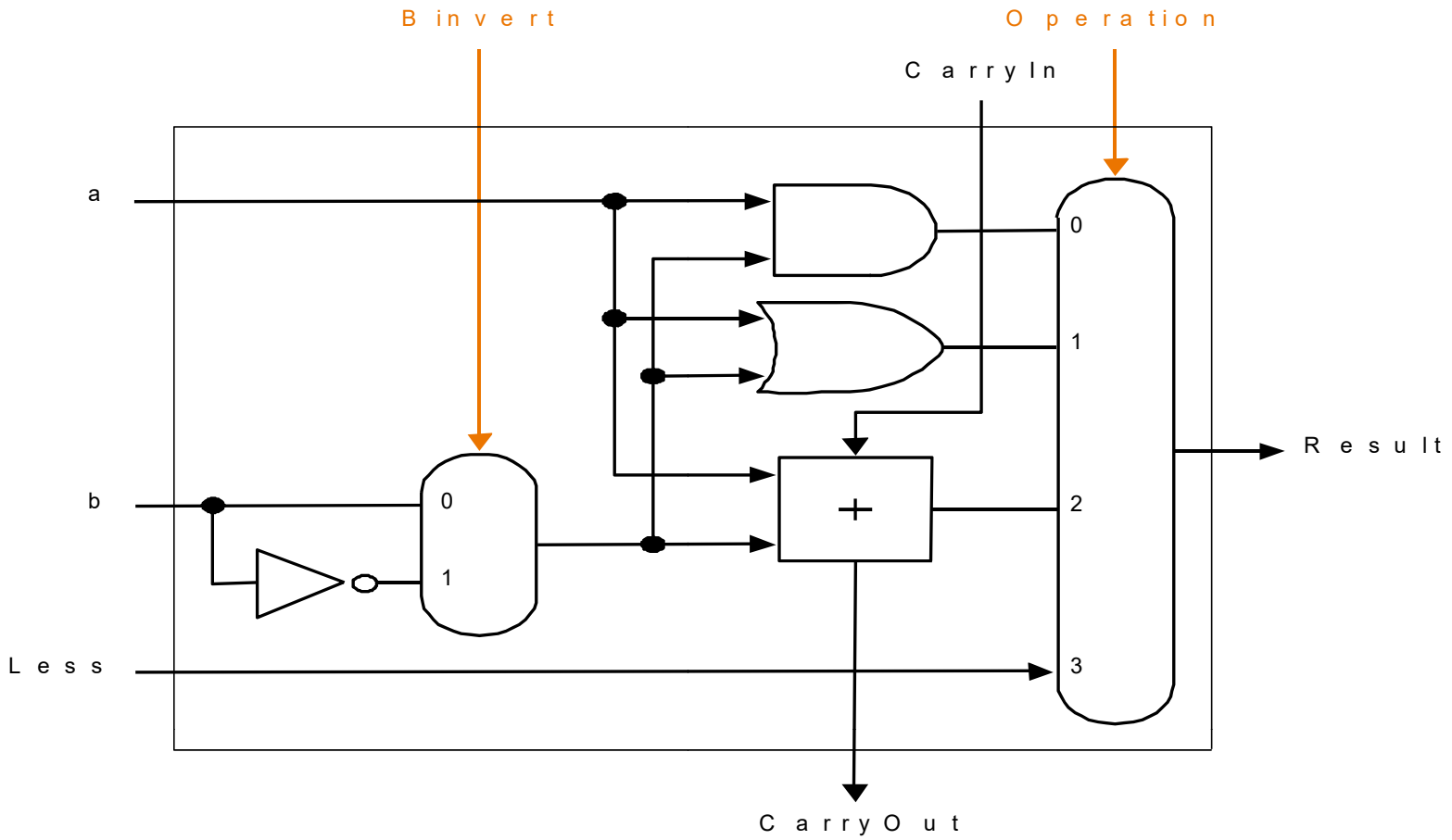
Instrução SLT

- RISC-V deve suportar a instrução set-on-less-than (SLT)
  - lembrar: SLT é uma instrução aritmética, do ponto de vista do hardware
  - produz um 1 se rs1 < rs2, e 0 caso contrário
  - implementar usando subtração:
    - Se (a - b) < 0, significa que a < b
  - Como ?

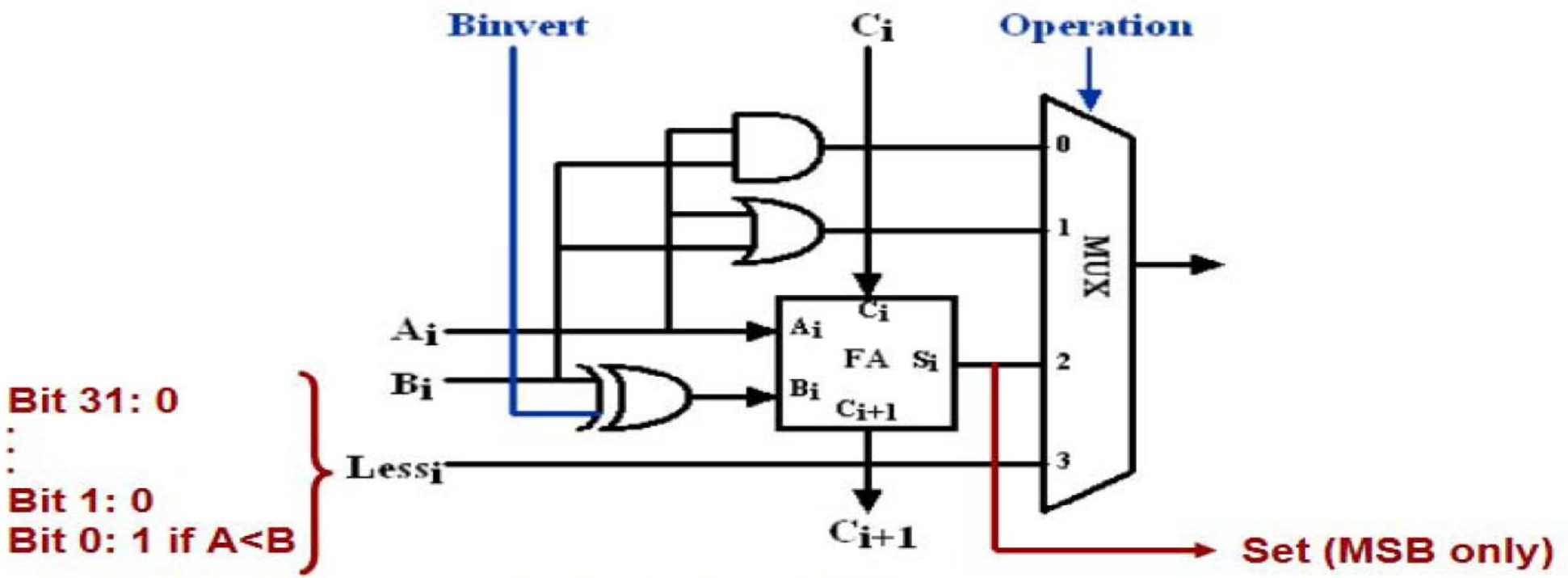
Instrução SLT

- RISC-V deve suportar a instrução set-on-less-than (SLT)
  - lembrar: SLT é uma instrução aritmética, do ponto de vista do hardware
  - produz um 1 se rs1 < rs2, e 0 caso contrário
  - implementar usando subtração:
    - Se (a - b) < 0, significa que a < b
  - Como ?
  - rs1 < rs2 significa que o resultado é negativo, logo o bit de sinal = 1
  - set inicializa o registrador que armazena o resultado c/ ...0000001
  - **Logo, basta conectar o bit de sinal do resultado da subtração ao último bit do registrador de destino.**
    - Complicação: casos em que ocorre overflow.

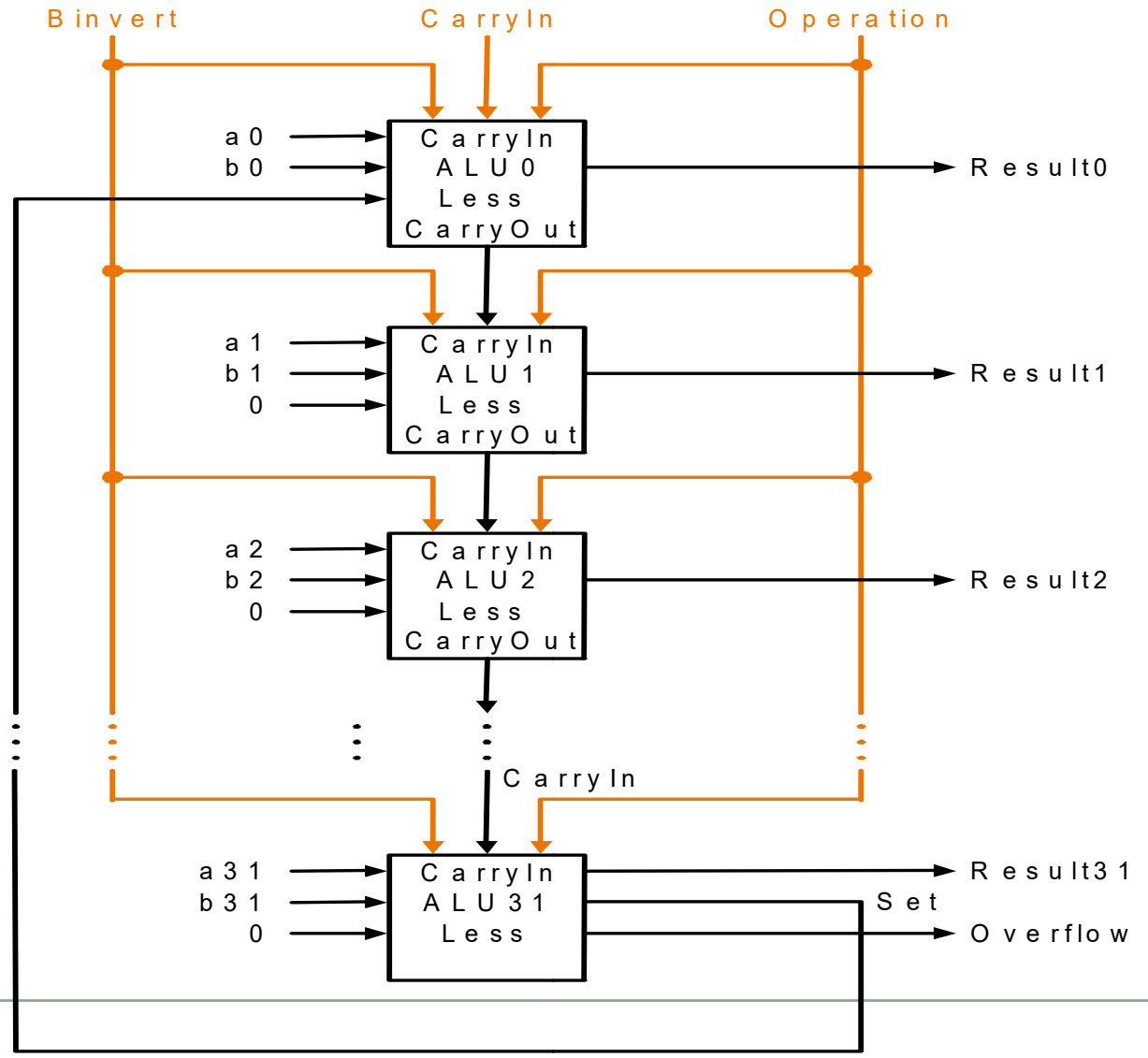
Instrução SLT



Instrução SLT



Instrução SLT para 32 bits



Instrução BEQ

- RISC –V deve suportar o teste para implementar a instrução de desvio “beq”
  - Ex: beq $t5, $t6, $t7 - Se $t6 = $t7, desviar para endereço $t5

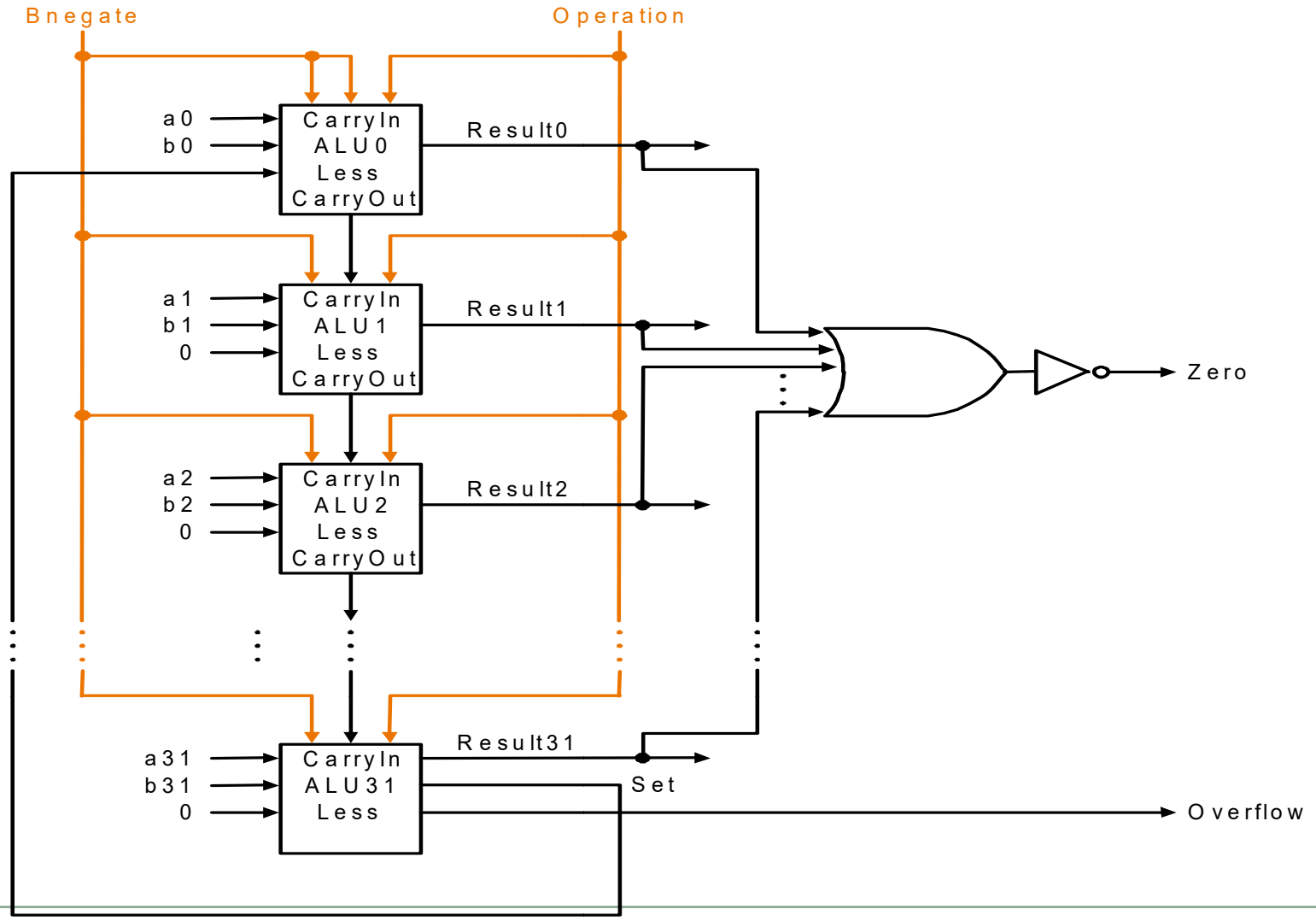
- Implementar usando subtração: (a - b) = 0 implica a = b
  - Como ?

Instrução BEQ

- RISC-V deve suportar o teste para igualdade (beq t5, t6, t7)
- Implementar usando subtração: (a - b) = 0 implica a = b
- Como ?

- Adicionar hardware para testar se o resultado da subtração é igual a zero.
- Efetuar uma operação OR entre todos os bits da saída.
- Se resultado for igual a zero, significa que a=b → Enviar o sinal 1 (beq=true), simplesmente invertendo a saída do OR.

Instrução BEQ



Conclusão

- Podemos construir uma ULA para suportar o conjunto de instruções RISC-V:
  - Usando multiplexador para selecionar a saída desejada
  - Realizando uma subtração usando o complemento de 2
  - Replicando uma ULA de 1-bit para produzir uma ULA de 32-bits

- Pontos importantes sobre o hardware
  - Todas as portas estão sempre trabalhando
  - A velocidade de uma porta é afetada pelo número de entradas da porta
  - A velocidade de um circuito é afetado pelo número de portas em série (no caminho crítico do nível mais profundo da lógica)
  - Mudanças inteligentes na organização podem melhorar o desempenho (similar a usar algoritmos melhores em software)