

Arquitectura de computadoras

10 de noviembre de 2017

Arquitectura y Organización de Computadoras

¿Cómo **definimos** una computadora? ¿Cuándo un dispositivo es una computadora y cuándo decimos que no lo es? En esta unidad, vemos estos temas y estudiamos los diferentes componentes que tienen las computadoras.

Componentes de una computadora simple

En primer lugar, una **memoria principal**, que es donde se almacenan todos los datos y las instrucciones de programa. Todo lo que puede hacer la computadora, lo hace únicamente con contenidos que estén en la memoria. Para poder procesar un dato, primero hay que hacerlo llegar a la memoria principal, no importa de dónde venga. Un conjunto de datos puede estar en disco, en un pendrive, o ser introducido por el teclado, pero sólo cuando llega a la memoria principal es que puede ser procesado por la CPU.

La **CPU, o Unidad Central de Procesamiento**, es el componente que realmente lleva a cabo los cálculos. Trabaja leyendo instrucciones y datos de la memoria; y ejecuta esas instrucciones que operan sobre esos datos. Vamos a hablar mucho más sobre la CPU en esta unidad.

Los **dispositivos de Entrada y Salida** son todos aquellos dispositivos que conectamos a la computadora para hacer que el conjunto CPU + Memoria se comunique con el ambiente.

- Con dispositivos como el teclado, mouse, o tableta digitalizadora, podemos introducir datos. Son dispositivos de **entrada**.
- Con dispositivos como pantalla o impresora, podemos hacer que la computadora presente los resultados de los cálculos y los entregue al usuario. Son dispositivos de **salida**.
- Algunos dispositivos son de entrada y salida a la vez, como la tarjeta de red.

Todos estos componentes, y muchos otros que pueden estar o no presentes, dependiendo de la **arquitectura**, o modo de construcción, de la computadora, están conectados entre sí mediante **buses** o líneas de interconexión.

Memoria

La memoria es un componente fundamental de la computadora. Está implementada con circuitos que pueden estar en uno de dos estados eléctricos, y por esto los llamamos **biestables**.

Cada circuito biestable puede almacenar la información correspondiente a un **bit**. Los bits están agrupados de a ocho formando los **bytes**. Estos circuitos, con las tecnologías de hoy, están super miniaturizados y contienen muchos millones de posiciones donde se pueden almacenar temporariamente los datos y las instrucciones de programa.

Para poder utilizar la memoria es imprescindible conocer el número, o **dirección**, de la posición de memoria donde está el dato o instrucción que se necesita acceder. Con esta dirección podemos **recuperar**, es decir, **leer**, el valor que está alojado en ese byte de la memoria, o escribir sobre ese byte un contenido de ocho bits.

CPU

La CPU está implementada como un circuito sumamente complejo que contiene **registros**. Éstos son lugares de almacenamiento temporario de datos e instrucciones que se utilizan durante el cómputo.

Si, en un momento dado, sacamos una foto instantánea de una CPU, sus registros tendrán un cierto conjunto de valores. Ese conjunto de valores se llama el **estado** de la CPU. La CPU, mientras opera, va cambiando de estado, es decir, paso a paso va modificando los valores de sus registros hasta llegar a un resultado de cada instrucción.

Por atravesar esta sucesión de cambios de estado, se dice que una CPU es un circuito **secuencial**. Los cambios de estado son disparados por un **reloj**, que es un circuito auxiliar que produce pulsos o impulsos eléctricos que hacen marchar a la CPU.

La CPU puede interpretar un conjunto determinado de instrucciones. Estas instrucciones han sido definidas en su arquitectura; y son las únicas que puede ejecutar. El funcionamiento de la CPU está limitado a estas instrucciones, que son muy básicas, como sumar dos datos, o leer el dato que está en una determinada dirección de la memoria.

Sin embargo, cuando escribimos una secuencia de instrucciones en la memoria, es decir, un **programa**, podemos hacer que la CPU desarrolle otras tareas que no estaban previstas en su arquitectura. Por ejemplo, podemos tener una CPU que no sepa multiplicar o dividir, pero si cuenta con un programa con las instrucciones adecuadas, puede ejecutar operaciones de multiplicación o división de datos.

La CPU está constituida por varios circuitos componentes o unidades funcionales, como la **Unidad de Control** y la **Unidad Lógico-Aritmética**.

- La Unidad de Control es la que contiene la lógica necesaria para **leer** cada instrucción del programa que está en memoria, **ejecutarla**, y pasar a la **siguiente** instrucción. Esta lógica se llama el **ciclo de instrucción** y se repite **continuamente** mientras la CPU está funcionando.
- La Unidad Lógico-Aritmética es la que efectivamente realiza los cálculos con los datos.

Arquitectura de Von Neumann

Máquina de programa almacenado

Por supuesto, además de todos esos componentes que hemos nombrado, hay muchas otras cosas que físicamente forman parte de la computadora; pero la descripción de la computadora que hemos hecho hasta el momento dice, por lo menos en líneas generales, los componentes fundamentales que tiene cualquier computadora actual. Esta descripción puede resumirse diciendo que la computadora es una **máquina de Von Neumann o máquina de programa almacenado**.

En esta clase de máquinas, existe una memoria; que contiene instrucciones y datos; que como contenidos de esa memoria, no se diferencian, salvo por la forma como son utilizados.

Estas máquinas ejecutan las instrucciones almacenadas en memoria secuencialmente, es decir, procediendo desde las direcciones inferiores de la memoria hacia las superiores, leyendo y ejecutando cada instrucción y pasando a la siguiente.

CPU y Memoria

En una **máquina de Von Neumann**, entonces, aparecen dos componentes básicos fundamentales que son la CPU y la memoria,

la primera conteniendo una **Unidad de Control, o UC**, para realizar el **ciclo de instrucción**,

y una **Unidad Lógico-Aritmética, o ALU**, para el cómputo.

Buses

En la máquina existen diferentes clases de buses para interconectar los componentes:

- **buses internos** de la CPU para comunicar la UC y la ALU,

- **buses de sistema** que relacionan la CPU y la memoria,
- y otros **buses de Entrada/Salida** para comunicar todo el sistema con los dispositivos de entrada o de salida.

¿En qué momento se utilizará cada clase de bus?

- Cuando la UC disponga que se debe ejecutar una instrucción, tal como una suma, enviará los datos de partida, y la instrucción, a la ALU a través de un bus interno.
- Si la ALU necesita más datos, los obtendrá de la memoria a través de un bus de sistema.
- Si la CPU encuentra instrucciones que ordenan presentar el resultado del cómputo al usuario, usará un bus de Entrada/Salida para emitir ese resultado por pantalla o por impresora.

Modelo Computacional Binario Elemental

Para comprender desde lo más básico cómo opera la computadora, recurrimos al **MCBE o Modelo Computacional Binario Elemental**, que es una máquina teórica. El MCBE es una computadora extremadamente simple, pero que podría ser implementada físicamente, y funcionaría como la mayoría de las computadoras actuales. Bueno, con muchas menos capacidades, claro, pero manteniendo lo esencial de las computadoras de programa almacenado.

Esquema del MCBE

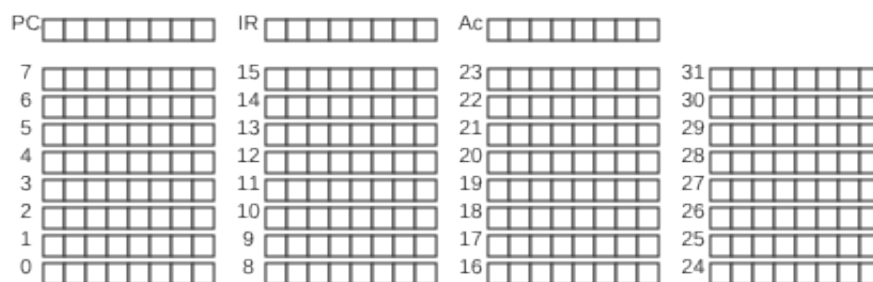


Figura 1: Esquema del MCBE

En este esquema del MCBE vemos los tres registros de la CPU: el **PC o contador de programa**, el **IR o registro de instrucción**, situados en la Unidad de Control,

y el **Acumulador**, situado en la Unidad Lógico-aritmética. Los tres son registros de ocho bits.

Además se representa **la memoria**, compuesta por 32 bytes de ocho bits. Las direcciones de los bytes van, entonces, **de 0 a 31**. Aquí hemos descompuesto la memoria en trozos solamente para poder representarla completa en el esquema, pero conviene pensar en la memoria como una única sucesión de bytes, numerados de 0 a 31. Es costumbre, al representar los diagramas de memoria, ubicar las posiciones con direcciones menores en la parte inferior del diagrama, y las direcciones mayores arriba; como si la memoria fuera una escalera con posiciones numeradas a partir de 0 y ascendiendo.

Estado de la máquina

Cada combinación posible de ceros y unos en los bits de cualquiera de los registros o posiciones de memoria representa un **estado** de la máquina, porque define los valores de la memoria y de los registros en un momento dado. Es decir, el estado de la máquina en cada momento es el conjunto de valores de los tres registros y de los 32 bytes de la memoria.

El estado de la máquina en cada momento define cuál será el estado siguiente. Ninguna otra cosa interviene en el comportamiento de la máquina. En particular, la máquina no tiene voluntad ni toma decisiones propias: solamente cumple el **ciclo de instrucción**, que la hace ejecutar las instrucciones del programa que tenga almacenado.

Memoria del MCBE

Las 32 posiciones de memoria, cada una de 8 bits, son casi todas iguales, con dos excepciones.

- La posición 30 (casi al final de la memoria) está reservada para comunicación con dispositivos de entrada. Es sólo de lectura, es decir, no se pueden escribir contenidos en esa dirección. Cuando leemos esa posición de memoria, la máquina detiene su programa y espera que el usuario introduzca un dato. Una vez que el usuario ha terminado de escribirlo, el MCBE continúa la operación del programa con el dato recién leído.
- La posición 31 es solamente de escritura. Al escribir un dato en la dirección 31, hacemos que el MCBE escriba ese valor por pantalla, y solamente así podemos saber el resultado de un cómputo.

Registros del MCBE

Como hemos dicho, los registros son lugares de almacenamiento temporario para varios usos. Los registros funcionan en forma parecida a la memoria, en el sentido de

que se pueden leer o escribir datos en ellos, pero normalmente en una computadora física su velocidad de acceso es mayor.

Los registros del MCBE tienen diferentes funciones. El registro **PC, o contador de programa**, contiene en cada momento la dirección de la próxima instrucción que se va a ejecutar; es decir, contiene un número que es la dirección de la posición de memoria donde está almacenada la instrucción que está por ejecutar el MCBE.

Antes de ejecutar cada instrucción, la CPU va a **copiarla** en el registro **IR, o registro de instrucción**; y mientras está almacenada allí la instrucción, va a ser decodificada, es decir, la CPU va a interpretar de qué instrucción se trata, y la va a ejecutar.

El registro **acumulador**, que pertenece a la ALU, es un registro que interviene en casi todas las operaciones del MCBE; sobre todo para las operaciones aritméticas.

CPU del MCBE

Entonces la CPU del MCBE queda definida como el conjunto de **Unidad de Control** con dos registros **PC e IR**, más **Unidad lógico-aritmética** con un registro **acumulador**.

Esta CPU va a ser muy limitada y solamente va a ejecutar operaciones de suma y resta en complemento a 2, con ocho bits. No va a ejecutar **multiplicaciones**, ni **divisiones**, ni operaciones en **punto flotante**.

Formato de instrucciones del MCBE

Código de instrucción Las instrucciones del MCBE se codifican en ocho bits y por lo tanto pueden ser almacenadas en un byte de la memoria, o en el registro IR. Cada instrucción se divide en dos partes: los tres bits de más a la izquierda se destinan a representar el **código de instrucción**.

Argumentos u operandos Los cinco bits restantes representan el **argumento u operando** de esa instrucción, es decir, el dato con el cual tiene que operar esa instrucción.

Direcciones y desplazamientos Por otro lado, los operandos pueden ser de dos clases: o bien **direcciones**, o bien **desplazamientos**. Si el operando es una dirección, es porque la CPU necesita conocer la dirección de un dato. Si es un desplazamiento, ese desplazamiento es **una cantidad de posiciones** que hay que trasladarse en la memoria, para encontrar la siguiente instrucción que hay que procesar.

- Cuando el operando es una dirección, los cinco bits del operando representan una cantidad sin signo (porque no pueden existir direcciones negativas).
- Cuando es un desplazamiento, esos cinco bits son **con signo**, y más precisamente, en complemento a 2; porque el desplazamiento puede ser **negativo**, indicando que hay que **volver hacia atrás, a una cierta dirección de la memoria** a ejecutar una instrucción que tal vez ya fue ejecutada.

Notemos que al representar las direcciones con cinco bits, sin signo, tenemos un rango de representación de 0 a 31, justo lo que necesitamos para alcanzar todas las posiciones de memoria.

Para los desplazamientos, como estamos usando un sistema con signo, tenemos un rango de -16 a 15. Lo que quiere decir que al trasladarnos de un lugar a otro de la memoria, vamos a poder hacerlo en saltos de a lo sumo 16 bytes hacia atrás o 15 bytes hacia adelante.

Conjunto de instrucciones del MCBE

Las instrucciones del MCBE se dividen en cuatro grupos.

- Las instrucciones de transferencia de datos son las que leen o escriben datos en la memoria.
- Las aritméticas son las que operan entre esos datos de la memoria y el valor presente en el registro acumulador.
- Las de salto o transferencia de control, las que desvían, derivan o trasladan la ejecución a otra posición de memoria.
- Y las de control, completan el funcionamiento de la máquina, por ejemplo controlando cuándo va a detenerse el programa.

Notemos que, como tenemos un campo de **tres bits** para definir el código de instrucción, no vamos a poder tener más que **ocho instrucciones**. Precisamente hay dos instrucciones en cada grupo de estos cuatro que hemos definido.

Instrucciones de transferencia de datos

Las instrucciones de transferencia de datos son dos. El código 010 copia un byte de la memoria hacia el acumulador. Para esto se necesita la **dirección** de ese byte, y esa dirección es precisamente el argumento u operando de la instrucción, y por lo tanto esa dirección está codificada en los cinco bits de operando de la instrucción.

El código 011 es la operación inversa, es decir, copia el contenido del registro acumulador en una posición de memoria. La dirección de esa posición está, también, determinada por los cinco bits de operando.

En cualquiera de los dos casos, luego de ejecutarse la instrucción, el valor del PC queda valiendo 1 más de lo que valía antes, es decir, se incrementa en 1. Esto permite que el ciclo de instrucción pase a la instrucción siguiente.

El efecto sobre el estado de la máquina es exactamente lo que se describe aquí: cambia el valor del acumulador, en el caso de la instrucción 010, o el valor de una posición de memoria, en el caso del código 011, y el valor del PC se incrementa en

1. No ocurre ningún otro cambio en el estado de la máquina, ni en los registros ni en la memoria.

Instrucciones aritméticas

Las instrucciones aritméticas también son dos. Si el código es 100, la CPU va a buscar el valor contenido en la dirección dada por el operando, y lo suma al acumulador. Es decir, se suman el valor que tuviera anteriormente el acumulador, con el valor que proviene de esa posición de memoria. El resultado queda en el acumulador. El valor de la posición de memoria no varía.

Si el código es 101, la operación es una resta, que como sabemos consiste en complementar a 2 el operando y luego sumar. El resultado, igual que en la instrucción de suma, queda en el acumulador, y la posición de memoria queda sin cambios. Como en las instrucciones de transferencia de datos, el registro PC se incrementa en 1. Decimos que el PC **queda apuntando** a la siguiente instrucción.

Instrucciones de salto

Las dos instrucciones **de salto, o de transferencia de control**, tienen un efecto diferente. Funcionan modificando exclusivamente el valor del registro PC. En ambos casos, el operando es un valor con signo a cinco bits. En el caso del código 110, ese valor se suma algebraicamente al valor que tuviera hasta el momento el registro PC. Con lo cual el PC queda apuntando a alguna posición de memoria por delante o por detrás de donde estaba antes. Así, el ciclo de instrucción siguiente va a leer la instrucción ubicada en esa nueva dirección que ahora está contenida en el PC.

El código 110 es una instrucción de salto **incondicional**, es decir, **siempre** provoca un **salto** en la ejecución. En el caso del código 111, el salto es **condicional, y depende del valor del registro acumulador**. Si el acumulador **tiene un valor 0**, se produce el salto, sumando el valor del desplazamiento al registro PC. Pero si el acumulador no vale cero, simplemente se incrementa el PC en 1 como en el resto de las instrucciones; y el control sigue secuencialmente como es normal.

Otras instrucciones

Hasta el momento no hemos explicado cómo se detiene la máquina. El ciclo de instrucción continuamente va a ejecutar la instrucción siguiente, sin parar nunca. Para terminar la ejecución usamos la instrucción 001. El programa se detiene, y el estado final de la máquina queda con los valores que recibieron por última vez los registros y la memoria. El valor del PC no cambia.

La operación 000 no tiene ningún efecto sobre el estado del MCBE, salvo incrementar el PC. Ningún otro registro ni posición de memoria cambia su valor.

Ciclo de instrucción

Ahora podemos definir con más rigurosidad lo que se entiende por **ciclo de instrucción**. El MCBE inicia su operación con todos los contenidos de la memoria y

registros en 0, y se pone a ejecutar continuamente el ciclo de instrucción. Para esto repite continuamente las fases siguientes.

1. Copia en el registro IR la instrucción cuya dirección está en el PC. Como el PC comienza con un valor 0, esto significa copiar la instrucción almacenada en la dirección 0 hacia el IR.
2. Decodifica la instrucción, lo que significa separar la instrucción en sus dos componentes, que son el código de operación, de tres bits, y el operando o argumento, de cinco bits.
3. Se ejecuta la instrucción, lo que significa que va a haber algún efecto sobre el estado de la máquina. Si es una instrucción de transferencia de datos, cambiará el registro acumulador o alguna posición de memoria; si es una instrucción aritmética, cambiará el valor del registro acumulador; si es de transferencia de control, cambiará el valor del PC, etc.
4. Una vez ejecutada la instrucción, se vuelve a repetir el ciclo, leyendo la siguiente instrucción que haya que ejecutar, que será aquella cuya dirección esté contenida en el PC.

Programación del MCBE

¿Cómo es, entonces, un programa para esta máquina teórica? Es una sucesión de bytes, que representan instrucciones y datos, contenidos en la memoria a partir de la dirección 0, y donde cada byte va a ser interpretado como instrucción o como dato según lo diga el programa. Como el estado inicial de la máquina es **con todos los valores en 0**, lo único que puede decirse con seguridad es que **la primera posición de la memoria contiene una instrucción**. Pero a partir de allí, el desarrollo de la ejecución va a ser dado por las instrucciones particulares que contenga el programa.

Dirección	Contenido
00000	01000110
00001	10000111
00010	01101000
00011	00100000
00100	
00101	
00110	00001100
00111	00000001
01000	

- En este programa en particular, la primera instrucción es 010 00110, que es una instrucción de transferencia de datos de la posición 6 al acumulador.
- La segunda instrucción es 100 00111, que es una suma del valor que haya en la posición 7 al acumulador.
- La tercera instrucción es 011 01000, que significa transferir el valor que haya en el acumulador a la posición 8.
- Y la cuarta instrucción es 001 00000, que es la instrucción de parada, con lo cual termina el programa.
- Todas éstas eran las instrucciones del programa. En las posiciones 6 y 7 de la memoria tenemos datos almacenados en complemento a 2 sobre ocho bits. Estos datos son el número 12, en la posición 6, y el número 1 en la posición 7.
- En las restantes posiciones de memoria hay contenidos nulos, o sea, todos los bits en 0, y no los escribimos para no complicar más el diagrama.

Traza de ejecución

¿Qué es realmente lo que hace este programa, y cuál es el resultado de ejecutarlo? Para poder saberlo, lo más conveniente es hacer una **traza del programa**. Una traza es un diagrama o planilla donde preparamos **columnas** con los nombres de los **registros, la memoria y la salida**, para poder ir simulando manualmente la ejecución, e ir anotando qué valores toman esos registros; es decir, cuáles son los sucesivos estados del MCBE.

Para cada instrucción que se ejecute usaremos un renglón de la planilla.

En la traza solamente escribiremos los elementos del estado **que se modifiquen** en cada paso. En la columna de MEMORIA anotaremos cuándo hay una operación de escritura en memoria, en la columna de SALIDA anotaremos cuando haya un contenido que se escriba en pantalla, etc.

Este programa en particular presenta la traza que veremos a continuación.

Queda como ejercicio seguir la traza e interpretar qué está ocurriendo en cada momento con cada uno de los registros y las posiciones de memoria.

Dirección	Contenido
00000	01000110
00001	10000111
00010	01101000
00011	00100000
00100	
00101	
00110	00001100

Dirección	Contenido
00111	00000001
01000	00001101

Ayuda

- 000 No operación
- 001 Parada
- 010 Mem → Ac
- 011 Ac → Mem
- 100 Sumar al Ac
- 101 Restar al Ac
- 110 Salto
- 111 Salto cond

Preguntas

1. El MCBE, ¿puede encontrar una instrucción que no sea capaz de decodificar?
2. Supongamos que hemos almacenado en la posición 14 un dato numérico que representa la edad de una persona. ¿Qué pasa si en algún momento de la ejecución el PC contiene el número 14? ¿Qué pasa si esa persona tiene 33 años?
3. ¿Podría aumentarse la capacidad de memoria del MCBE? ¿Esto requeriría algún cambio adicional a la máquina?

Proponemos como ejercicio **examinar** las siguientes frases, tomadas de exámenes de la materia, a ver si descubrimos qué está mal en cada una de ellas.

1. El primer paso del ciclo de instrucción es cargar el IR en el PC.
2. Lo que hacen las instrucciones de salto es cambiar el efecto de las instrucciones en los registros del MCBE.
3. Las instrucciones de salto sirven como desplazamiento de instrucciones y cambian el orden de los registros.
4. La instrucción de salto incondicional es un desplazamiento sin signo, la de salto condicional es un desplazamiento con signo.
5. Las instrucciones de salto copian el contenido de la dirección en el acumulador.