



DCC
DEPARTAMENTO DE CIENCIA
DE LA COMPUTACIÓN

IIC2343

Arquitectura de Computadores

Clase 13 - Resumen del Curso

Profesor: Germán Leandro Contreras Sagredo

Propósito del material

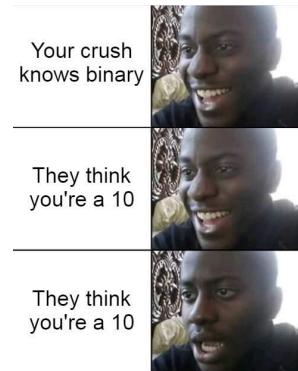
- El objetivo de este material es que puedan realizar un estudio **rápido** de los contenidos más relevantes del curso.
- La idea es que con este puedan identificar **qué contenidos les falta profundizar**, de ser el caso, se espera que no solo se queden con lo que se encuentra aquí, sino que además acudan a las clases y apuntes correspondientes.
- También se espera que sirva como guía rápida mientras estén desarrollando ejercicios de los compilados.



Representaciones numéricas

- Contenido que encuentran en:

- **Clase 1 - Representaciones Numéricas I**
- **Clase 6 - Representaciones Numéricas II**
- **01 - Representaciones Numéricas Parte 1 - Números Enteros (Apuntes)**
- **02 - Representaciones Numéricas Parte 2 - Números Racionales (Apuntes)**



Representaciones numéricas - Números enteros

- En este curso, nos enfocamos en la **representación posicional binaria** por su utilidad en circuitos digitales y, posteriormente, componentes del computador básico.
- **Fórmula general de transformación de bases**

$$\sum_{k=0}^{n-1} s_k \times b^k$$

s = Símbolo (dígito).

n = Cantidad de dígitos en la secuencia.

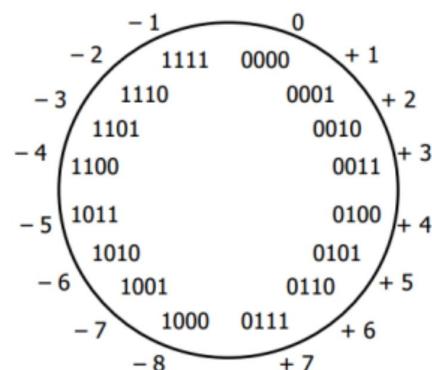
b = Base numérica (o número de dígitos).

k = Posición del dígito en la secuencia,
siendo 0 la posición del extremo derecho.

Representaciones numéricas - Números enteros

- **Complemento de 2:** Representación utilizada para números **enteros**. Se obtiene el complemento de 1 (complemento de cada dígito del número) y se suma una unidad al final. Esto asegura que $x + C_2(x) = 0$ (el bit de *carry* restante se descarta).
- **Contras del complemento de 2**
 - Representación **desbalanceada** (un número negativo adicional).
 - **Overflow:** Operación cuyo resultado no es representable con la cantidad de bits disponible resultan en un valor erróneo.

| | |
|------------|------|
| N | 0101 |
| $-N$ | 1011 |
| $N + (-N)$ | 0000 |



Representaciones numéricicas - Números enteros

■ Conversión entre base binaria y hexadecimal

- **Hexadecimal a binario:** Cada dígito hexadecimal se representa en su valor binario con cuatro dígitos. Se concatenan los resultados para el valor final.

$$0x9F2 = \left\{ \begin{array}{l} 0x9 = 1001b \\ 0xF = 1111b \\ 0x2 = 0010b \end{array} \right\} \rightarrow 0x9F2 = 100111110010b$$

- **Binario a hexadecimal:** Se agrupan cuatro dígitos binarios y se representan en el valor hexadecimal. Se concatenan los resultados para el valor final.

$$100111110010b = (1001)(1111)(0010) = (0x9)(0xF)(0x2) = 0x9F2$$

* Se puede hacer lo mismo entre la base binaria y la base octal, haciendo las conversiones con 3 dígitos en vez de 4.

Representaciones numéricas - Números racionales

- Se pueden representar en base binaria, pero **números finitos en base decimal pueden ser infinitos en base binaria**. Esto hace que la cantidad de bits para representar estos números sea significativa para reducir el error.
- **Representaciones de números racionales en base binaria**
 - **Punto fijo:** Dados N bits, estos se dividen de forma **fija** para representar signo, parte entera y parte decimal.
Ej: $N = 8$ bits = 1 bit signo (s) + 3 bits parte entera (t) + 4 bits fracción (f)
 $10,110_b = 0_s 010_t 0110_f$ $-1,0011_b = 1_s 001_t 0011_f$
 - **Punto flotante:** Dados N bits, los dividimos en un **significante/mantisa** y un **exponente**, ambos con signo.
Ej: $N = 8$ bits = 1 bit signo significante (ss) + 3 bits significante (s) + 1 bit signo exponente (se) + 3 bits exponente (e) $\rightarrow -0,00011_b = -1,1 * 10^{-100} = 1_{ss} 110_s 1_{se} 100_e$

Representaciones numéricas - Números racionales

- Usamos punto flotante por un **mayor rango** (en perjuicio de la precisión).
 - Representación de punto flotante más utilizada: **Estándar IEEE754**
 - **Float (Single Precision Floating Point)**
 - 1 bit de signo.
 - 8 bits de exponente **desfasado** en 127 para obviar el bit de signo.
 - 23 bits de significante/mantisa **normalizado**: Tiene precisión de 24 bits ya que **asume que todo significante parte en 1**.
 - Exponente 00000000 reservado para representar el 0 (significante con solo bits de 0) y el exponente 11111111 para +-Infinity (significante con solo bits de 0) y NaN (significante con al menos un bit igual a 1).
 - $X = (-1)^{\text{signo}} * 1.\text{significante} * 10^{(\text{exponente} - 127)b}$

Representaciones numéricas - Números racionales

- Representación de punto flotante más utilizada: **Estándar IEEE754**
 - **Double (Double Precision Floating Point)**
 - 1 bit de signo.
 - 11 bits de exponente **desfasado** en 1023 para obviar el bit de signo.
 - 52 bits de significante/mantisa **normalizado**: Tiene precisión de 53 bits ya que **asume que todo significante parte en 1**.
 - Presenta un error de precisión mucho menor a float (error de float igual a 10^{-23} ; error de double igual a 10^{-52}), pero requiere del doble de bits para ser representado.

Representaciones numéricas - Números racionales

- Ejemplo de pérdida de precisión en floats: $2^{30} + 5$

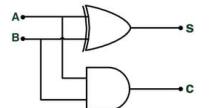
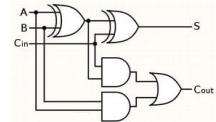
- Para sumarlos, igualamos la potencia del número menor a la del mayor:

* Estos bits se descartan porque la mantisa acepta hasta 23 bits.

Operaciones aritméticas y lógicas

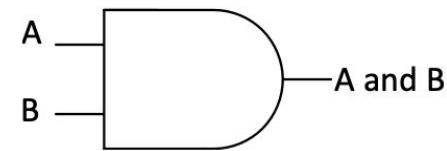
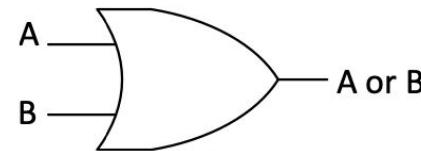
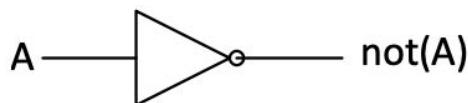
■ Contenido que encuentran en:

- **Clase 2 - Operaciones Aritméticas y Lógicas**
- **03 - Operaciones Aritméticas y Lógicas**



Operaciones aritméticas y lógicas - Compuertas lógicas

- **Compuertas lógicas:** Base de todos los componentes del computador básico: NOT, OR, AND.



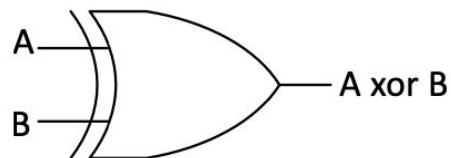
| A | $\text{not}(A)$ |
|---|-----------------|
| 1 | 0 |
| 0 | 1 |

| A | B | $A \text{ or } B$ |
|---|---|-------------------|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |

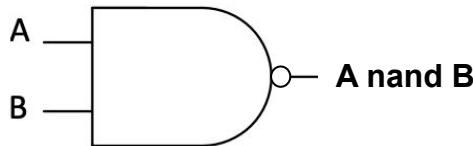
| A | B | $A \text{ and } B$ |
|---|---|--------------------|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 |

Operaciones aritméticas y lógicas - Compuertas lógicas

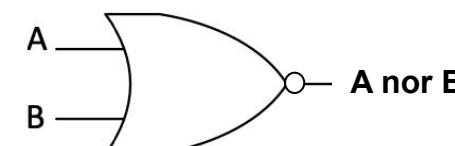
- **Compuertas lógicas:** Base de todos los componentes del computador básico: XOR, NAND, NOR, XNOR.



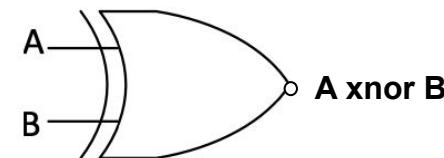
| A | B | A xor B |
|---|---|---------|
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |



| A | B | A nand B |
|---|---|----------|
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 |



| A | B | A nor B |
|---|---|---------|
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |



| A | B | A xnor B |
|---|---|----------|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |

Operaciones aritméticas y lógicas - *Minterms* y *maxterms*

- Técnicas utilizadas para obtener la expresión lógica equivalente a una tabla de verdad.
- La expresión resultante se puede traducir directamente a un circuito eléctrico al utilizar solo conectivos lógicos AND, OR, NOT.
- Los *minterms* se basan en las condiciones (señales de entrada) que derivan en un valor de verdad igual a 1; los *maxterms* en las que derivan en un valor de verdad igual a 0. Conviene usar *minterms* cuando menos de la mitad de las filas de la tabla de verdad tienen *output* igual a 1; en otro caso, conviene usar *maxterms*. Si se tiene la misma cantidad de filas con *output* igual a 0 y 1, entonces se puede usar cualquiera de los dos.

Operaciones aritméticas y lógicas - *Minterms* y *maxterms*

- ***Minterms*:** Solo se consideran las filas cuyo valor de verdad sea 1. Las condiciones de cada fila de la tabla se conectan con conectivos AND; las condiciones falsas (iguales a 0) se niegan. La expresión de cada fila se conecta con conectivos OR.

$(\text{NOT}(A) \text{ AND } B \text{ AND } \text{NOT}(C)) \text{ OR } (A \text{ AND } \text{NOT}(B) \text{ AND } C) \text{ OR } (A \text{ AND } B \text{ AND } C)$

≡

$$(\bar{A} \cdot B \cdot \bar{C}) + (A \cdot \bar{B} \cdot C) + (A \cdot B \cdot C)$$

| A | B | C | Output |
|---|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

Operaciones aritméticas y lógicas - *Minterms y maxterms*

- **Maxterms:** Solo se consideran las filas cuyo valor de verdad sea 0. Las condiciones de una fila de la tabla se conectan con conectivos OR; las condiciones verdaderas (iguales a 1) se niegan. La expresión de cada fila se conecta con conectivos AND.

$$(A \text{ OR } B \text{ OR } C) \text{ AND } (A \text{ OR } B \text{ OR } \text{NOT}(C)) \text{ AND } (A \text{ OR } \text{NOT}(B) \text{ OR } \text{NOT}(C)) \\ \text{AND } (\text{NOT}(A) \text{ OR } B \text{ OR } C) \text{ AND } (\text{NOT}(A) \text{ OR } \text{NOT}(B) \text{ OR } C)$$

 \equiv

$$(A+B+C) \cdot (A+B+\bar{C}) \cdot (A+\bar{B}+\bar{C}) \cdot (\bar{A}+B+C) \cdot (\bar{A}+\bar{B}+C)$$

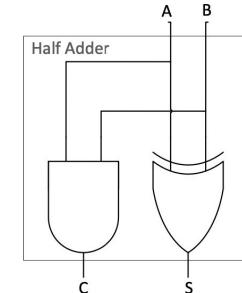
| A | B | C | Output |
|---|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

* También se puede construir usando el mismo formato de *minterms*, pero aplicando una negación al final y aplicando Ley De Morgan.

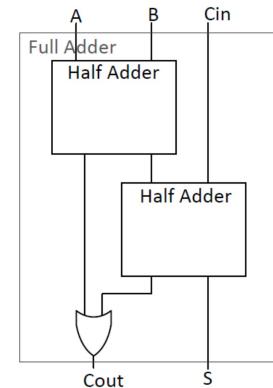
Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

- **Half-Adder:** “Medio sumador”, suma dos bits sin considerar bit de *carry*.

| A | B | S | C |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |



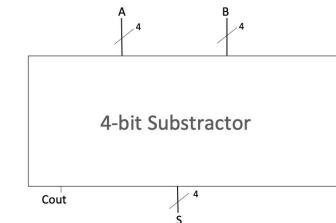
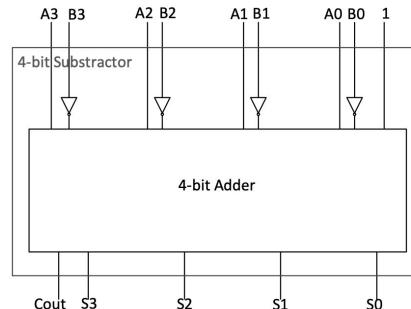
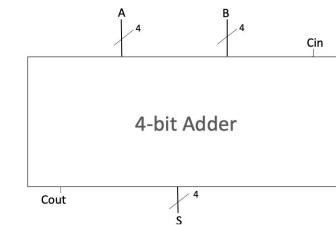
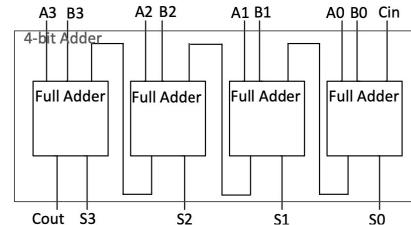
- **Full-Adder:** Sumador completo, suma dos bits y considera bit de *carry* (señal C_{in}).



* El *carry* de salida puede ser generado con la suma de A y B o con la suma entre dicho resultado y el *carry* de entrada, razón por la que C_{out} es la compuerta OR de estos dos resultados

Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

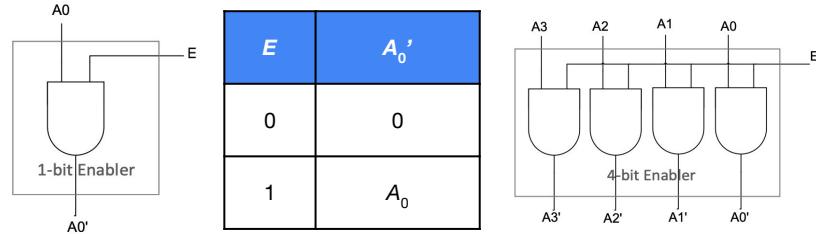
- **Sumador de 4 bits:** *Full-Adders* conectados a través de la señal C_{in} . Se extiende a más bits de la misma forma.
- **Restador de 4 bits:** Sumador de 4 bits pero con entrada *B* transformada a su complemento de dos.



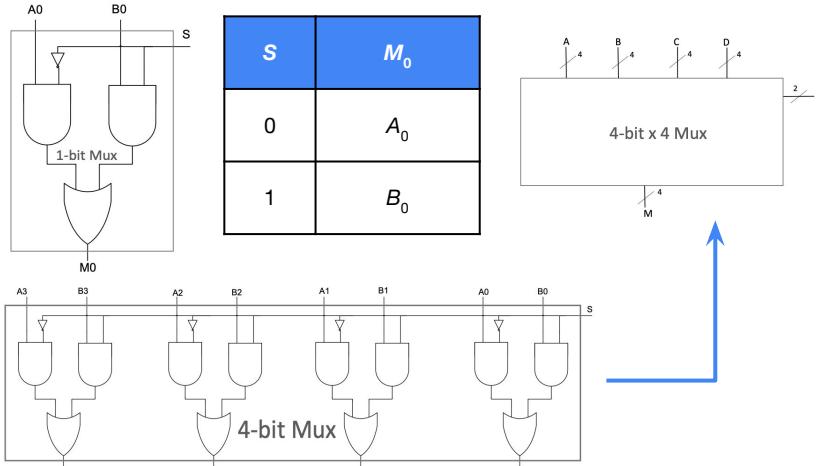
* Notación de buses utilizada para facilitar la abstracción de la cantidad de señales.

Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

- **Enabler:** Componente que habilita o no el paso de una señal.



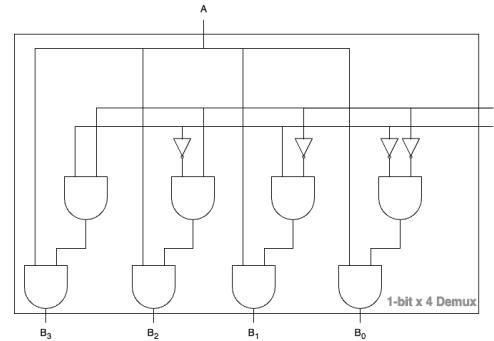
- **Multiplexor/Mux:** Componente que selecciona como salida una de un conjunto de señales de entrada.



Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

■ De-Multiplexor/Demux:

Componente que transmite una señal de entrada a una de múltiples salidas. En el resto de salidas no seleccionadas se transmite un 0.

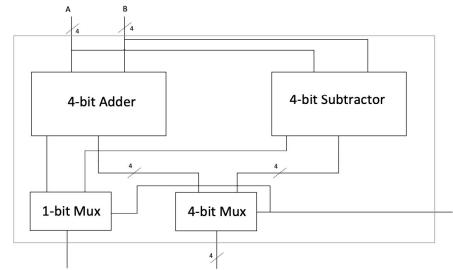


| <i>S₁</i> | <i>S₀</i> | <i>Output</i> |
|----------------------|----------------------|---------------|
| 0 | 0 | $B_0 = A$ |
| 1 | 0 | $B_1 = A$ |
| 0 | 1 | $B_2 = A$ |
| 1 | 1 | $B_3 = A$ |

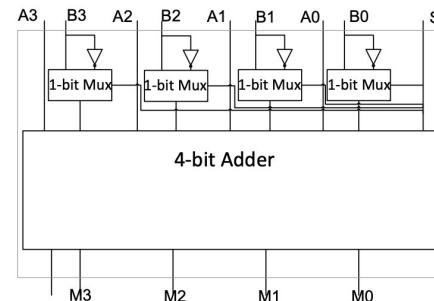
Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

■ Sumador-Restador

- No optimizado.
- Optimizado.



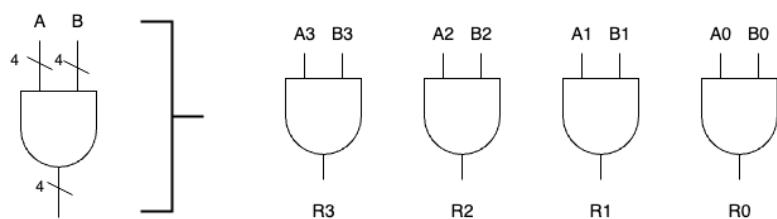
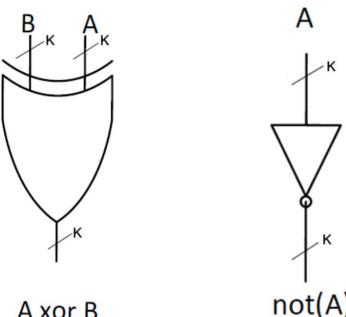
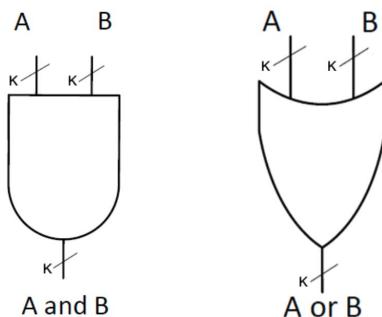
| S | M | C _{out} |
|---|-----|----------------------|
| 0 | A+B | A+B C _{out} |
| 1 | A-B | A-B C _{out} |



| S | M | Cout |
|---|-----|----------------------|
| 0 | A+B | A+B C _{out} |
| 1 | A-B | A-B C _{out} |

Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

- **Operadores *bitwise*:** Componentes que extienden las operaciones de compuertas lógicas a señales de más de 1 bit.



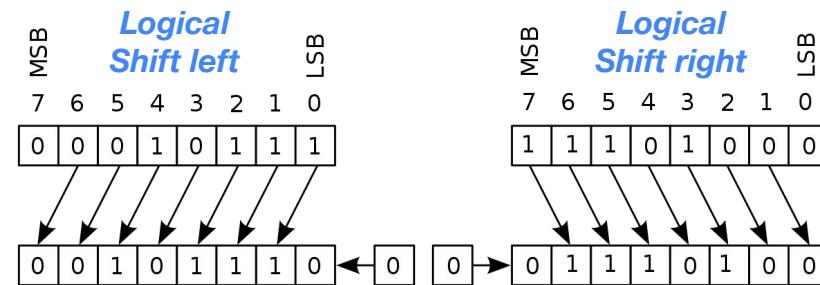
$$R = (A_3 \text{ AND } B_3)(A_2 \text{ AND } B_2)(A_1 \text{ AND } B_1)(A_0 \text{ AND } B_0) = R_3R_2R_1R_0$$

* Ejemplo de construcción de componente *bitwise AND*.

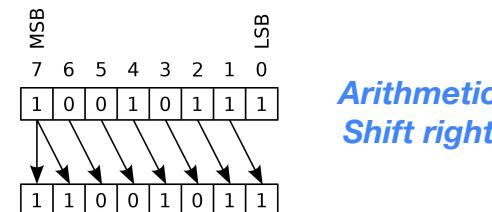
Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

- **Logical shifting components:** Componentes que desplazan los bits de un número a la derecha o a la izquierda, equivalente a dividir o multiplicar por 2 de forma respectiva.

- shift_left(0100b) = 1000b
- shift_left(1001b) = 0010b
- shift_right(0100b) = 0010b
- shift_right(1001b) = 0100b



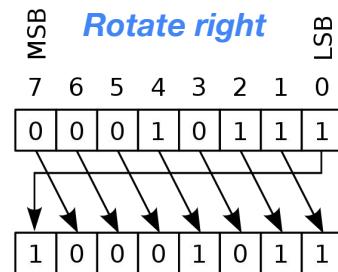
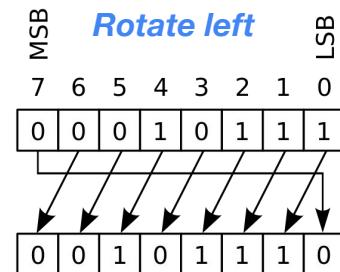
- **Arithmetic shift right:** Componente que realiza *shift right* manteniendo el signo (bit más significativo).
- shift_arithmetic_right(1100b) = 1110b
 - shift_arithmetic_right(1001b) = 1100b



Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

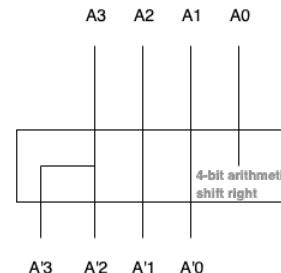
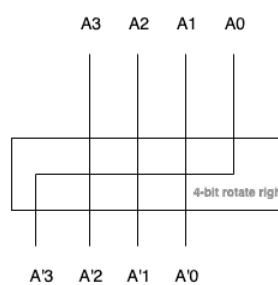
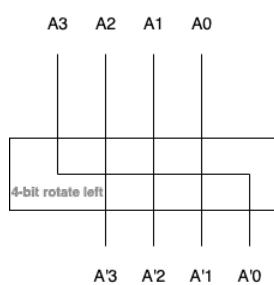
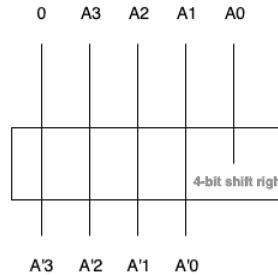
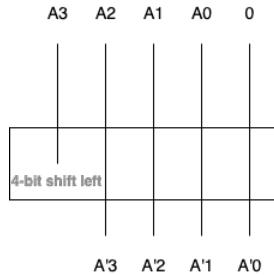
- ***Rotating components:*** Componentes que desplazan los bits de un número a la derecha o a la izquierda, pero que rotan el bit “descartado” al bit más o menos significativo respectivamente.

- $\text{rotate_left}(1000\text{b}) = 0001\text{b}$
- $\text{rotate_left}(0101\text{b}) = 1010\text{b}$
- $\text{rotate_right}(0100\text{b}) = 0010\text{b}$
- $\text{rotate_right}(0011\text{b}) = 1001\text{b}$



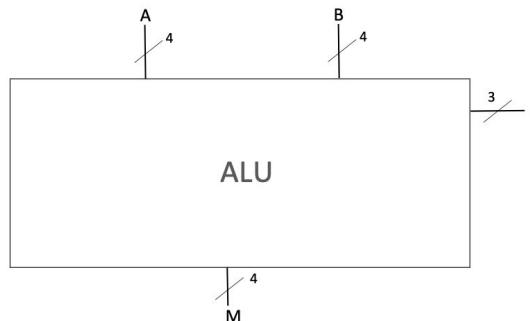
Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

■ Diagramas de componentes de *shift* y *rotate*



Operaciones aritméticas y lógicas - Componentes aritméticas

- **Arithmetic Logic Unit (ALU):** Realiza las operaciones aritmético-lógicas con los componentes antes vistos y selecciona la operación mediante multiplexores (que reciben el resultado de todas las operaciones). Será la **unidad de ejecución del computador básico**.



| S2 | S1 | S0 | M |
|----|----|----|-------------|
| 0 | 0 | 0 | Suma |
| 0 | 0 | 1 | Resta |
| 0 | 1 | 0 | And |
| 0 | 1 | 1 | Or |
| 1 | 0 | 0 | Not |
| 1 | 0 | 1 | Xor |
| 1 | 1 | 0 | Shift left |
| 1 | 1 | 1 | Shift right |

* Solo realiza *shifts* lógicos, no aritméticos.

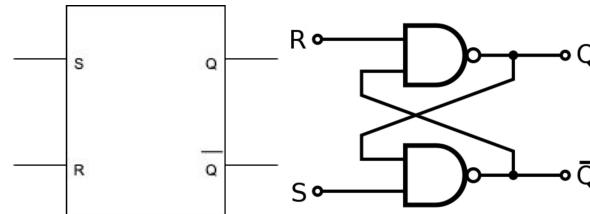
Almacenamiento de datos

- Contenido que encuentran en:
 - **Clase 3 - Almacenamiento de Datos**
 - **04 - Almacenamiento de Datos (Apuntes)**



Almacenamiento de datos - Latches

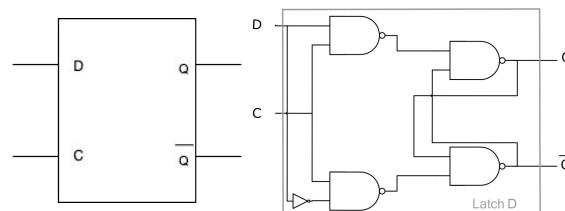
- **Latch RS:** Componente que puede almacenar un estado o cambiarlo mediante las señales R (eset) y S (et) a través de un **circuito secuencial**.



| S | R | Q(t+1) |
|----------|----------|---------------|
| 0 | 0 | - |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | $Q(t)$ |

* Notar el uso de compuertas NAND.

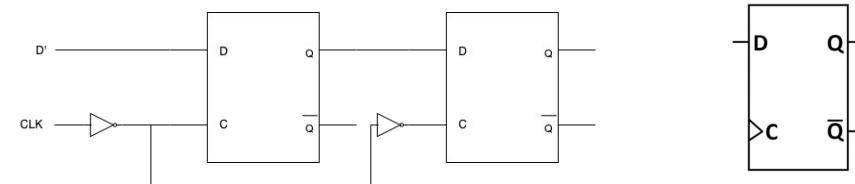
- **Latch D:** Componente que se construye sobre un Latch RS para permitir el almacenamiento de una señal D a partir de una señal de control C .



| C | D | Q(t+1) |
|----------|----------|---------------|
| 0 | 0 | $Q(t)$ |
| 0 | 1 | $Q(t)$ |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Almacenamiento de datos - Flip-flops

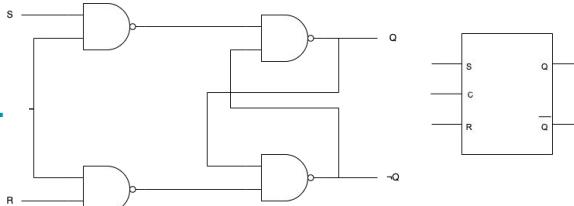
- **Flip-flop D:** Componente que permite guardar el estado anterior de una señal **en un instante dado**.



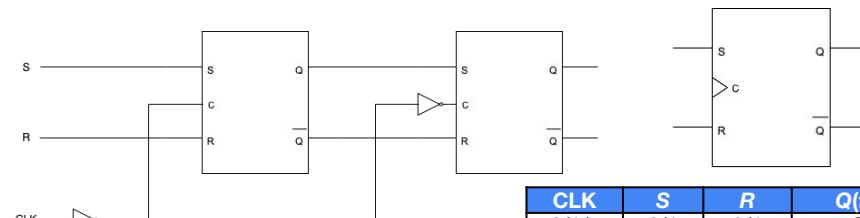
\uparrow = Flanco de subida (CLK de 0 a 1).
 \downarrow = Flanco de bajada (CLK de 1 a 0).

| CLK | D | $Q(t+1)$ |
|-------|-----|----------|
| 0/1/↓ | 0/1 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | 0 |
| ↑ | 1 | 1 |

- **Flip-flop RS:** Flip-flop construido con latches RS que incluyen señal de control C.



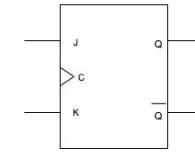
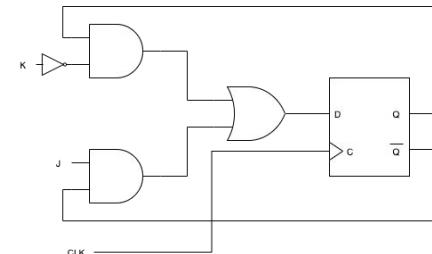
* Latch RS con señal de control C.



| CLK | S | R | $Q(t+1)$ |
|-------|-----|-----|----------|
| 0/1/↓ | 0/1 | 0/1 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | 0 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | 1 | 0 |
| ↑ | 1 | 0 | 1 |
| ↑ | 1 | 1 | - |

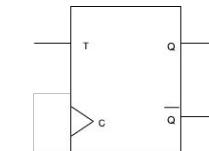
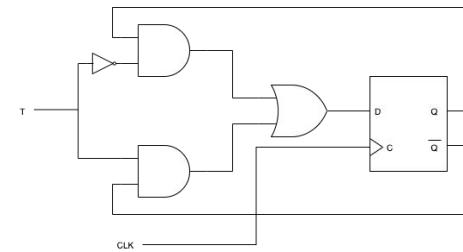
Almacenamiento de datos - Flip-flops

- **Flip-flop JK:** Similar al flip-flop RS, pero sin estado inválido.



| CLK | J | K | $Q(t+1)$ |
|-------|-----|-----|-------------|
| 0/1/↓ | 0/1 | 0/1 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | 0 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | 1 | 0 |
| ↑ | 1 | 0 | 1 |
| ↑ | 1 | 1 | $\neg Q(t)$ |

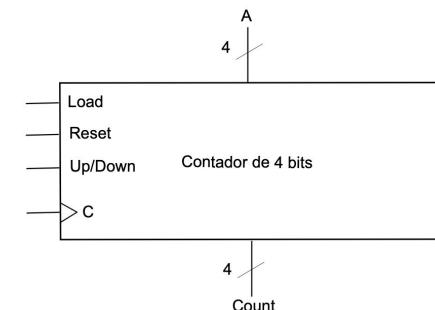
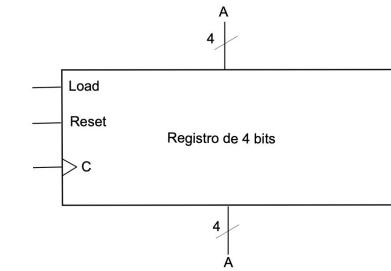
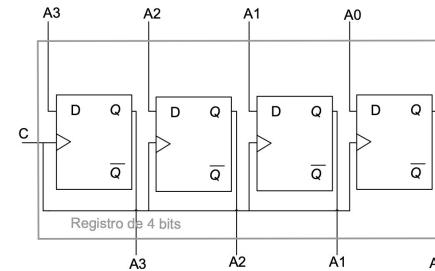
- **Flip-flop T:** Flip-flop que a partir de una señal $T(\text{oggle})$ invierte el estado.



| CLK | T | $Q(t+1)$ |
|-------|-----|-------------|
| 0/1/↓ | 0/1 | $Q(t)$ |
| ↑ | 0 | $Q(t)$ |
| ↑ | 1 | $\neg Q(t)$ |

Almacenamiento de datos - Registros y contadores

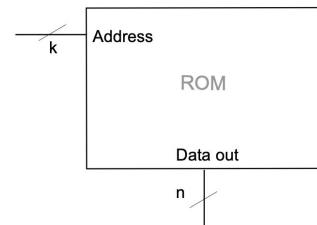
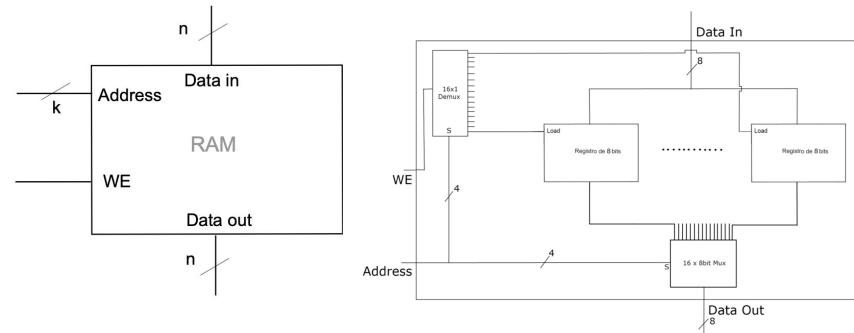
- **Registro:** Conjunto de flip-flops que almacenan cada bit de un valor numérico. Posee señales *Reset* para dejar el valor en 0 y *Load* para cargar una señal de entrada.
- **Contador:** Registro con señales de incremento/decremento para aumentar o disminuir en una unidad el valor almacenado.



* De ahora en adelante, todo componente que en su interior posea flip-flops debe estar conectado al *clock* del sistema para asegurar sincronización.

Almacenamiento de datos - Memorias

- **RAM:** Extensión de los registros para leer o escribir **palabras de memoria** (generalmente de 8 bits - 1 byte). Si se poseen k bits de direccionamiento, la memoria posee 2^k palabras de memorias (2^k bytes).
- **ROM:** Memoria de “solo lectura” (dependiendo del caso, pero pueden asumirla así).



* El uso del Demux es fundamental para el funcionamiento de la memoria RAM y la propagación de la señal WE (Write Enable) solo al registro que corresponda.

Almacenamiento de datos - Tipos de dato

- **Variables:** Valor que puede cambiar durante la ejecución de un programa y cuyo tipo de dato incide en la forma en que se almacena.

| Tipo de dato | Codificación | Interpretación | #Bits de representación |
|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| char | base 2 sin signo | carácter o entero positivo | 8 |
| signed char | base 2 con signo en complemento de 2 | entero positivo o negativo | 8 |
| short | base 2 con signo en complemento de 2 | entero positivo o negativo | 16 |
| unsigned short | base 2 sin signo | entero positivo | 16 |
| int | base 2 con signo en complemento de 2 | entero positivo o negativo | 32 |
| unsigned int | base 2 sin signo | entero positivo | 32 |
| long | base 2 con signo en complemento de 2 | entero positivo o negativo | 64 |
| unsigned long | base 2 sin signo | entero positivo | 64 |
| long long | base 2 con signo en complemento de 2 | entero positivo o negativo | 128 |
| unsigned long long | base 2 sin signo | entero positivo | 128 |
| float | punto flotante de precisión simple | Racionales y casos especiales | 32 |
| double | punto flotante de precisión doble | Racionales y casos especiales | 64 |
| long double | punto flotante de precisión cuádruple | Racionales y casos especiales | 128 |

Almacenamiento de datos - *Endianness*

- ***Endianness***: Orden en el que se almacenan la secuencia de un dato.
 - ***BigEndian***: La palabra más significativa de la secuencia se almacena en la dirección **menor**.
 - ***LittleEndian***: La palabra menos significativa de la secuencia se almacena en la dirección **menor**.

* Ejemplos de *endianness* para el almacenamiento del dato 0000111101010101, que se separa en los bytes 00001111 y 01010101

| Dirección de memoria (hexa) | Palabra almacenada (<i>big endian</i>) |
|-----------------------------|--|
| 0x00 | 00001111 |
| 0x01 | 01010101 |
| 0x02 | - |

| Dirección de memoria (hexa) | Palabra almacenada (<i>little endian</i>) |
|-----------------------------|---|
| 0x00 | 01010101 |
| 0x01 | 00001111 |
| 0x02 | - |

Almacenamiento de datos - Arreglos y matrices

- **Arreglo:** Tipo de dato que además posee un **largo** y una **dirección de memoria de inicio**.
- **Matriz:** Arreglo de arreglos. Se puede almacenar según la convención de **filas** o **columnas**.

```
let variables: number[] = [1, 3, 5, 7];
```

| Dirección de memoria (hexa) | Palabra almacenada |
|-----------------------------|--------------------|
| 0x00 | 00000001 |
| 0x01 | 00000011 |
| 0x02 | 00000101 |
| 0x03 | 00000111 |
| 0x04 | - |

```
let variablesMatrix: number[][] = [
  [1, 3, 5],
  [2, 4, 6]
];
```

| Dirección de memoria (hexa) | Palabra almacenada | Dirección de memoria (hexa) | Palabra almacenada |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| 0x00 | 00000001 | 0x00 | 00000001 |
| 0x01 | 00000011 | 0x01 | 00000010 |
| 0x02 | 00000101 | 0x02 | 00000011 |
| 0x03 | 00000100 | 0x03 | 00000100 |
| 0x04 | 00000100 | 0x04 | 00000101 |
| 0x05 | 00000110 | 0x05 | 00000110 |

Direccionamiento en convención por filas: $dir(\text{matriz}[i,j]) = dir(\text{matriz}) + i * sizeof(\text{matriz}[i,j]) * \#columnas + j * sizeof(\text{matriz}[i,j])$

Direccionamiento en convención por columnas: $dir(\text{matriz}[i,j]) = dir(\text{matriz}) + j * sizeof(\text{matriz}[i,j]) * \#filas + i * sizeof(\text{matriz}[i,j])$

Computador básico

■ Contenido que encuentran en:

- **Clase 4 - Programabilidad**
- **Clase 5 - Saltos y Subrutinas**
- **Clase 7 - Arquitecturas de Computadores**
- **05 - Programabilidad** (Apuntes)
- **06 - Saltos y Subrutinas** (Apuntes)
- **07 - Arquitecturas de Computadores**
(Apuntes)

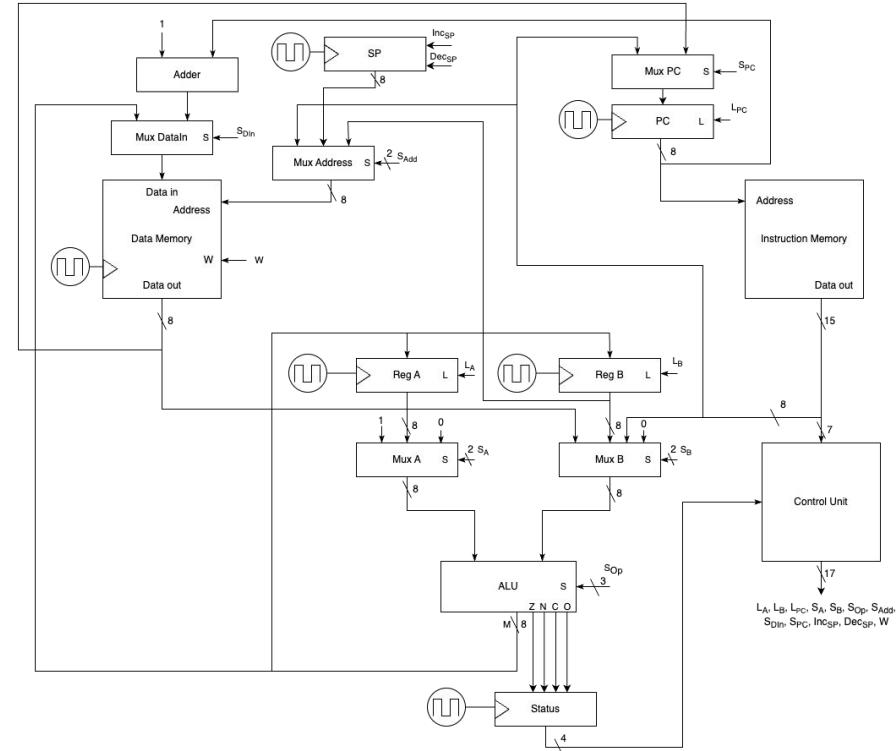
When your friend only writes programs in assembly language



Computador básico - Microarquitectura

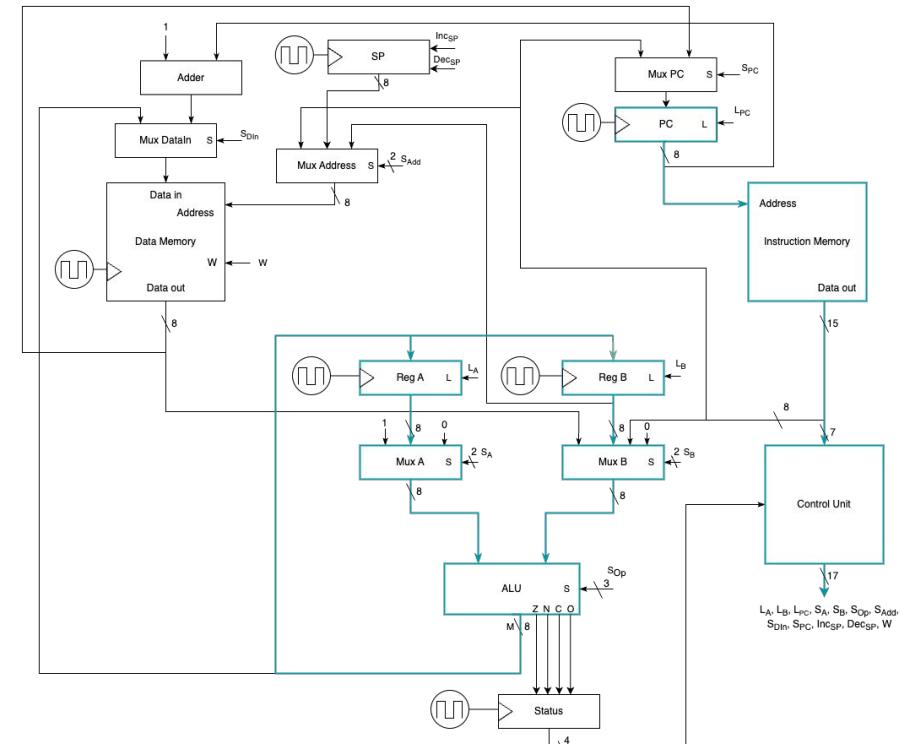
■ Diagrama del computador básico

Diagrama completo. Iremos destacando las conexiones y componentes relevantes que habilitan cada funcionalidad.



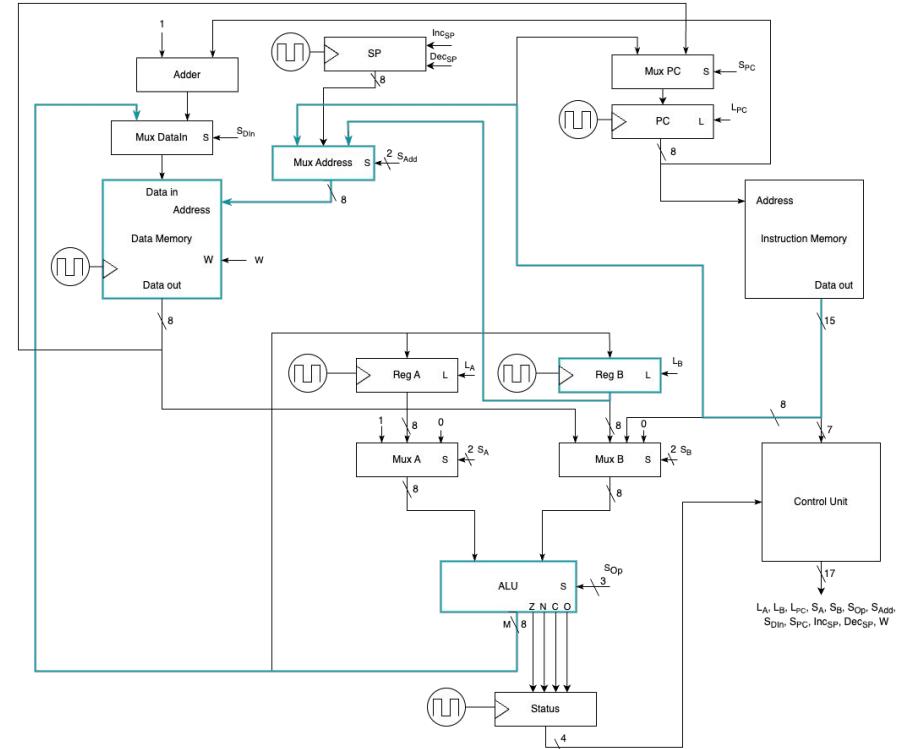
Computador básico - Microarquitectura

- Contador PC (*Program Counter*) permite ejecutar de forma secuencial un programa almacenado en la memoria ROM *Instruction Memory*. Por cada flanco de subida incrementa su valor y, así, cambia la instrucción en ejecución.
- *Control Unit* decodifica el *opcode* de la instrucción en señales de control que ejecutan la operación deseada.
- Registros A y B permiten realizar operaciones en la ALU y almacenar el resultado temporalmente. Muxes A y B permiten ampliar las operaciones a realizar.



Computador básico - Microarquitectura

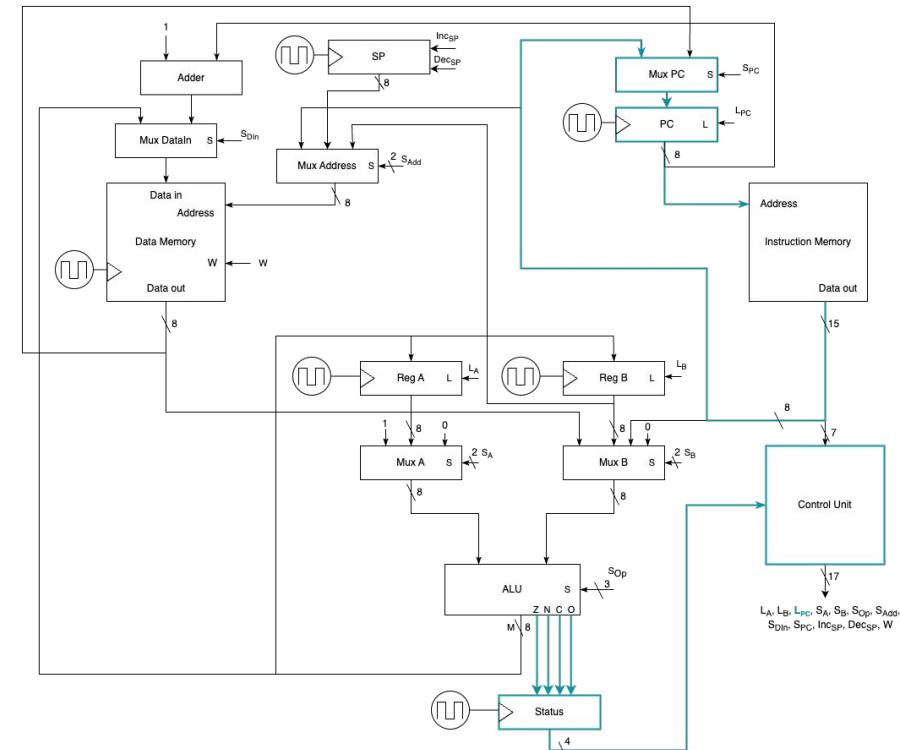
- Valor literal (numérico) asociado a la instrucción puede ser utilizado para realizar más operaciones a través del Mux *B*.
- Los resultados de las operaciones se pueden almacenar en la memoria RAM *Data Memory* (donde también se almacenan las variables del programa).
- La dirección donde se lee o escribe un dato puede ser dada por el literal mismo (direcciónamiento directo) o por el valor del registro *B* (direcciónamiento indirecto).



Computador básico - Microarquitectura

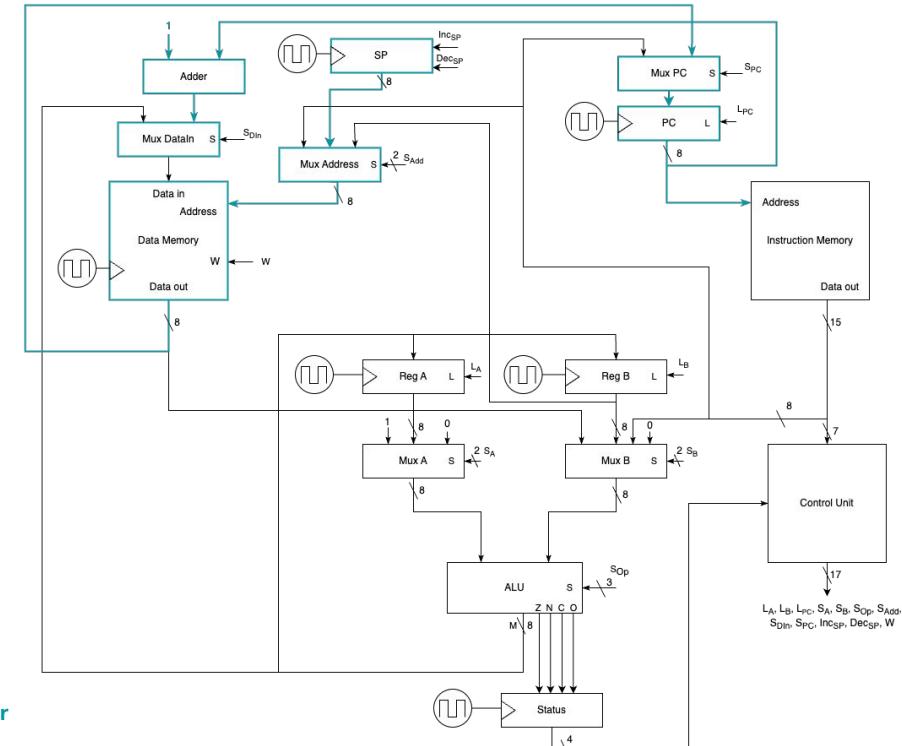
- La conexión entre el literal y el contador PC (a través de su Mux) permite la ejecución de **instrucciones de salto**, cargando en el contador la dirección de memoria de la instrucción deseada.
- Si se quiere realizar un salto **condicional**, se hace uso de las *flags* de estado que otorgan información de la instrucción anterior ($Z =$ cero; $N =$ negativo; $C =$ carry; $O =$ overflow). Si se ejecuta una instrucción de salto que cumple la condición, la *Control Unit* habilita la señal L_{PC} .

* Usamos la instrucción CMP antes del salto para tener certeza del estado esperado, pero en estricto rigor se pueden realizar saltos condicionales siempre.



Computador básico - Microarquitectura

- Contador SP (*Stack Pointer*) permite añadir **memoria de stack** (ingreso de elementos desde la última dirección de la memoria).
- A través de la memoria de stack podemos implementar **subrutinas**. La conexión del PC y la *Data Memory* permite almacenar la dirección de retorno ($PC+1$) en el *stack* y cargarla de vuelta a través de la conexión entre la salida de la *Data Memory* y PC a través de su Mux.



* Por construcción, SP siempre apunta una dirección sobre el tope. Por ende, para leer el valor del tope es necesario invertir una iteración en decrementarlo en una unidad.

Computador básico - ISA

- ***Instruction Set Architecture:*** Indica la **forma** en la que se escriben los programas de una arquitectura y las operaciones que soporta, indicando a su vez las señales requeridas para ello, su formato, etc.

| Instrucción | Operandos | Opcode | Condición | L _{PC} | L _A | L _B | S _{A0,1} | S _{B0,1} | S _{Op0,1,2} | S _{Add0,1} | S _{DIn} | S _{PC} | W | Inc _{SP} | Dec _{SP} |
|-------------|-----------|---------|-----------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------------|---|-------------------|-------------------|
| MOV | A,B | 0000000 | | 0 | 1 | 0 | ZERO | B | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0000001 | | 0 | 0 | 1 | A | ZERO | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0000010 | | 0 | 1 | 0 | ZERO | LIT | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,Lit | 0000011 | | 0 | 0 | 1 | ZERO | LIT | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0000100 | | 0 | 1 | 0 | ZERO | DOUT | ADD | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,(Dir) | 0000101 | | 0 | 0 | 1 | ZERO | DOUT | ADD | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir),A | 0000110 | | 0 | 0 | 0 | A | ZERO | ADD | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| | (Dir),B | 0000111 | | 0 | 0 | 0 | ZERO | B | ADD | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0001000 | | 0 | 1 | 0 | ZERO | DOUT | ADD | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,(B) | 0001001 | | 0 | 0 | 1 | ZERO | DOUT | ADD | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (B),A | 0001010 | | 0 | 1 | 0 | A | ZERO | ADD | B | ALU | - | 1 | 0 | 0 |

Parte 1 de la ISA del computador básico

Computador básico - ISA

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---|---|---|---|------|-----|-----|-----|---|---|---|---|
| ADD | A,B | 0001011 | 0 | 1 | 0 | A | B | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0001100 | 0 | 0 | 1 | A | B | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0001101 | 0 | 1 | 0 | A | LIT | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0001110 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | ADD | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0001111 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | ADD | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0010000 | 0 | 0 | 0 | A | B | ADD | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| SUB | A,B | 0010001 | 0 | 1 | 0 | A | B | SUB | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0010010 | 0 | 0 | 1 | A | B | SUB | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0010011 | 0 | 1 | 0 | A | LIT | SUB | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0010100 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | SUB | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0010101 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | SUB | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0010110 | 0 | 0 | 0 | A | B | SUB | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| AND | A,B | 0010111 | 0 | 1 | 0 | A | B | AND | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0011000 | 0 | 0 | 1 | A | B | AND | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0011001 | 0 | 1 | 0 | A | LIT | AND | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0011010 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | AND | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0011011 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | AND | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0011100 | 0 | 0 | 0 | A | B | AND | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| OR | A,B | 0011101 | 0 | 1 | 0 | A | B | OR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0011110 | 0 | 0 | 1 | A | B | OR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0011111 | 0 | 1 | 0 | A | LIT | OR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0100000 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | OR | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0100001 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | OR | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0100010 | 0 | 0 | 0 | A | B | OR | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |

Parte 2 de la ISA del computador básico

Computador básico - ISA

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---|---|---|-----|------|-----|-----|-----|---|---|---|---|
| NOT | A,A | 0100011 | 0 | 1 | 0 | A | - | NOT | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0100100 | 0 | 0 | 1 | A | - | NOT | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0100101 | 0 | 0 | 0 | A | B | NOT | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| XOR | A,B | 0100110 | 0 | 1 | 0 | A | B | XOR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0100111 | 0 | 0 | 1 | A | B | XOR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0101000 | 0 | 1 | 0 | A | LIT | XOR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0101001 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | XOR | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0101010 | 0 | 1 | 0 | A | DOUT | XOR | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0101011 | 0 | 0 | 0 | A | B | XOR | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| SHL | A,A | 0101100 | 0 | 1 | 0 | A | - | SHL | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0101101 | 0 | 0 | 1 | A | - | SHL | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0101110 | 0 | 0 | 0 | A | B | SHL | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| SHR | A,A | 0101111 | 0 | 1 | 0 | A | - | SHR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | B,A | 0110000 | 0 | 0 | 1 | A | - | SHR | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0110001 | 0 | 0 | 0 | A | B | SHR | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| INC | B | 0110010 | 0 | 0 | 1 | ONE | B | ADD | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | (B) | 0110011 | 0 | 0 | 1 | ONE | DOUT | ADD | B | ALU | - | 1 | 0 | 0 |
| | (Dir) | 0110100 | 0 | 0 | 1 | ONE | DOUT | ADD | LIT | ALU | - | 1 | 0 | 0 |

Parte 3 de la ISA del computador básico

Computador básico - ISA

| | | | | | | | | | | | | |
|------|---------|---------|-----------|-------|------|-----|-----|-----|------|---|---|---|
| CMP | A,B | 0110101 | 0 0 0 | A | B | SUB | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,Lit | 0110110 | 0 0 0 | A | LIT | SUB | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(Dir) | 0110111 | 0 0 0 | A | DOUT | SUB | LIT | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | A,(B) | 0111000 | 0 0 0 | A | DOUT | SUB | B | - | - | 0 | 0 | 0 |
| JMP | Dir | 0111001 | 1 0 0 | - | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JEQ | Dir | 0111010 | Z=1 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JNE | Dir | 0111011 | Z=0 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JGT | Dir | 0111100 | N=0 y Z=0 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JLT | Dir | 0111101 | N=1 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JGE | Dir | 0111110 | N=0 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JLE | Dir | 0111111 | N=1 o Z=1 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JCR | Dir | 1000000 | C=1 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| JOV | Dir | 1000001 | V=1 | 1 0 0 | - | - | - | - | LIT | 0 | 0 | 0 |
| CALL | Dir | 1000010 | 1 0 0 | - | - | - | SP | PC | LIT | 1 | 0 | 1 |
| RET | | 1000011 | 0 0 0 | - | - | - | - | - | - | 0 | 1 | 0 |
| | | 1000100 | 1 0 0 | - | - | - | SP | - | DOUT | 0 | 0 | 0 |
| PUSH | A | 1000101 | 0 0 0 | A | ZERO | ADD | SP | ALU | - | 1 | 0 | 1 |
| | B | 1000110 | 0 0 0 | ZERO | B | ADD | SP | ALU | - | 1 | 0 | 1 |
| POP | A | 1000011 | 0 0 0 | - | - | - | - | - | - | 0 | 1 | 0 |
| | | 1000111 | 0 1 0 | ZERO | DOUT | ADD | SP | - | - | 0 | 0 | 0 |
| POP | B | 1000011 | 0 0 0 | - | - | - | - | - | - | 0 | 1 | 0 |
| | | 1001000 | 0 0 1 | ZERO | DOUT | ADD | SP | - | - | 0 | 0 | 0 |
| NOP | | 1001001 | 0 0 0 | - | - | - | - | - | - | 0 | 0 | 0 |

Parte 4 de la ISA del computador básico

Computador básico - ISA

- Ejemplo de código con la ISA del computador básico. Cabe destacar que se definen dos segmentos: DATA para las variables (incluyendo arreglos) y CODE para las instrucciones.
- El **assembler** es el programa encargado de transformar este código en lenguaje de máquina (binario) y de asegurar que existan instrucciones que almacenen las variables en memoria, así como también *mapear* correctamente las direcciones de los *labels* a los literales correctos.

DATA:

```
var 1  
arr 1  
      3  
      5
```

CODE:

```
MOV B,arr  
MOV A,(B)  
SHL A,A  
MOV (B),A  
INC B  
MOV A,(B)  
SHL A,A  
MOV (B),A  
INC B  
MOV A,(B)  
SHL A,A  
MOV (B),A
```

Computador básico - Clasificaciones

■ Paradigmas según ISA

- **RISC:** *Reduced Instruction Set Computer.* Instrucciones pequeñas y simples. Su diseño permite simplificar el *hardware*, poniendo énfasis en el *software*.
- **CISC:** *Complex Instruction Set Computer.* Muchas instrucciones y con complejidad alta. Énfasis en un *hardware* más complejo para poder ejecutarlas.

■ Paradigmas según memoria

- **Harvard:** Memoria de datos separada de la memoria de instrucciones.
- **Von Neumann:** Datos e instrucciones en una única unidad de memoria.

* Bajo estos paradigmas, el computador básico presenta una microarquitectura Harvard y una ISA RISC.

Arquitectura RISC-V

- Contenido que encuentran en:
 - Clase 8 - Arquitectura RISC-V



Arquitectura RISC-V - Instrucciones

■ Instrucciones más utilizadas: Operaciones lógico-aritméticas

| Mnemotecnia | Instrucción | Tipo | Descripción |
|------------------------------|--|------|----------------------------------|
| ADD rd, rs1, rs2 | Adición | R | $rd \leftarrow rs1 + rs2$ |
| SUB rd, rs1, rs2 | Sustracción | R | $rd \leftarrow rs1 - rs2$ |
| ADDI rd, rs1, imm12 | Adición de literal | I | $rd \leftarrow rs1 + imm12$ |
| AND/OR/XOR rd, rs1, rs2 | Operación AND/OR/XOR | R | $rd \leftarrow rs1 \& /\^ rs2$ |
| ANDI/ORI/XORI rd, rs1, imm12 | Operación AND/OR/XOR con literal | I | $rd \leftarrow rs1 \& /\^ imm12$ |
| SLL/SRL rd, rs1, rs2 | Operación <i>shift left/right</i> lógico | R | $rd \leftarrow rs1 <>/> rs2$ |
| SRA rd, rs1, rs2 | Operación <i>shift right</i> aritmético | R | $rd \leftarrow rs1 >> rs2$ |
| SLLI/SRLI rd, rs1, shamt | Operación <i>shift left/right</i> lógico con literal | I | $rd \leftarrow rs1 <>/> shamt$ |
| SRAI rd, rs1, shamt | Operación <i>shift right</i> aritmético con literal | I | $rd \leftarrow rs1 >> shamt$ |

* *shamt* o *shift amount* es la cantidad de *shifts* a realizar y se codifica como un entero a partir de los 5 bits menos significativos del literal (*imm12[4:0]*).

Arquitectura RISC-V - Instrucciones

- **Instrucciones más utilizadas:** Operaciones de carga, almacenamiento y subrutinas

| Mnemotecnia | Instrucción | Tipo | Descripción |
|---------------------|---|------|---|
| LW rd, imm12(rs1) | Cargar word (32 bits) | I | $rd \leftarrow \text{mem}[rs1 + imm12]$ |
| SW rs2, imm12(rs1) | Almacenar word (32 bits) | S | $rs2 \rightarrow \text{mem}[rs1 + imm12]$ |
| BEQ rs1, rs2, imm12 | Salto con condición “igual” | B | if $rs1 == rs2$: PC \leftarrow PC + imm12 |
| BNE rs1, rs2, imm12 | Salto con condición “distinto” | B | if $rs1 != rs2$: PC \leftarrow PC + imm12 |
| BGE rs1, rs2, imm12 | Salto con condición “mayor o igual” | B | if $rs1 >= rs2$: PC \leftarrow PC + imm12 |
| BLT rs1, rs2, imm12 | Salto con condición “menor” | B | if $rs1 < rs2$: PC \leftarrow PC + imm12 |
| JAL rd, imm20 | Salto incondicional con “enlace” | J | $rd \leftarrow \text{PC}+4$; PC \leftarrow PC + imm20 |
| JALR rd, imm12(rs1) | Salto incondicional con “enlace” a registro | I | $rd \leftarrow \text{PC}+4$; PC $\leftarrow rs1 + imm12$ |

* En general, en vez de JAL y JALR trataremos de usar pseudo-instrucciones al ser más intuitivas. LW también se puede usar para leer una dirección de memoria a partir de su *label*.

Arquitectura RISC-V - Instrucciones

■ Instrucciones más utilizadas: Pseudo-instrucciones

| Mnemotecnia | Instrucción | Instrucción(es) base |
|----------------------|---|---|
| LI rd, imm12 | Cargar literal en registro que utiliza ≤ 12 bits | ADDI rd, zero, imm12 |
| LA rd, sym | Cargar dirección en registro | AUIPC rd, sym[31:12]; ADDI rd, rd, sym[11:0] |
| MV rd, rs | Copiar registro | ADDI rd, rs, 0 |
| NOT rd, rs | Complemento de 1 | XORI rd, rs, -1 |
| NEG rd, rs | Complemento de 2 | SUB rd, zero, rs |
| BGT rs1, rs2, offset | Salto si $rs1 > rs2$ | BLT rs2, rs1, offset |
| BLE rs1, rs2, offset | Salto si $rs1 \leq rs2$ | BGE rs2, rs1, offset |
| BEQZ rs1, offset | Salto si $rs1 = 0$ | BEQ rs1, zero, offset |
| BNEZ rs1, offset | Salto si $rs1 \neq 0$ | BNE rs1, zero, offset |
| J offset | Salto incondicional | JAL zero, offset |
| CALL offset12 | Llamado a subrutina (dirección ≤ 12 bits) | JALR ra, ra, offset12 |
| RET | Retorno de la subrutina | JALR zero, 0(ra) |

Arquitectura RISC-V - Directivas

■ Directivas básicas para correr código en Assembly RISC-V

| Directiva de Assembler | Descripción |
|------------------------|---|
| .text | Segmento de texto (código). |
| .data | Sección de datos global. |
| .globl sym | Label sym se vuelve global. |
| .word w1, w2, ..., wN | Almacena N valores de 32 bits en palabras de memoria sucesivas. |
| .byte w1, w2, ..., wN | Almacena N valores de 8 bits en bytes de memoria sucesivos. |

■ ECALLs para imprimir enteros y terminar programa

```
.globl main
.text
main:
    li a0, 11          # a0 = 11
    li a7, 1           # a7 = 1 (PrintInt)
    ecall              # Imprime 11 en consola
    li a7, 10          # a7 = 10 (Exit)
    ecall              # Termina el programa
```

Arquitectura RISC-V - Convención

■ Registros relevantes y encargado de respaldo en subrutinas

| Registro(s) | Mnemotecnia ABI | Descripción | Encargado de respaldo |
|-------------------|-----------------|---|-----------------------|
| x0 | zero | Registro cero. Almacena este valor y no cambia . Ignora las escrituras. | - |
| x1 | ra | Return Address . Almacena la dirección de retorno de las subrutinas. | Caller |
| x2 | sp | Stack Pointer , apunta al último elemento almacenado. | Callee |
| x5-x7, x28-x31 | t0-t6 | Registros temporales. Pierden su valor entre llamados de subrutinas. | Caller |
| x8-x9, x18-x27 | s0-s11 | Registros guardados (<i>saved</i>). Preservan su valor entre llamados de subrutinas. | Callee |
| x10-x17 | a0-a7 | Registros para argumentos de subrutinas. | Caller |
| x10-x11 | a0-a1 | Si bien son de argumentos de subrutinas, también se utilizan para almacenar valores de retorno. | Caller |

Arquitectura RISC-V - Convención

■ Ejemplo de respaldo de registros t*

En este caso, los registros t_0-t_1 son respaldados por el *caller* porque son modificados por la subrutina y por definición son *caller-saved*.

* En estricto rigor es necesario respaldar el registro *ra* solo para llamadas de subrutinas anidadas, pero por convención lo respaldamos siempre ante un *call* dado que nuestro código podría llamarse desde otro archivo, por lo que respaldar *ra* asegura que este llamado siempre funcione.

* Este código almacena un segundo arreglo cuyos elementos poseen el valor duplicado de los elementos de *arr*.

```
.data
len: .word 5
arr: .word 198, 137, 42, 63, 175
.text
start:
    li $0, 4
    lw $1, len
    li $0, 0
    la $1, arr
    mul $2, $0, $1
    add $2, $2, $1
    while:
        lw $0, 0($1)
        addi $3, $0, -12
        sw $0, 0($3)
        sw $1, 4($3)
        sw $2, 8($3)
        call double_give_next_person
        lw $0, 0($3)
        lw $1, 4($3)
        lw $2, 8($3)
        addi $3, $3, 12
        sw $0, 0($2)
        addi $0, $0, 1
        beq $0, $1, end
        add $1, $1, $0
        add $2, $2, $0
        j while
double_give_next_person:
    mv $0, $0
    add $0, $0, $0
    ret
end:
    li $7, 10
    ecall

# s0 = 4 bytes por dirección
# s1 = largo del arreglo
# Contador (i)
# t1 = dirección del arreglo (initialmente arr[0])
# t2 = s0 * s1 = bytes que ocupa el arreglo de entrada
# t2 += t1 = primera dirección que podemos usar de .data
# a0 = arr[i]

# Respaldamos t0, t1 y ra (caller-saved). t1 se respalda
# aunque no se use porque call lo modifica con la
# dirección de retorno en RARS

# Recuperamos t0, t1 y ra y restauramos el stack

# out[i] = a0
# t0 += 1
# Termina cuando se recorre todo el arreglo
# t1 += s0 = dirección arr[i+1]
# t2 += s0 = dirección out[i+1]

# a0 = a0 + t0 = 2 * a0
```

Arquitectura RISC-V - Convención

■ Ejemplo de respaldo de registros s*

Si en el mismo código invertimos el uso de registros s* por registros t*, entonces los debemos respaldar en la subrutina ya que son *callee-saved* (lo que asegura que su valor persista entre llamados).

* Es el mismo código anterior. Estratégicamente no usamos t1 porque call modifica su valor en RARS y necesitaría respaldo.

```
.data
len: .word 5
arr: .word 198, 137, 42, 63, 175
.text
start:
    li t0, 4
    lw t2, len
    li s0, 0
    la s1, arr
    mul s2, t0, t2
    add s2, s2, s1
    while:
        lw a0, 0($1)
        addi sp, sp, -4
        sw ra, 0(sp)
        call double_give_next_person
        lw ra, 0(sp)
        addi sp, sp, 4
        sw a0, 0($2)
        addi s0, s0, 1
        beq s0, t2, end
        add s1, s1, t0
        add s2, s2, t0
        j while
double_give_next_person:
    addi sp, sp, -4
    sw s0, 0(sp)          # Respaldamos s0 (callee-saved)
    mv s0, a0
    add a0, a0, s0
    lw s0, 0(sp)
    addi sp, sp, 4
    ret
end:
    li a7, 10
    ecall
```

Arquitectura RISC-V - Convención

Ejemplo de respaldo de función recursiva

En este ejemplo, es importante notar que la función actúa como *caller* y como *callee*.

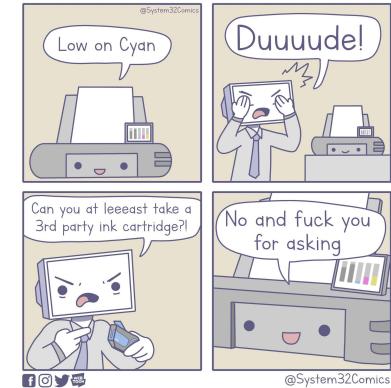
```
.data
N: .word 4           # N = Argumento de factorial. Calcularemos N! = 4

.text
main:
    addi sp, sp, -4      # Reservamos 4 bytes en el stack
    sw ra, 0(sp)        # Respaldamos ra
    la t0, N             # Dirección de memoria de N
    lw t0, 0(t0)          # Valor de N
    add a0, zero, t0      # Argumento 0 = valor de N
    call factorial        # factorial(N)
    li a7, 1              # Llamada de sistema: print int
    ecall                 # Valor en consola: 24 (a0, valor de retorno)
    lw ra, 0(sp)          # Restauramos ra
    addi sp, sp, 4          # Restauramos el stack
    li a7, 10             # Llamada de sistema: exit
    ecall

factorial:
    addi sp, sp, -8      # Reservamos 8 bytes en el stack
    sw ra, 0(sp)        # Respaldamos ra
    sw a0, 4(sp)          # Respaldamos N
    blez a0, factorial_zero # if (N > 0){
    addi a0, a0, -1      #   N -= 1
    call factorial        #   (N-1)! = factorial(N-1)
    lw t0, 4(sp)          #   Recuperamos N
    mul a0, a0, t0          #   N! = N * (N-1)! = N * factorial(N-1)
    j factorial_end       # }
factorial_zero:
    li a0, 1              # else {
    factorial_end:
    lw ra, 0(sp)          #   N! = 1
    addi sp, sp, 8          # Restauramos solo ra, a0 ahora posee el retorno
                           # Restauramos el stack
ret
```

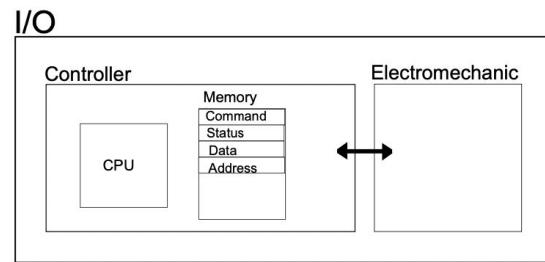
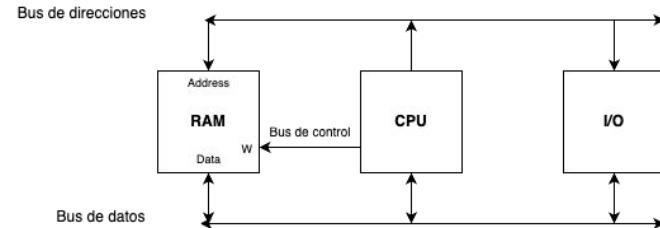
Dispositivos I/O

- Contenido que encuentran en:
 - **Clase 9 - Comunicación de CPU y Memoria con I/O**
 - **09 - Comunicación de CPU y Memoria con I/O (Apuntes)**



Dispositivos I/O - Diagrama general

- **Conectividad:** Los dispositivos I/O comparten el bus de datos de la memoria y la CPU y se puede interactuar con ellos con el bus de direcciones.
- **Composición:** Son como un computador, pero con tareas específicas para interactuar con sus piezas electromecánicas. Los registros más importantes son los de **estado** y **comandos** para interactuar con ellos.



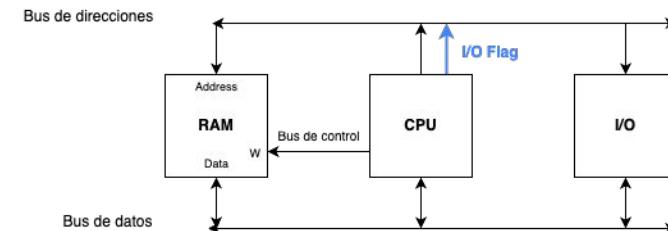
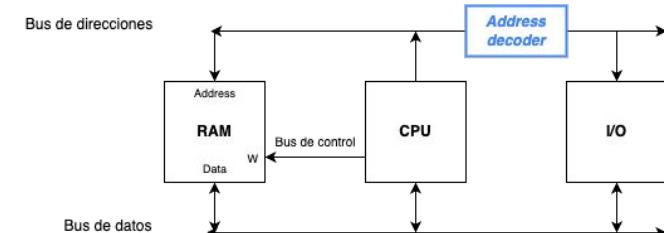
* Con el registro de estado podemos obtener información sobre el dispositivo, mientras que con el registro de comando podemos interactuar con él para que realice ciertas tareas. Los registros de datos y direcciones se utilizan para dispositivos de almacenamiento, de forma que puedan transferir o recibir datos de la memoria del computador.

Dispositivos I/O - Comunicación con CPU

- **Memory mapped:** Se reservan N direcciones de memoria que apuntan a registros de comando/estado de dispositivos I/O. Estos son detectados por el **address decoder**.

Problema: **memory barrier** (se pierde el uso de las direcciones reservadas en la RAM).

- **Port mapped:** Se agregan instrucciones a la ISA para leer (IN Reg, Port) o escribir (OUT Port, Reg) los valores de los registros de comando/estado de los dispositivos I/O a partir de puertos asociados a estos. Se añade una *flag* adicional para poder interpretar bien el puerto como un registro de un dispositivo.



Dispositivos I/O - Comunicación con CPU

■ Ejemplo de interacción con I/O

A continuación, se mostrará un ejemplo de código en RISC-V que interactúa con dispositivos *memory mapped* utilizados por un tren con las siguientes tabla de direcciones, estados, comandos y dirección base 0x10030000:

| Offset | Nombre | Descripción |
|--------|-----------|---|
| 0x00 | dir_ise | Contiene la dirección ISR del manejo de alerta del tren |
| 0x04 | reg_tr | Registro de comandos del tren |
| 0x08 | sensor_te | Registro de estado de sensor de temperatura |
| 0x0C | sensor_pr | Registro de estado de sensor de protuberancia |
| 0x18 | sensor_dr | Registro de estado de sensor de derrame |
| 0x20 | rad_cl | Registro de comandos de la radio |

| Nombre | Comando o Estado | Valor |
|-----------|--|-------|
| reg_tr | Notificar locomotora | 255 |
| reg_tr | Freno de emergencia | 127 |
| sensor_te | Temperatura alta | 255 |
| sensor_te | Temperatura baja | 1 |
| sensor_te | Temperatura normal | 127 |
| sensor_pr | Sobredimensión del tren o protuberancias | 4 |
| sensor_pr | Rieles libres de obstáculos | 2 |
| sensor_dr | Existencia de derrame | 3 |
| sensor_dr | Sin derrame de fluidos en el tren | 1 |
| rad_cl | Mandar reporte de sensores | 1 |

Dispositivos I/O - Comunicación con CPU

En esta ISR, se notifica a la locomotora de una emergencia y se activa el freno del tren si se detecta una protuberancia en los rieles usando las direcciones de los registros señalados en la diapositiva anterior. Lo importante es notar cómo se revisan los estados y se realizan comandos leyendo/escribiendo datos en las direcciones mapeadas de los dispositivos.

```
isr:
    addi sp, sp, -12           # Registros s* son callee-saved. También respaldamos ra por llamada anidada
    sw $0, 0(sp)
    sw $1, 4(sp)
    sw ra, 8(sp)
    call sens_pr_sub
    mv a0, t0                  # s0 = estado sensor_pr
    li s1, 0                   # s1 = cantidad de estados no deseados
    li t0, 4                   # Revisión de protuberancias
    beq s0, t0, emergency_action # Protocolo de emergencia si hay protuberancias
    j isr_end
emergency_action:
    call rad_cl_sub
    call reg_tr_sub
    j isr_end
sens_pr_sub:
    li t0, 0x1003000C          # t0 = dirección sensor_pr
    lw a0, 0(t0)                # a0 = valor sensor_pr
    ret
rad_cl_sub:
    li t0, 0x10030020          # t0 = dirección rad_cl
    li t1, 1                   # t1 = comando para enviar reporte de sensores
    sw t1, 0(t0)
    ret
reg_tr_sub:
    li t0, 0x10030004          # t0 = dirección reg_tr
    li t1, 255                 # t1 = comando para notificar a la locomotora
    sw t1, 0(t0)
    li t1, 127                 # t1 = comando para activar el freno de emergencia
    sw t1, 0(t0)
    ret
isr_end:
    lw s0, 0(sp)               # Registros s* y ra se restauran
    lw s1, 4(sp)
    lw ra, 8(sp)
    addi sp, sp, -12           # Se restablece el stack
    mret                       # Retorno de una excepción para RISC-V (usado para ISRs)
```

Dispositivos I/O - Modos de comunicación

- **Polling:** La CPU consulta con cierta frecuencia el estado de un dispositivo para saber si debe realizar una acción.
Ej: Programa en RISC-V que espera a que una impresora prenda para imprimir.

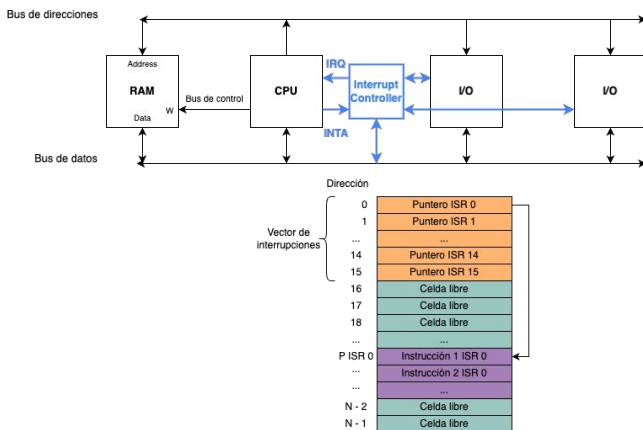
```
.text
main:
    li t0, 112
    lw t1, 0(t0)           # t0 = 0x70 = Registro de estado de una impresora
    li s0, 1
    li s1, 3
    beq t1, s0, print     # Estado 1 = Prendida.
    beq t1, s1, waitTurnOn # Estado 3 = Prendiendo.
    beq t1, s0, print      # Está prendida, imprimimos.
    beq t1, s1, waitTurnOn # Está prendiendo, esperamos a que prenda.
    j end

waitTurnOn:
    lw t1, 0(t0)
    beq t1, s0, print
    j waitTurnOn           # Si todavía no está prendida, repetimos la pregunta.

print:
    ...
...
```

- **Interrupciones:** Los dispositivos I/O solicitan una “interrupción” que gatilla una **Interrupt Subroutine** o **ISR** para realizar una acción. Esta solicitud la envían como una señal **Interrupt Request** o **IRQ** al **controlador de interrupciones**, que se encarga de solicitar la atención de la CPU. Si es atendida, la CPU envía la señal **Interrupt Acknowledge** o **INTA** y el controlador le envía de vuelta el **identificador del dispositivo** para acceder a la dirección de su ISR desde el **vector de interrupciones**.

La CPU requiere de una **Interrupt Flag** o **IF** para saber cuándo está atendiendo una interrupción (**IF = 1** → CPU disponible para atender interrupciones).



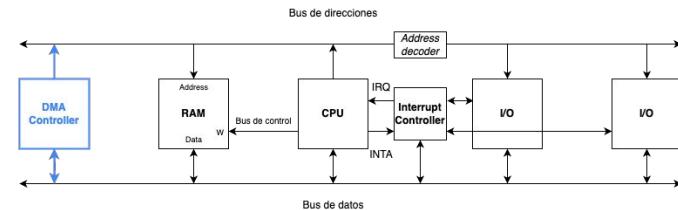
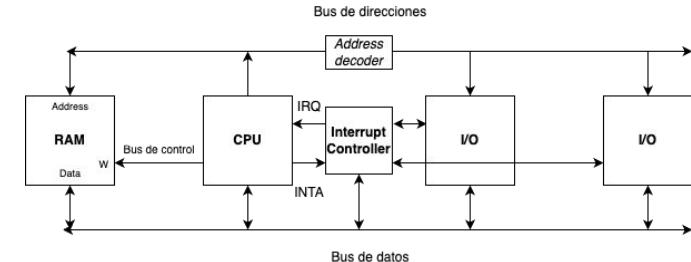
Dispositivos I/O - Modos de comunicación

■ Tipos de interrupción

- **Excepciones:** Condiciones de error al ejecutar una instrucción atendidas por el sistema operativo a través de ISRs específicas: ***exception handlers***. **Ejemplos:** división por cero, *stack overflow*.
- **Traps:** Llamadas explícitas al sistema operativo que gatillan interrupciones que le ceden el control a este para que realice una acción. **Ejemplo en RISC-V:** `ecall`

Dispositivos I/O - Transferencia de datos

- **Programmed I/O (PIO):** La CPU se encarga de gestionar la transferencia de datos a través de subrutinas que solo tienen ese fin. Cuenta con la desventaja de que los dispositivos I/O solo necesitan acceder a la memoria de datos (RAM), no requieren de procesamiento en la CPU.
- **Direct Memory Access (DMA):** Controlador con acceso al bus de datos que se encarga de gestionar la transferencia de datos entre la RAM y los dispositivos I/O. Solo notifica a la CPU del inicio y del término de la transferencia, permitiendo que esta ejecute otras tareas.



* El controlador DMA solo puede interactuar con dispositivos I/O *memory mapped*.

Caché

- Contenido que encuentran en:

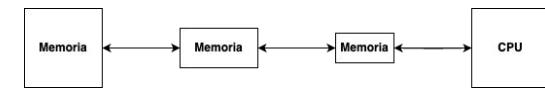
- **Clase 10 - Jerarquía de Memoria y Memoria Caché**
- **10 - Jerarquía de Memoria y Memoria Caché (Apuntes)**

My CPU when the L1 cache misses



Caché - Definiciones

- **Jerarquía de memoria:** En vez de conectarse con una única unidad de memoria, la CPU se comunica con una jerarquía de unidades conectadas entre sí que van aumentando en tamaño, pero disminuyendo en velocidad de transferencia.
- **Principios de localidad:** Se opta por partir con una unidad de memoria pequeña pero rápida (**memoria caché**) ya que al programar se cumplen **dos principios de localidad**:
 - **Espacial:** Si accedo a una dirección de memoria, probablemente acceda a datos **cercanos** a ella.
 - **Temporal:** Si accedo a una dirección de memoria, probablemente acceda a ella de nuevo **en el corto plazo**.

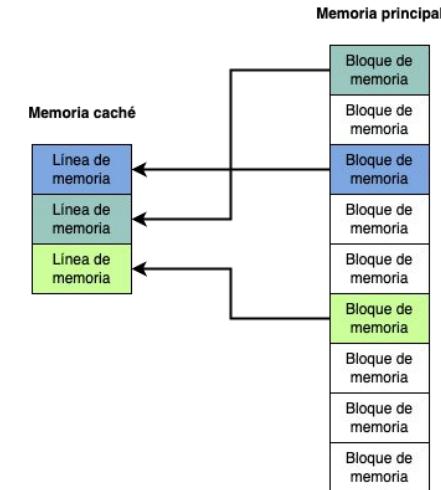


```
.data
arr: .word 1, 0, 6, 12, 1
len: .word 5
index: .word 0
avg: .word 0
.text
main:
    lw t0,index
    lw t1,len
    lw t2, avg
    la t3, arr
    while:
        beq t0, t1, end
        lw t4, 0(t3)
        add t2, t2, t4
        addi t0, t0, 1
        addi t3, t3, 4
        j while
    end:
        div t2, t2, t1
        la t5, avg
        sw t2, (t5)
```

* En este ejemplo de código, se evidencia en naranja el principio de localidad espacial porque al acceder al valor de un arreglo, es probable (y acertado) que acceda a las direcciones contiguas, correspondientes a sus otros elementos. En morado se evidencia el principio de localidad temporal porque al acceder al índice y largo del arreglo, es probable (y acertado) que acceda a sus direcciones de nuevo para usar sus datos de nuevo (en este caso, para finalizar la iteración).

Caché - Definiciones

- **Caché:** Corresponde a la memoria más cercana a la CPU en la jerarquía. Se divide físicamente en **líneas** que almacenan **bloques de la memoria principal**, que son una división lógica de la RAM. Ambos deben poseer el mismo tamaño.
- **Controlador de caché:** Componente que se encarga de realizar las operaciones de búsqueda de datos en la caché y la transferencia de bloques de la memoria principal a las líneas en caso de no encontrarse el dato. Esto permite que la CPU solicite datos de memoria sin tener conocimiento de la existencia de la jerarquía. Posee dos funciones principales: **mecanismo de acceso a datos** (mapeo de bloques a líneas) y **política de escritura** (actualización de datos de la caché y la memoria principal).



* La transferencia de bloques de memoria contiguos a la caché aprovecha el principio de localidad espacial. Adicionalmente, cada línea de la caché cuenta con un bit de validez que indica si su contenido es válido o no para ser utilizado. Por defecto todas las líneas parten con este bit en cero.

Caché - Controlador de caché

El mecanismo de acceso de datos del controlador se define a través de dos criterios:

- **Función de correspondencia:** Criterio de asociación (o mapeo) de un bloque de memoria a una línea de la caché.
- **Política de reemplazo:** Criterio de línea a reemplazar para sobreescribir un bloque de memoria en caso de tener la caché llena. En este caso se busca aprovechar el **principio de localidad temporal**.

Caché - Funciones de correspondencia

Fórmula utilizada para asociar un bloque a una caché. Depende de:

- Tamaño de línea de caché (en palabras de memoria - bytes).
- Cantidad de líneas en la caché.
- Tamaño de la memoria principal (cantidad de direcciones).

Salvo que se indique lo contrario, **se asumirá que una palabra de memoria es de 1 byte**. Veremos las tres funciones estudiadas usando de ejemplo una memoria principal de 16 bytes (2^4 direcciones, 4 bits de dirección) y una caché de 8 bytes con líneas de 2 bytes (2^1 palabras por línea, 1 bit de offset).

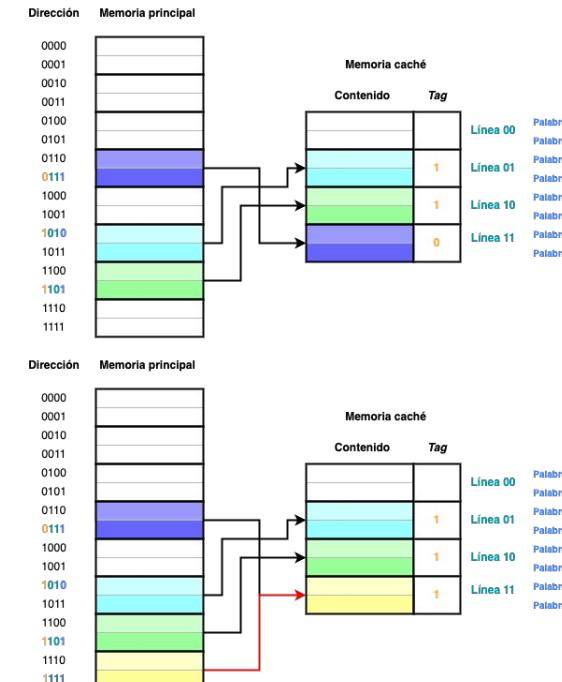
Caché - Funciones de correspondencia

Directly Mapped: Un bloque de memoria se puede asociar únicamente a una línea de la caché. Los bits de una dirección se separan de la siguiente forma: **tag|id línea|offset**

Si tenemos 4 líneas, usamos $\log_2(4) = 2$ bits para el índice de línea.

Ej: Dirección 7 = **0111** → Su bloque se almacena en la línea 11.

* El **tag** corresponde al identificador del bloque dentro de una línea. Por construcción, para todas las funciones es el que nos permite identificar de forma certera si un bloque se encuentra contenido en la caché o no.



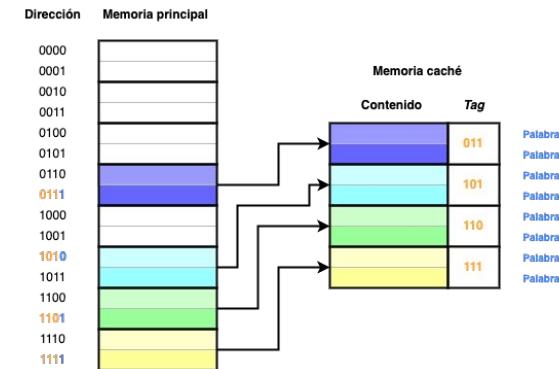
* En esta función no se utilizan políticas de reemplazo, si otro bloque necesita copiarse a la caché y se mapea en una línea ocupada, se sobreescribe (como se muestra en la imagen).

Caché - Funciones de correspondencia

Fully associative: Un bloque de memoria se puede asociar a cualquier línea de la caché. Los bits de una dirección se separan de la siguiente forma: **tag|offset**

Como tenemos un bit de *offset*, el resto será utilizado para el *tag*.

Ej: Dirección 7 = **0111** → Su *tag* es 011 y puede encontrarse en cualquier línea.



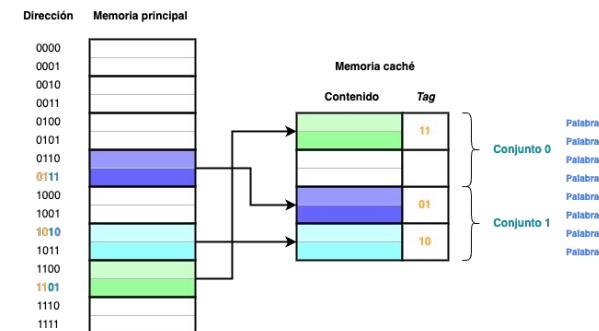
* La desventaja de esta función es que se deben recorrer todas las líneas de la caché para poder determinar si el bloque al que pertenece una dirección de memoria se encuentra disponible o no.

Caché - Funciones de correspondencia

N-way associative: La caché se agrupa en conjuntos de N líneas y un bloque de memoria se puede asociar a cualquier línea dentro del conjunto al que pertenece. Los bits de una dirección se separan de la siguiente forma:
tag|id conjunto|offset

Para 2-way associative, contamos con $4 \div 2$ conjuntos, por lo que su id usa $\log_2(2) = 1$ bit.

Ej: Dirección 7 = **0111** → Su tag es 01 y puede encontrarse en cualquier línea del conjunto 1.



* Esta es la más usada en la práctica por ser la más equilibrada entre las ventajas de *directly mapped* y *fully associative*.

En esta función, siempre se tiene que:

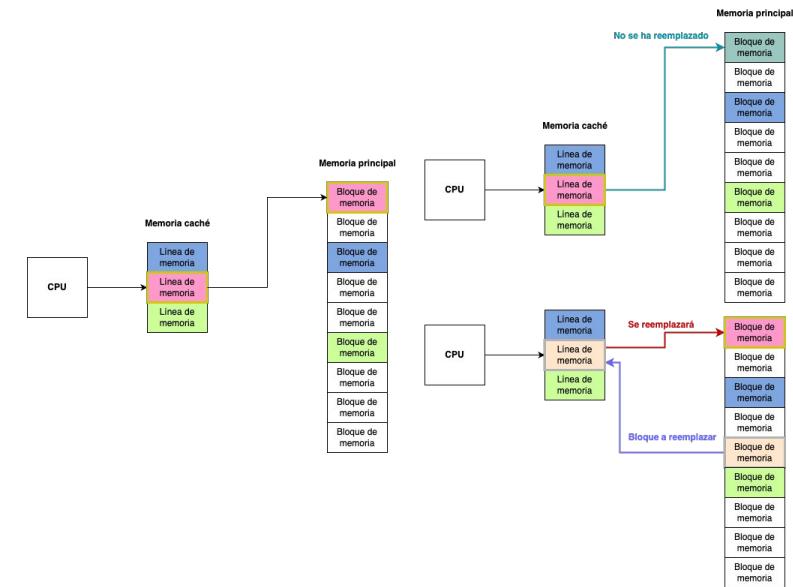
$$\# \text{ Conjuntos} = \# \text{ Líneas} \div N$$

Caché - Políticas de reemplazo

- **Bélády:** Se saca el bloque que se utilizará más lejos en el futuro. **Ideal no alcanzable en la práctica.**
- **First-In First-Out (FIFO):** El primer bloque en entrar es el primero en salir.
- **Least Frequently Used (LFU):** El bloque con menos accesos se saca.
- **Least Recently Used (LRU):** El bloque con mayor tiempo sin accesos se saca. **¡El más usado en la práctica!**
- **Random:** Rápido, con rendimiento inferior a LFU/LRU pero mejor que FIFO.

Caché - Políticas de escritura

- **Write-through:** Si se modifica un bloque de memoria contenido en la caché, se actualiza inmediatamente en la memoria principal.
- **Write-back:** Si se modifica un bloque de memoria contenido en la caché, se actualiza en la memoria principal solo al momento de ser reemplazado.



Ejemplo de *write-through* vs. *write-back*.

Caché - Tipos de memoria

- **Caché unified:** Mezcla en sus líneas bloques de datos con bloques de instrucciones.
- **Caché split:** Separa la mitad de sus líneas para almacenar bloques de datos y utiliza el resto para bloques de instrucciones.

Esta división interesa en computadores **Von Neumann** que poseen una única unidad de memoria.

Caché - Evaluación de una memoria caché

Las memorias caché se evalúan a partir del tiempo de acceso promedio, que se rige a partir de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} TP &= HR * HT + (1 - HR) * (HT + MP) \\ &= HT + (1 - HR) * MP \end{aligned}$$

- TP = Tiempo promedio de acceso
- HR = *Hit rate* promedio ($\# \text{ Hits} \div \# \text{ Accesos}$)
- HT = *Hit time*, tiempo promedio de acceso en la caché
- MP = *Miss penalty*, tiempo adicional para buscar el bloque de memoria en caso de *miss*.

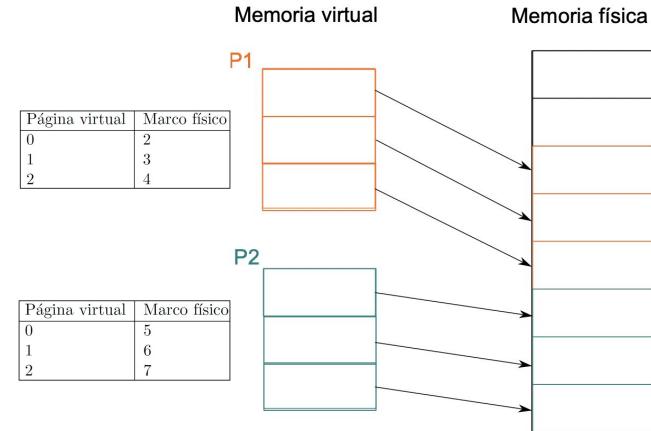
Multiprogramación

- Contenido que encuentran en:
 - **Clase 11 - Multiprogramación**
 - **11 - Multiprogramación (Apuntes)**



Multiprogramación - Memoria virtual

- Los procesos (programas en ejecución) hacen uso de **direcciones virtuales**, un espacio direccionable que posteriormente se traduce a **direcciones físicas** (direcciones reales de la memoria principal). Esto permite la ejecución de múltiples procesos sin necesidad de asignarles espacios de memoria limitados.
- **Memory Management Unit (MMU):** Unidad encargada de hacer las traducciones de direcciones virtuales a las direcciones físicas asignadas a cada proceso a través de **esquemas de paginación**, donde cada uno de estos posee una **tabla de páginas** que almacena las asociaciones.

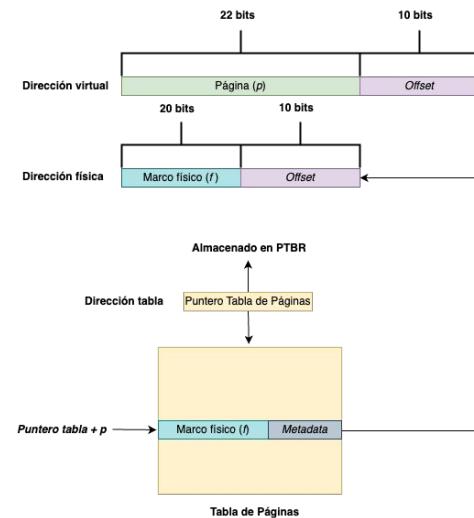


* En un esquema de paginación, una página virtual (bloque contiguo del espacio direccionable virtual) se asocia a un marco físico (bloque contiguo del espacio direccionable físico). Esta división por bloques es similar a la utilizada en la caché y permite almacenar una cantidad de información significativamente menor para llevar a cabo las traducciones (se traducen bloques completos con una sola entrada en vez de una única dirección).

Multiprogramación - Traducción de dirección virtual a física

En un esquema de direccionamiento virtual, siempre conoceremos el tamaño del espacio, del que se deduce la cantidad de bits de una dirección virtual. Luego, usamos el **tamaño de página** para obtener los **bits de offset** $-\log_2(\text{Tamaño página en bytes})$. Separamos los bits de la dirección virtual así: **número de página|offset**

Utilizamos el número de página como índice de la tabla de páginas del proceso que solicita la dirección para acceder a la entrada que poseerá los **bits de marco físico**. Finalmente, se reemplaza el número de página por estos bits para obtener la dirección física: **número de marco|offset**



* Ejemplo de traducción para direcciones virtuales de 32 bits, direcciones físicas de 30 bits y tamaño de página de 1KB. En este caso, se requiere de un registro especial: *Page Table Base Register (PTBR)*. Este almacena la dirección de la tabla de páginas del proceso que esté corriendo en la CPU.

Multiprogramación - Bits de *metadata*

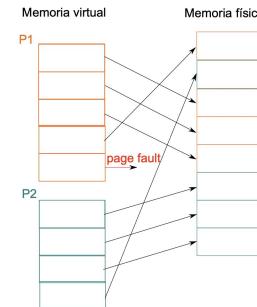
Cada entrada de la tabla de páginas poseen bits de *metadata* que entregan información relevante respecto a la traducción:

- ***Valid bit***: Indica si la entrada en la tabla de páginas es válida o no. Si no es válida, la página **no posee un marco físico asociado**.
- ***Present bit***: Indica, para una entrada válida, si el contenido de la página está en un marco físico o si está en el ***swap file*** (disco).
- ***Dirty bit***: Indica si el contenido de la página se ha modificado o no. Si no es el caso, en caso de ***swap out*** no se copia el contenido al ***swap file***.

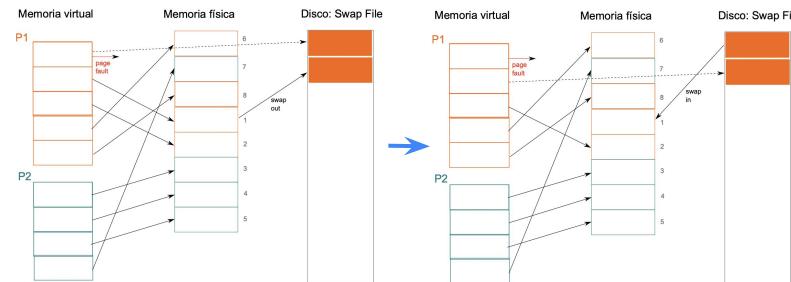
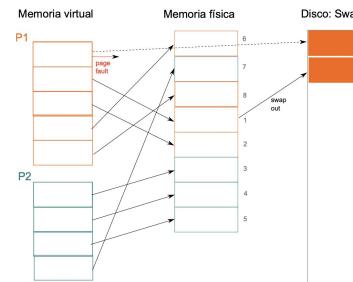
Multiprogramación - *Page fault*

Al momento de buscar el marco físico para una página, incurrimos en un ***page fault*** si:

- La página no posee un marco físico asociado (*Valid bit* = 0).
- La página posee un marco físico, pero se encuentra en el *swap file* (*Valid bit* = 1, *Present bit* = 0).



* ***Page fault*** por marco físico no asociado a la página.



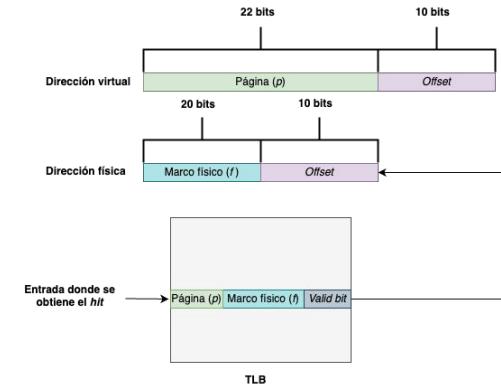
| Página virtual | Marco físico | Validez | Disco |
|----------------|--------------|---------|-------|
| 0 | 3 | 1 | 0 |
| 1 | 3 | 1 | 1 |
| 2 | 4 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 2 | 1 | 0 |
| 5 | x | 0 | 0 |
| 6 | x | 0 | 0 |
| 7 | x | 0 | 0 |

* ***Page fault*** por marco físico ubicado en el *swap file*. El marco físico a reemplazar se guarda en el *swap file* (*swap out*) y luego se trae de vuelta el marco solicitado (*swap in*). Se utilizan las mismas políticas de reemplazo estudiadas en la caché.

Multiprogramación - *Translation Lookaside Buffer*

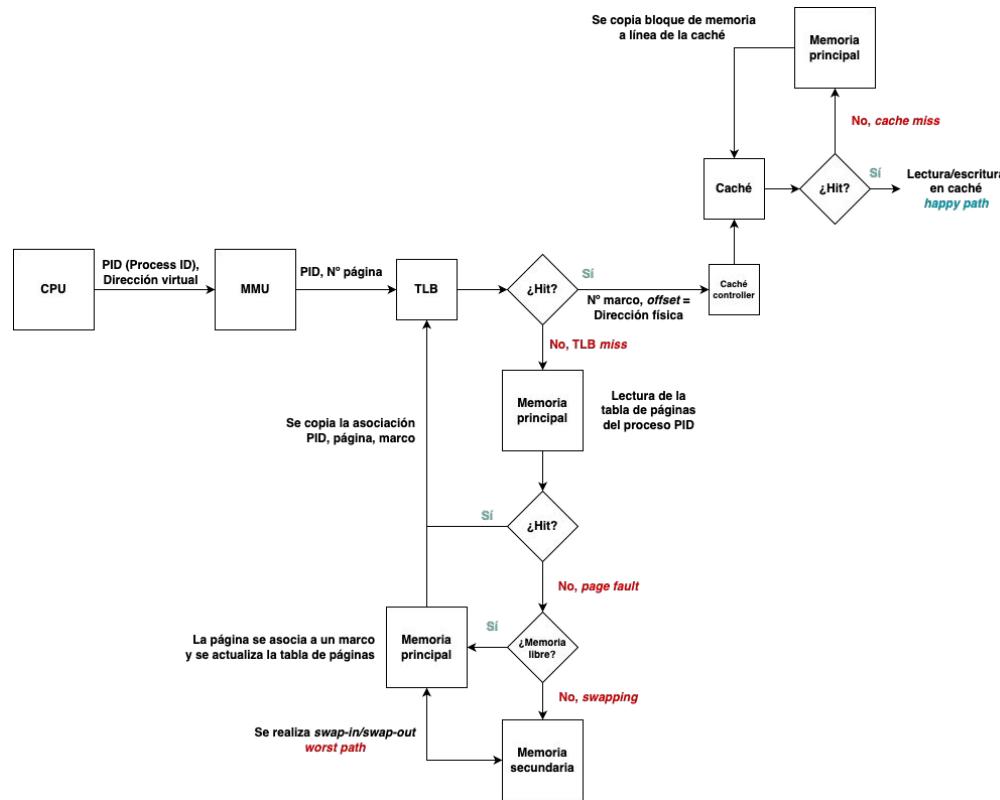
Al usar memoria virtual, se requieren dos accesos a memoria (uno para acceder a la tabla de páginas y otro para obtener el dato). Para reducir los tiempos de acceso, se usa una caché *fully associative* llamada ***Translation Lookaside Buffer (TLB)***. Esta almacena para cada una de sus entradas:

- Bits del número de página como **tag**.
- Bits del número de marco como **contenido**.
- Bit de validez.



* Ejemplo de traducción para direcciones virtuales de 32 bits, direcciones físicas de 30 bits y tamaño de página de 1KB haciendo uso de una TLB.

Multiprogramación - Flujo de acceso de memoria completo



Multiprogramación - Tamaño de tablas de página

Como cada proceso posee su propia tabla de páginas, es importante conocer la forma de calcular su tamaño y considerar esquemas de paginación alternativos para reducirlo. Este se calcula con las siguientes fórmulas:

$$\text{Tamaño tabla de páginas} = \#PTE * \text{sizeof(PTE)}$$

- $\#PTE = \# \text{ Páginas} = 2^{\#\text{Bits número de página}}$
- $\text{sizeof(PTE)} = \#\text{Bits número de marco} + \#\text{Bits metadata}$

Para efectos prácticos:

- 1 byte = 1B
- $2^{10}B = 1KB$
- $2^{20}B = 2^{10} KB = 1MB$
- $2^{30}B = 2^{10} MB = 1GB$
- $2^{40}B = 2^{10} GB = 1TB$

Ejemplo:

- Direcciones virtuales de 32 bits
- Direcciones físicas de 30 bits
- Tamaño de página 1KB ($\#\text{Bits offset} = \log_2(2^{10}) = 10$)
- $\#\text{Bits metadata} = 4$

$$\#\text{Bits número de página} = \#\text{Bits dirección virtual} - \#\text{Bits offset} = 22$$

$$\#\text{Bits número de marco} = \#\text{Bits dirección física} - \#\text{Bits offset} = 20$$

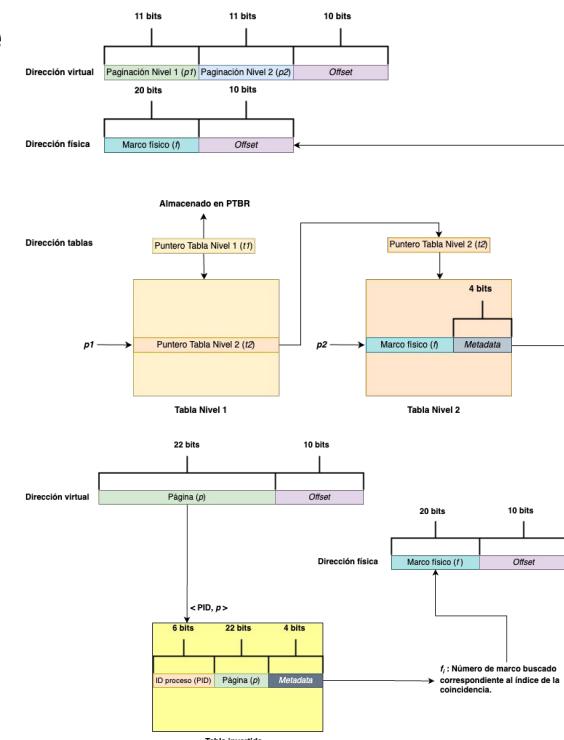
$$\text{sizeof(PTE)} = 20 + 4 = 24b = 3B$$

$$\#PTE = 2^{22}$$

$$\text{Tamaño tabla de páginas} = 2^{22} * 3B = 2^2 * 3 * 2^{20} B = 12MB$$

Multiprogramación - Esquemas de paginación alternativos

- Paginación multinivel:** Los bits de número de página se dividen por **niveles**. Cada segmento de bits corresponde al índice de la tabla de un nivel. Solo la tabla del último nivel posee la traducción de la dirección virtual, el resto posee punteros físicos a la tabla del nivel siguiente. Este esquema **reduce significativamente el tamaño usado de tablas de páginas por proceso.**
- Tabla de páginas invertida:** Se utiliza una única tabla para todos los procesos. El índice de cada entrada corresponde al número de marco físico de la traducción (por ende, tiene tantas entradas como marcos físicos existan).



ILP

- Contenido que encuentran en:
 - **Clase 12 - Paralelismo a Nivel de Instrucción (ILP)**
 - **12 - Paralelismo a Nivel de Instrucción (ILP) (Apuntes)**

CPU: *predicts wrong execution branch*



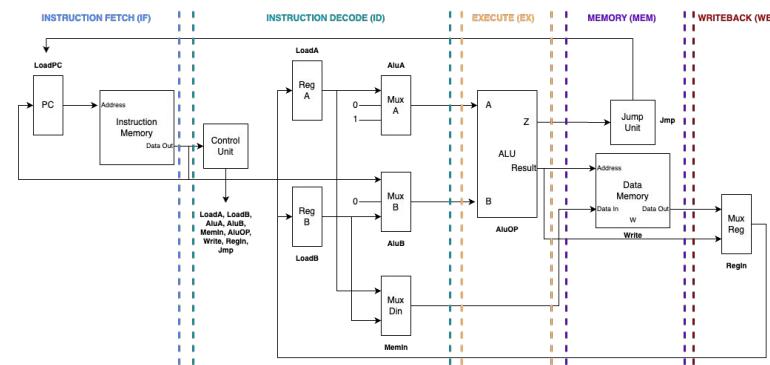
* Perdón por repetir el meme, pero estaba muy bueno.



ILP - Pipeline

Se busca ejecutar instrucciones **simultáneamente** en el computador básico. Para ello, primero se simplifica la arquitectura de forma que pueda separarse en **cinco etapas independientes**:

- ***Instruction Fetch (IF)***: Obtención del *opcode* y el literal de la memoria de instrucciones.
- ***Instruction Decode (ID)***: Decodificación del *opcode* en señales de control y selección de *inputs* de la ALU.
- ***Execute (EX)***: Ejecución de la ALU.
- ***Memory (MEM)***: Lectura o escritura de la memoria de datos.
- ***Writeback (WB)***: Actualización de registros.



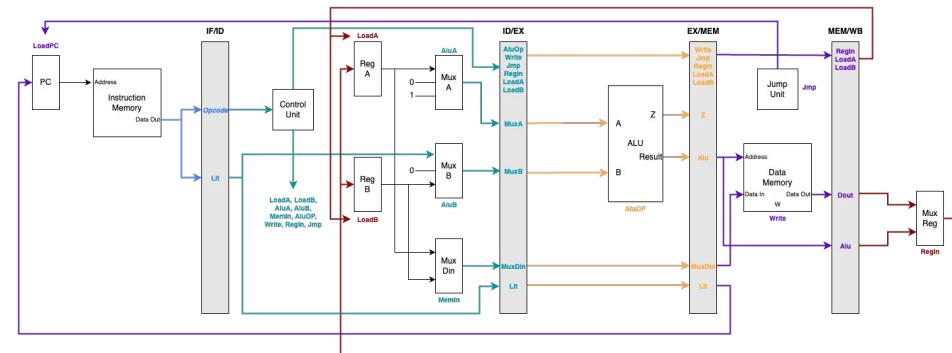
* Con esta simplificación, perdemos:

- Direccionamiento indirecto por registro *B*.
- Memoria de stack.
- Soporte de subrutinas.
- Saltos condicionales: JGT, JLT, JGE, JLE, JOV, JCR.
- Manejo de saltos por la unidad de control (ahora los maneja una unidad de saltos).
- Almacenamiento directo de resultados de la ALU en la memoria de datos (pasa de ser una arquitectura *Register-Memory* a *Register-Register* o *Load-Store*).

ILP - Pipeline

Para poder ejecutar cada etapa de forma separada, se agregan **registros intermedios** que almacenan las señales de control y los resultados de la etapa anterior para usarse en la siguiente etapa. Estos son: IF/ID, ID/EX, EX/MEM, MEM/WB.

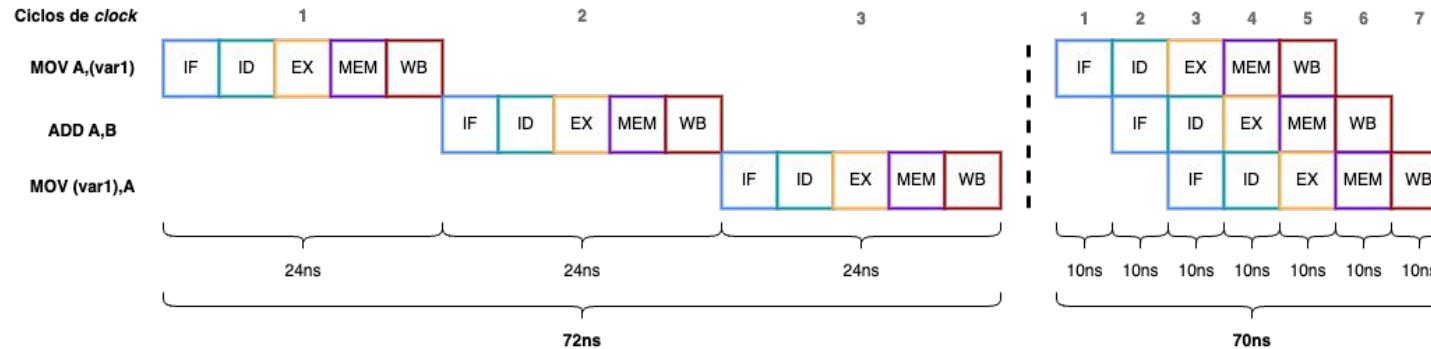
Por esta estructura, naturalmente ahora cada instrucción toma 5 ciclos en ejecutarse, pero cada ciclo toma menos tiempo de ejecución respecto a los del computador básico.



* Las observaciones más importantes:

- Las señales LoadA y LoadB que actualizan los registros provienen de la etapa WB y no de la unidad de control, estos se almacenan en el registro intermedio para propagarse y usarse al final.
- La señal LoadPC utilizada para saltos proviene de la **Jump Unit** en la etapa MEM.
- Al igual que cualquier otro registro, los registros intermedios se actualizan por flanco de subida.

ILP - Ejecución de instrucciones en el *Pipeline*



Como se observa en la imagen, cuando la primera instrucción pasa de IF a ID, la segunda puede empezar su ejecución en IF. Con 3 instrucciones se observa una disminución de tiempo, en programas reales la disminución es **muy significativa**.

ILP - Hazards

Corresponden a problemas que surgen de la dependencia natural entre instrucciones. Existen tres tipos:

- **Hazards de datos:** Ocurren cuando existen dependencias de datos entre instrucciones.
- **Hazards de control:** Ocurren con el control de flujo, i.e. con las instrucciones de salto.
- **Hazards estructurales:** Ocurren cuando dos etapas necesitan una misma unidad al mismo tiempo (**Ej:** IF y MEM en Von Neumann). **No existen en el computador básico con pipeline.**

ILP - Hazards de datos

Caso 1: Dependencia de datos entre dos instrucciones contiguas.

Resolución: **Forwarding** del resultado desde el registro EX/MEM a EX.

Detección: EX/MEM.LoadX == 1 and ID/EX.AluX == X, X = A/B

Caso 2: Dependencia de datos entre una instrucción y la previa a la anterior.

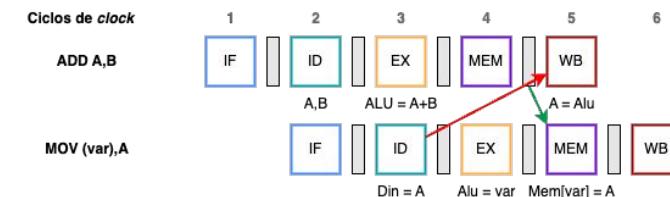
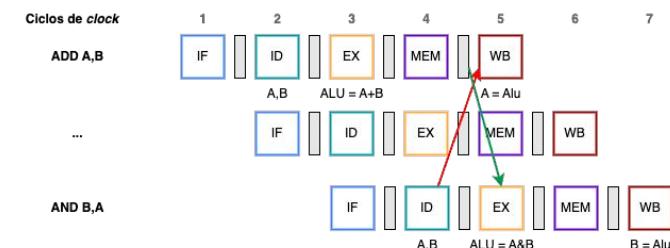
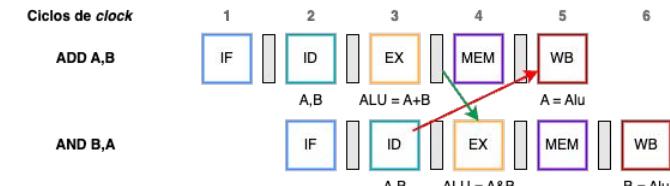
Resolución: **Forwarding** del resultado desde el registro MEM/WB a EX.

Detección: MEM/WB.LoadX == 1 and ID/EX.AluX == X and
EX/MEM.LoadX == 0, X = A/B

Caso 3: Dependencia de datos entre instrucciones contiguas con escritura de memoria.

Resolución: **Forwarding** del resultado desde el multiplexor Mux Reg a la etapa MEM.

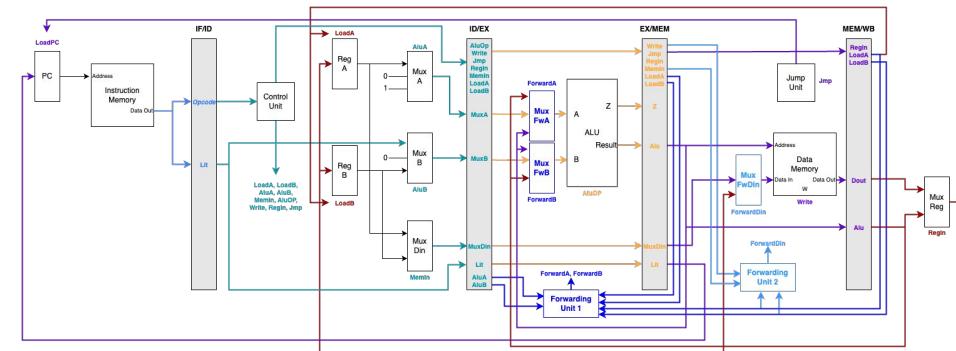
Detección: MEM/WB.LoadX == 1 and EX/MEM.MemIn == X
and EX/MEM.Write == 1, X = A/B



ILP - *Hazards* de datos

Para resolver los casos anteriores, se añaden las ***Forwarding Units***, encargadas de detectar los *hazards* antes señalados y transmitir el resultado correcto si corresponde.

Asimismo, se añaden los multiplexores FwA, FwB y FwDin para poder seleccionar el valor que corresponda si es que existe o no un *hazard*.



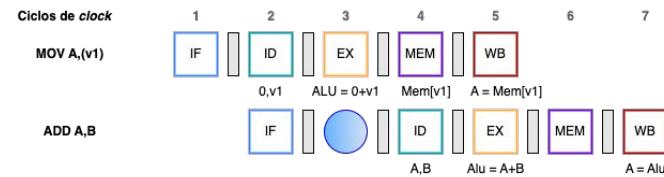
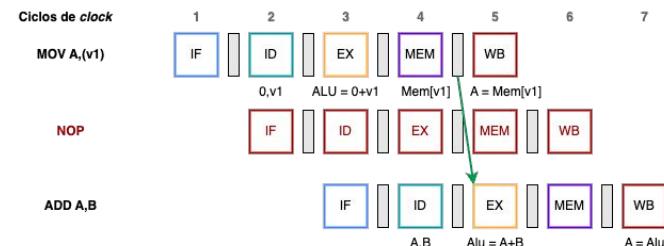
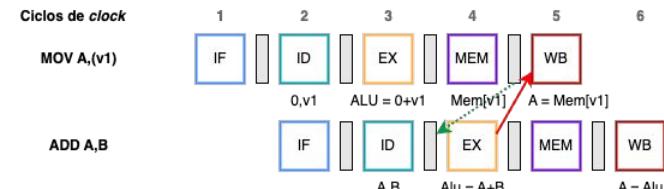
ILP - Hazards de datos

Caso 4: Dependencia de datos entre instrucciones contiguas con lectura de memoria.

Resolución: *Stalling* de un ciclo vía *software* (NOP) o *hardware* (inserción de burbuja) para resolver posteriormente con *forwarding*.

Detección: ID/EX.LoadX == 1 and ID/EX.RegIn == Dout
and ID.AluX == X, X = A/B

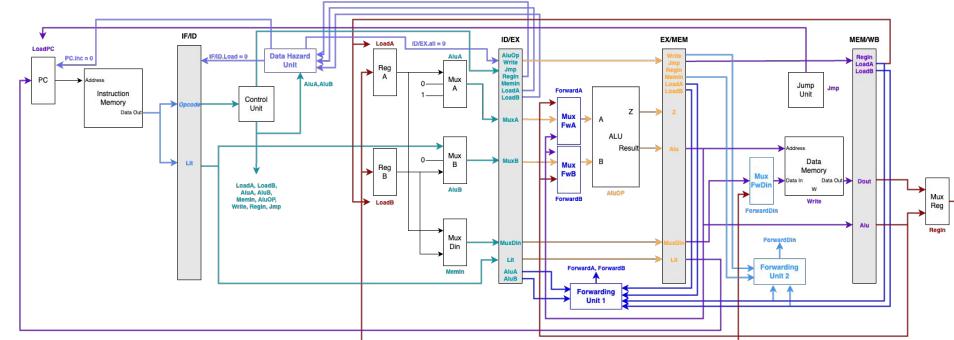
Este caso requiere la espera de un ciclo ya que el dato se obtiene al final de la etapa MEM, instante en que la instrucción anterior ya utilizó la unidad de ejecución.



ILP - *Hazards de datos*

Para resolver el caso anterior, se añade la **Data Hazard Unit**, encargada de insertar una burbuja y evitar por un ciclo el incremento del *Program Counter* para así alcanzar a resolver el hazard.

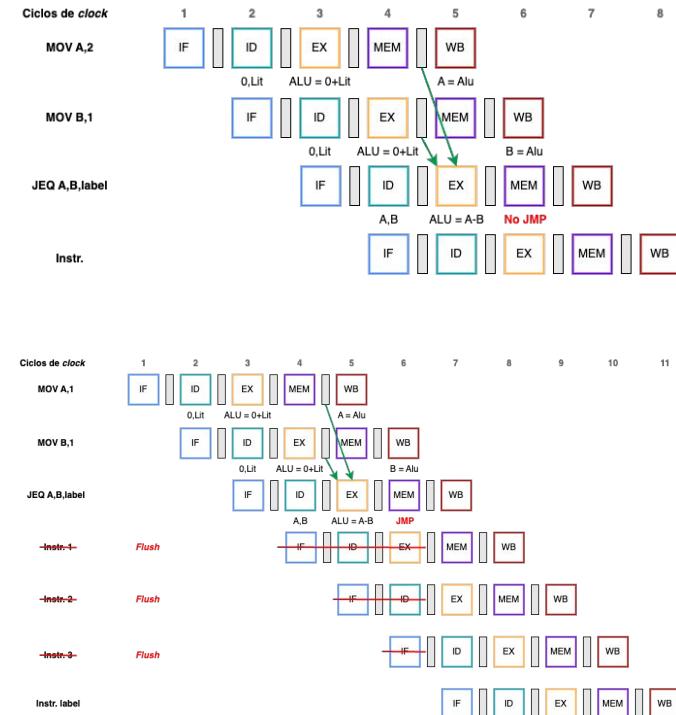
Si bien es importante conocer la unidad, en general estos casos los resolveremos por *software*.



ILP - Hazards de control

Ocurren con las instrucciones de salto. Estos se resuelven en MEM, i.e. después de tres ciclos de ejecución. Por eso, es necesario tomar una decisión respecto a qué instrucción ejecutar después. Se opta por utilizar una **unidad predictora de saltos** que decide si realizar el salto de inmediato o no. En caso de equivocarse (lo que se detecta en MEM), se debe hacer **flushing**, i.e. desechar el avance de las tres instrucciones ejecutadas erróneamente para comenzar con la ejecución de la instrucción correcta.

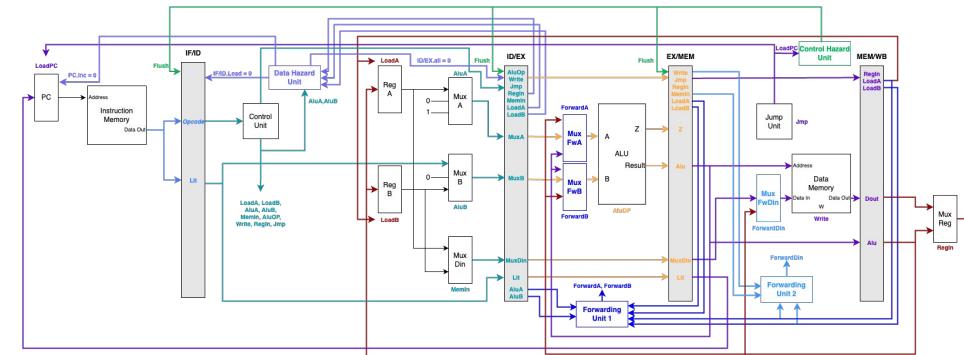
En el computador básico con *pipeline*, por simplicidad usaremos una unidad predictora de saltos que **siempre predice que este no ocurre**, en otro caso sería más complejo implementar en *hardware*.



ILP - *Hazards de control*

Para realizar ***flushing***, se añade la ***Control Hazard Unit***, encargada de realizar *reset* de los registros intermedios para evitar la ejecución efectiva de las instrucciones erróneas.

Esta corresponde a la versión completa del computador básico con *pipeline*.



ILP - ISA del computador básico con *pipeline*

| Instrucción | Operandos | Operación | Condiciones | Ejemplo de uso |
|-------------|-----------|-----------------|-------------|----------------|
| MOV | A,B | A=B | | - |
| | B,A | B=A | | - |
| | A,Lit | A=Lit | | MOV A,15 |
| | B,Lit | B=Lit | | MOV B,15 |
| | A,(Dir) | A=Mem[Dir] | | MOV A,(var1) |
| | B,(Dir) | B=Mem[Dir] | | MOV B,(var2) |
| | (Dir),A | Mem[Dir]=A | | MOV (var1),A |
| | (Dir),B | Mem[Dir]=B | | MOV (var2),B |
| | A,(B) | A=Mem[B] | | - |
| | B,(B) | B=Mem[B] | | - |
| ADD | (B),A | Mem[B]=A | | - |
| | A,B | A=A+B | | - |
| | B,A | B=A+B | | - |
| | A,Lit | A=A+Lit | | ADD A,5 |
| | SUB | A,B | A=A-B | - |
| | | B,A | B=A-B | - |
| | A,Lit | A=A-Lit | | SUB A, 2 |
| AND | A,B | A=A and B | | - |
| | B,A | B=A and B | | - |
| | A,Lit | A=A and Lit | | AND A,15 |
| OR | A,B | A=A or B | | - |
| | B,A | B=A or B | | - |
| | A,Lit | A=A or Lit | | OR A,5 |
| NOT | A,A | A=notA | | - |
| | B,A | B=notA | | - |
| XOR | A,A | A=A xor B | | - |
| | B,A | B=A xor B | | - |
| | A,Lit | A=A xor Lit | | XOR A,15 |
| SHL | A,A | A=shift left A | | - |
| | B,A | B=shift left A | | - |
| SHR | A,A | A=shift right A | | - |
| | B,A | B=shift right A | | - |
| INC | B | B=B+1 | | - |
| JMP | Dir | PC = Dir | JMP end | |
| JEQ | Dir | PC = Dir | Z=1 | JEQ label |
| JNE | Dir | PC = Dir | Z=0 | JNE label |
| NOP | | | | |

* Si bien se asume que JEQ y JNE se realizan con la comparación entre los registros A y B, en los ejemplos de este material se explicitan ya que en teoría es posible ejecutarlos con el literal.

FIN

Mi familia y yo les damos las gracias por su asistencia a clases y su interés en el curso. ❤️😊



Créditos animalísticos



Luco y Lúa
(Raimundo Silva)



Mango
(Santiago Ernst)



Igor
(Cristina Antón)



Pugwie y Arigato
(Germán Contreras)



Benito
(Lucas Palacios)



Bimba y Mozzarella
(Pablo Baldazzi)



Milo, Milo chiquito y Tony
(Tomás López)



Perry
(Ariadna Sofía Camino)



Luna†
(Elías Obreque)



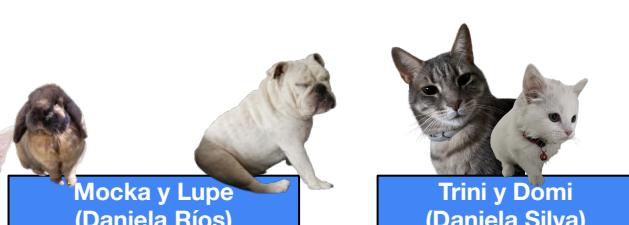
Neko
(Denisse Leiva)



Cleopatra y Ra
(Ana Romero)



Cromis, Luna, Petra y Ramiro
(Joaquín Peralta)



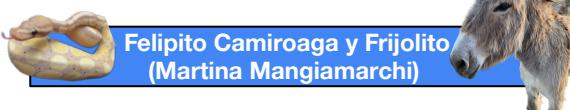
Mocka y Lupe
(Daniela Ríos)



Trini y Domi
(Daniela Silva)



Chin Chan y Shiro
(Ignacio Aguilera)



Felipito Camiroaga y Frijolito
(Martina Mangiamarchi)



Créditos animalísticos

Minecraft
(Randall Biermann)



Kili
(Francisco García)



Sparky
(José Mendoza)



Archie
(Juan Carlos Duarte)



Benito y Chimu
(Giacomo Pasquali)



Fito y Mimi
(Gustavo Selman)



Boris
(Noemí Novoa)



Simba
(Juan José Vergara)



Tasio
(Paulina Zavala)



Sokka
(Javiera Pinto)



Maki
(Agustín Suazo)



Wiki
(Emilia Ureta)



Paquito
(Alan Gornall)



Rosita Maria
(Javiera Norambuena)



Trudy
(Alister MacCormack)



Otto y Mia
(Paulina Collantes)



DCC
DEPARTAMENTO DE CIENCIA
DE LA COMPUTACIÓN

IIC2343

Arquitectura de Computadores

Clase 13 - Resumen del Curso

Profesor: Germán Leandro Contreras Sagredo