

Arquitectura de Computadores

1. Introducción
2. La CPU
3. Lenguaje Máquina
4. La Memoria
5. Sistemas de Entrada/Salida
6. CPU Segmentada (*Pipeline*)
7. Memoria Caché
8. Arquitecturas RISC

Estos apuntes constituyen una introducción a la Arquitectura de Computadores, aunque como pronto veremos, sería más exacto decir Arquitectura y Organización de Computadores.

Hay diversas organizaciones y modelos de arquitecturas de computadores, aunque en esta introducción vamos a dedicarnos solamente al modelo conocido como “máquina de von Neumann” que es el que se sigue mayoritariamente en los ordenadores actuales de propósito general. Las arquitecturas correspondientes a ordenadores de propósito especial, como los de cálculo científico y los vectoriales (los llamados “supercomputadores”) y otras arquitecturas alternativas se estudiarán en asignaturas de arquitecturas avanzadas.

Así, aquí vamos a ver los componentes básicos de un ordenador von Neumann, esto es, la CPU, la memoria y los sistemas de entrada/salida. Abordaremos tanto la interfaz que ofrece a sus usuarios inmediatos, mediante el lenguaje máquina y su arquitectura en general, como su organización modular interna y algunas técnicas de utilización.

Una vez expuestos los conceptos generales de los componentes básicos de un ordenador, abordaremos algunas técnicas avanzadas, hoy día normales, para mejorar el rendimiento tanto en la ejecución de instrucciones en la CPU como en la velocidad de acceso a la memoria principal.

El último capítulo está dedicado a un modelo de arquitectura que surgió a finales de los años 70, y que sin dejar de ser von Neumann, supuso una revolución en la concepción de los que deberían ser los principios de diseño de una arquitectura, y que hoy día siguen, en la medida de lo posible, prácticamente todos los fabricantes de ordenadores.

Arquitectura de Computadores

1. Introducción

1. ¿Qué es la Arquitectura de Computadores?
2. Érase una vez ...
3. Estructura básica de un ordenador
4. Clasificación de arquitecturas

En esta introducción se va a presentar el escenario en el que se va a desarrollar la asignatura. Comenzaremos comentando qué es la Arquitectura de Computadores, y a continuación pasaremos a mostrar el contexto histórico de la máquina de von Neumann y sus características básicas. Por último veremos dos puntos de vista para la clasificación de los ordenadores según su arquitectura.

¿Qué es la Arquitectura de Computadores?

Arquitectura de un Computador

"La apariencia funcional que presenta a sus usuarios inmediatos". (Amdahl, 1964).

Describe "lo que sucede"

Estructura de un Computador

Es la estructura lógica que da forma a su arquitectura.

Describe "cómo sucede"

Tecnología de un Computador

Indica los componentes concretos y sus interconexiones. Encapsulado, refrigeración, etc.



S/360 - SSI

S/370 - MSI

30x0 - LSI

43x1 - VLSI

Amdahl definió en 1964 la **arquitectura** de un computador como "la apariencia funcional que presenta a sus usuarios inmediatos". Es decir, los atributos o características de un sistema visibles al programador.

La arquitectura de un procesador viene dada por su **juego de instrucciones**, y normalmente se define en documentos descriptivos, que IBM llamaba "Principios de Operación", aunque cada fabricante le da un nombre distinto. En estos manuales se identifican las operaciones (denominadas *instrucciones máquina*) que realiza el procesador correspondiente. Ayudándose de la sintaxis en ensamblador, describe la operación que realiza, los tipos de datos u operandos que puede utilizar, los códigos de condición que establece y el formato de la instrucción en su representación binaria.

La **organización o estructura** de un computador se refiere a la estructura lógica que da forma a su arquitectura.

La arquitectura describe *lo que sucede*, mientras que la organización describe *cómo sucede*.

La organización de un procesador nos muestra cómo es éste por dentro, pudiendo ver que está formado por una Unidad Aritmético-lógica, una memoria organizada en registros (contador de programa, puntero de pila, registro de estado, acumulador, ...) y una Unidad de Control que gobierna el funcionamiento y ejecución secuencial de las instrucciones.

La **tecnología o realización** es una versión concreta de la organización. Es decir, determina los componentes que se van a utilizar y cómo se van a interconectar. También se ocupa de aspectos como la fiabilidad de los componentes, mantenimiento, refrigerado, encapsulado, ...

La realización está directamente ligada al estado del arte de la tecnología de construcción de los componentes. Por ejemplo, la antiguamente famosa familia 360 de IBM ha pasado por las distintas generaciones que se muestran en la figura de arriba, manteniendo la misma arquitectura y apenas variando la organización, pero actualizándose continuamente según el estado del arte en la tecnología.

En esta asignatura vamos a ocuparnos de la Arquitectura y la Estructura de los Computadores.

1ª Generación: La Válvula de Vacío (1945-1955)

- ✓ ENIAC, Primer ordenador electrónico digital en 1943
18.000 válvulas, 1.500 relés, 30 Toneladas
20 registros para números DECIMALES
- ✓ Sucesores: EDVAC, JOHNIAC, ILLIAC, MANIAC
EDVAC (1945): programa almacenado en memoria
1946 - IAS Machine (máquina de von Neumann)
1951 - UNIVAC I
- ✓ 1953 - IBM 701, 704, 709



Aunque el camino desde el ábaco hasta nuestros días, pasando por los ingenios mecánicos de los siglos XVII y XVIII y los eléctricos de comienzos de nuestro siglo, ha sido muy largo, las generaciones de los ordenadores (que han estado marcadas por los avances del hardware) se han empezado a considerar desde la aparición de la electrónica. Veamos un resumen de las principales características de cada generación:

1ª Generación: La válvula de vacío (1945-1955).

El ENIAC fue el primer ordenador electrónico digital de propósito general que llegó a funcionar. Lo construyeron Mauchley y Eckert en 1943 y estaba formado por 18.000 válvulas y 1.500 relés; sus 30 toneladas de peso consumían 140 Kw.

En cuanto a su arquitectura, disponía de 20 registros capaces de almacenar un número decimal de 10 dígitos cada uno. Se programaba manualmente mediante 6.000 conmutadores y una jungla de cables y enchufes.

Los militares lo estuvieron utilizando hasta 1955.

Sucesores del ENIAC: EDVAC, JOHNIAC, ILLIAC, MANIAC

EDVAC (1945): Primer ordenador con programa almacenado en memoria

IAS machine (1946): **Máquina de von Neumann** (una versión del EDVAC)

1951 - UNIVAC I: primer ordenador digital disponible comercialmente

1953 - IBM 701, 704 (primer ordenador comercial con programa de control), 709.

2ª Generación: El Transistor (1955-1965)



- ✓1948 - Bell Labs inventa el transistor
- ✓1961 - DEC lanza el PDP-1 (4Kb)
IBM saca la 7090 (32 Kb) y la 1401
- ✓1964 - CDC 6600 (primera máquina paralela)

2ª Generación: El transistor (1955-1965).

1948 - Bell Labs inventa el transistor (Premio Nobel).

En el M.I.T. se construye el TX-0 y TX-2. Kenneth Olsen funda DEC en 1957.

1961 - DEC lanza el PDP-1, con 4K (Nace el minicomputador). Cuesta \$120.000

IBM saca la 7090, con 32K (cálculo científico), y la 1401 (aplicaciones comerciales). Cuestan millones de dólares. Dominio absoluto del mercado.

1964 - CDC 6600 (primera máquina paralela): 10 veces más rápido que el 7094.

3ª Generación: Circuitos Integrados (1960-1980)



✓ Fin del núcleo de ferrita

✓ 1964 - S/360

Regs. de 32 bits. 2^{24} de direccionamiento.

Compatibles con 370, 43x1, 3080, 3090

En los 80, 16 Mb se quedan pequeños

✓ DEC distribuye el PDP-11 por todas las universidades



PDP-11

3ª Generación: Circuitos integrados SSI y MSI (1960-1980).

Inventado por Texas Instruments y Fairchild Corporation en 1959. En un chip caben docenas de transistores. Fin del núcleo de ferrita.

1964 - IBM lanza la familia 360, con un espacio de direccionamiento de 2^{24} bytes, y registros de 32 bits. Todos los modelos son compatibles, incluso con las series sucesoras 370, 43x1, 3080 y 3090. A mediados de los años 80, los 16 Mbytes se quedan pequeños.

DEC distribuye el PDP-11 por todas las universidades.

4ª Generación: PCs. LSI y VLSI (1980-1990)

- ✓ Decenas y centenas de miles, millones de transistores en 1 chip
- ✓ Nace el microprocesador
- ✓ Caída de precios → IBM saca el PC
- ✓ Hoy día hay ordenadores según necesidades



PCs Miniordenadores <i>Mainframes</i> Supercomputadores
--

5ª Generación: VHLSI (1990-????)

4ª Generación: Ordenadores personales. LSI y VLSI (1980-1990).

Decenas de miles, centenas de miles y millones de transistores en un chip.

Nace el microprocesador → CPU en una sola pastilla (Unidad de Control + ALU + Registros)

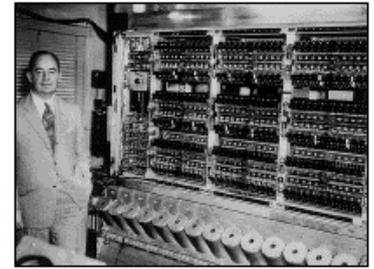
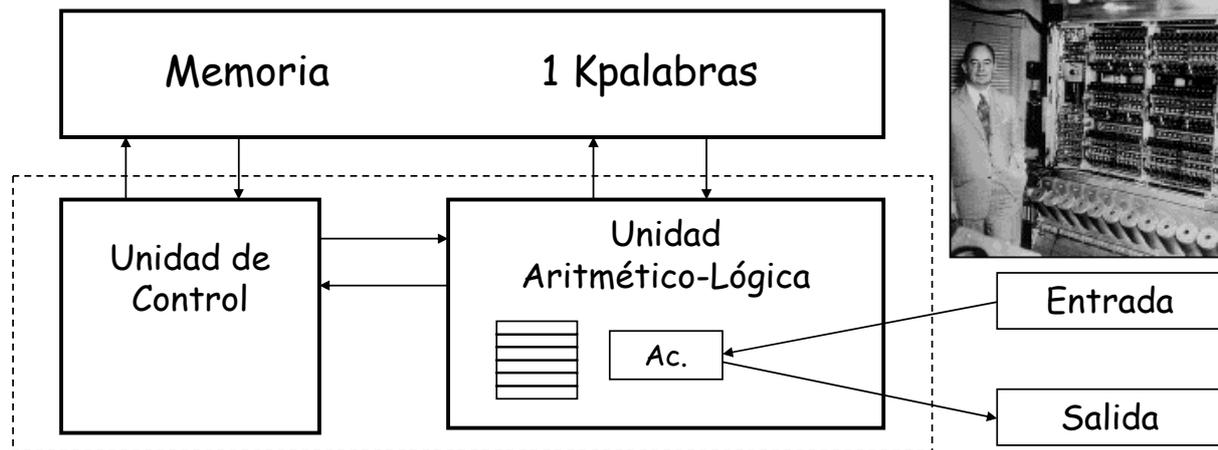
Los precios bajan radicalmente → IBM saca el Ordenador Personal

Hoy día hay diversos tipos de ordenadores según las necesidades: ordenadores personales, miniordenadores, *mainframes* y supercomputadores.

5ª Generación: VHLSI (1990-????)

Algunas muestras actuales de esta generación:

- Intel Core Duo, con alrededor de 400 millones de transistores
- Itanium II, también de Intel, con 2.000 millones de transistores.



CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

- ✓ Memoria unidimensional, organizada como un vector de celdas del mismo tamaño y de direcciones secuenciales.
- ✓ Una misma memoria para instrucciones y datos.
- ✓ Sin distinción explícita entre instrucciones y datos.
- ✓ Sin especificación explícita de tipos de datos.
- ✓ Las instrucciones se ejecutaban secuencialmente. Se requerían instrucciones de salto para romper el flujo de control

La **máquina de von Neumann** tenía cuatro partes básicas:

- La memoria
- Unidad aritmético-lógica
- Unidad de control
- Sistema de entrada/salida

La memoria estaba formada por 1024 palabras (ampliable a 4 K) de 40 bits (¡binario!). Cada palabra podía contener 2 instrucciones o un número entero de 39 bits.

Las instrucciones tenían 8 bits para indicar el tipo de instrucción, y 12 bits para especificar una palabra de memoria.

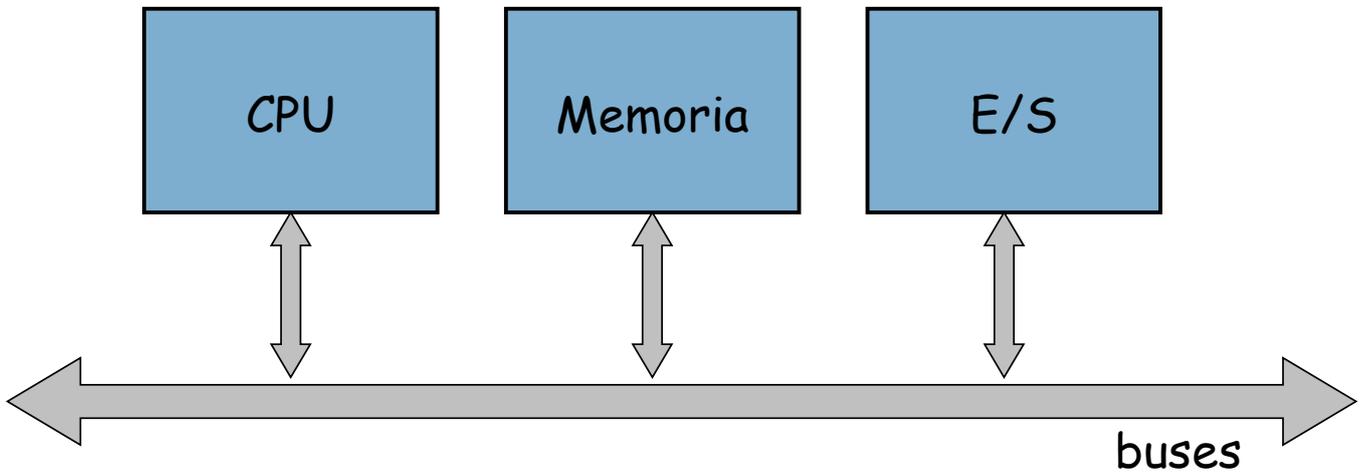
La unidad aritmético-lógica tenía un registro interno de 40 bits llamado "acumulador". Una instrucción típica sumaba el contenido de una palabra de memoria al acumulador, o almacenaba el contenido del acumulador en una palabra de memoria.

Esta máquina no disponía de aritmética de coma flotante (von Neumann pensaba que cualquier matemático competente debería ser capaz de llevar mentalmente la cuenta de la posición de la coma decimal o, mejor dicho, binaria).

Esta máquina tenía las siguientes **características** que hoy pueden parecer obvias:

- La memoria era unidimensional, organizada como un vector lineal de celdas del mismo tamaño y con direcciones secuenciales.
- Disponía de una única memoria principal para contener instrucciones y datos. (En contraste con la arquitectura Harvard, que prefiere memorias distintas para instrucciones y para datos).
- No había distinción explícita entre instrucciones y datos.
- No había especificación explícita de los tipos de datos.
- Cada instrucción especificaba la dirección de la siguiente instrucción a ejecutar. Posteriormente se le añadió el concepto del registro Contador de Programa, dando lugar a la ejecución secuencial de las instrucciones, y a la inclusión de las instrucciones de salto para alterar el flujo de control natural.

Esta arquitectura es la que se mantiene hoy día en la inmensa mayoría de las máquinas de propósito general, en las que la Unidad de Control y la Unidad Aritmético-Lógica se han integrado en la actual CPU.

HOY DÍA

Así pues, la estructura básica de la mayoría de los ordenadores actuales se representa mediante tres grandes bloques:

- CPU
- Memoria principal
- Sistemas de entrada/salida

Todos ellos unidos por los buses de Direcciones, Datos y Control.

Taxonomía de Flynn

		Flujo de Datos	
		Simple	Múltiple
Flujo de Instrucciones	Simple	SISD	SIMD
	Múltiple	MISD	MIMD

La arquitectura de von Neumann sigue el ciclo de ejecución secuencial de instrucciones (una a una) que operan sobre datos escalares. No obstante, hay otros modelos de arquitecturas.

La clasificación más aceptada, desde el punto de vista de la Estructura del Ordenador, es la que se debe a Flynn, la cual se realiza según el número de instrucciones o datos implicados en cada ciclo de reloj.

En este gráfico tenemos la clasificación de las posibles arquitecturas de un ordenador según Flynn. En este curso vamos a centrarnos en las arquitecturas SISD (*Single Instruction –Single Data*) o de von Neumann, dejando el resto para la asignatura de Arquitecturas Avanzadas.

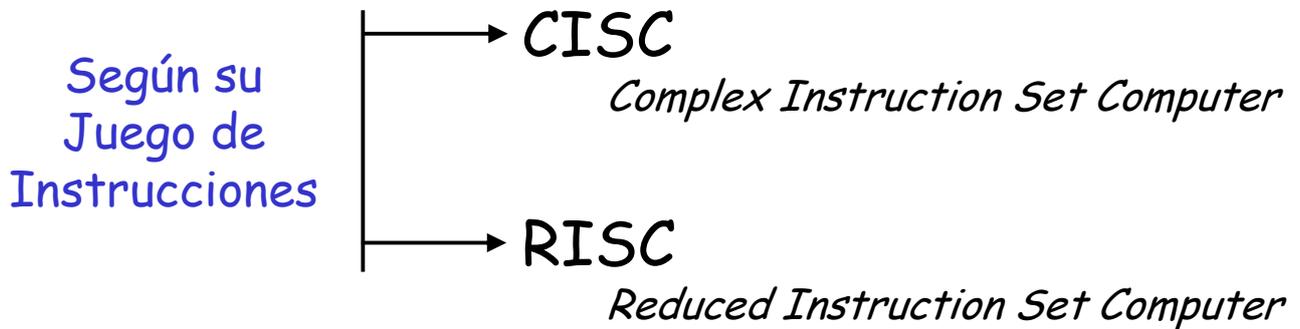
Las arquitecturas SIMD (*Single Instruction - Multiple Data*) se corresponden con los computadores vectoriales (para el cálculo con matrices).

En los sistemas MIMD (*Multiple Instruction - Multiple Data*) se encuadran los multiprocesadores (con memoria compartida) y los multicomputadores (con memoria independiente).

En las arquitecturas MISD (*Multiple Instruction - Single Data*) diversas instrucciones operan sobre un único dato. Son las más alejadas de las arquitecturas convencionales. Como ejemplo de este tipo de arquitecturas está la "Data Flow Machine" (Máquina de Flujo de Datos).

Actualmente, la inmensa mayoría de los ordenadores son SISD (*Single Instruction - Single Data*), además de unos pocos SIMD que se dedican al cálculo vectorial. La tendencia es la construcción de procesadores superescalares, que arrancan varias instrucciones simultáneamente (aunque se siguen considerando SISD), como los PowerPC y los de Intel.

Han surgido con fuerza los procesadores multinúcleo, que son chips con múltiples procesadores en su interior, como los *Core Duo* (dos procesadores) y los *Core Quad* (cuatro procesadores), también de Intel, donde cada procesador es a su vez superescalar. Los ordenadores con estos procesadores son verdaderas máquinas MIMD.



Veamos ahora otra clasificación desde el punto de vista de la Arquitectura. Desde hace unos cuantos años, ha ido tomando relevancia un tipo de arquitecturas que se caracterizan por disponer de un juego de instrucciones de formato muy regular y sencillo. Estas arquitecturas, denominadas RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), contrastan con las convencionales o CISC (*Complex Instruction Set Computer*), cuyo juego de instrucciones es muy extenso y sus formatos de instrucción heterogéneos, lo que significa una sobrecarga fija en el tiempo de ejecución.

Intel y Motorola son ejemplos de estas arquitecturas, mientras que PowerPC y el Alpha de Digital son claros exponentes de las arquitecturas RISC.

En estos apuntes, en general, vamos a tratar con las arquitecturas CISC, aunque en el último capítulo comentaremos las características de las RISC.



1971	4004 8008 8080, 8085	6800	IBM 801
1978	8086, 8088		
1979		68000	Movimiento RISC
1982	80186		
1983	80286	68010	
1985	80386 80486	68020	
1989	Pentium	68030	
1993	Pentium Pro, MMX	68040	601,
		68060	603, 604, 620
2006	Pentium 4 (>3,7 GHz.) Core, Core 2 (Duo y Quad) Itanium, Itanium II		740, 750 64, 65

Cuando en 1971 **Intel** sacó a la calle el primer microprocesador, el 4004 no se imaginaba el futuro que le esperaba. Este microprocesador contaba con registros de 4 bits y un espacio de direcciones de 1 Kb. Le sucedieron el 8008, el 8080 (primer microprocesador de propósito general) y el 8085; todos ellos con registros de 8 bits, y los dos últimos con 64 Kb de espacio de direccionamiento de memoria.

En 1978 lanzó el 8086, primer microprocesador de 16 bits, que direccionaba 1Mb de memoria (20 hilos en el bus de direcciones), y con un reloj de 4,77 MHz., y cuatro años más tarde lo integraba en la misma pastilla, el 80186, junto con *timers*, DMA, y un controlador de interrupciones. También en este año arrancó hacia los grandes espacios de direccionamiento, con el 80286, que llegaba a los 16 Mb de memoria y ofrecía ya varios niveles o privilegios de ejecución.

Los procesadores 80386 y 80486 fueron los primeros procesadores de Intel de 32 bits (año 1985), aunque ya se le habían adelantado Bell Labs y Hewlett-Packard, que los sacaron 4 años antes. Le siguió la saga de los Pentium, de 64 bits (aunque con 32 hilos en el bus de direcciones). Comenzó en 1989, y pasando por el Pentium Pro y MMX, ha ido incrementando su velocidad de reloj hasta llegar a los 3,72 GHz (2006) del Pentium 4 570 y el Pentium 4 *Extreme Edition*. La generación sucesora de los Pentium es la Core y Core 2, que son multinúcleo (Core 2 Duo y Core 2 Quad).

Los procesadores Itanium suponen una ruptura de compatibilidad con el modelo 8086, y están basados en una arquitectura con un bus de direcciones de 64 bits (IA-64).

El competidor por excelencia de Intel ha sido **Motorola**, que comenzó su andadura en este campo poco tiempo después que Intel lanzara la familia 8080, con el 6800, un procesador equivalente al 8080. En el 79, dio un giro radical, sacando al mercado el 68000, un procesador con nueva arquitectura e incompatible con sus predecesores. Es un procesador de 32 bits (aunque el bus de datos es solo de 16 hilos) y 24 bits de direcciones. Sobre este procesador se construyeron miniordenadores con Unix, lo que constituyó el gran éxito de Motorola.

El 68000 se mejoró con el 68010 (en 1983), que incluía soporte para gestión de memoria virtual. Otro gran éxito fue el 68020 (1984), un verdadero procesador de 32 bits (bus de direcciones y datos), en el que se han apoyado famosas estaciones de trabajo como las de Sun, Apollo y Hewlett-Packard. El 68030 (1987) incluyó una MMU completa.

En 1989 salió el 68040 que, como el 80486, incluía un coprocesador matemático, MMU y una caché. Esta saga de Motorola finalizó en 1994 con el 68060.

Aunque IBM sacó el primer procesador RISC, el 801, en 1975, el auge del movimiento RISC no llegó hasta comienzos de los 80. IBM continuó con el desarrollo de arquitecturas RISC, hasta que en 1993 en una alianza con Motorola y Apple sacó el **PowerPC**. A partir del modelo 620 son procesadores de 64 bits, y consiguen prestaciones similares a las del Pentium con un reloj bastante más lento.

Por el camino han surgido otros constructores, como Siemens, AMD y Cyrix, que además de sus propios procesadores han sacado modelos compatibles con los de Intel.