

mejores que los de otros diseñadores. Muchas de esas instrucciones no eran indispensables en el sentido de que su efecto podía lograrse fácilmente con las instrucciones existentes, pero a menudo eran un poco más rápidas que una sucesión de instrucciones existentes. Por ejemplo, muchas instrucciones tenían una instrucción **INC** (INCRementar) que sumaba 1 a un número. Puesto que esas máquinas también tenían una instrucción general **ADD** para sumar, tener una instrucción especial para sumar 1 (o para sumar 270, para el caso) no era necesario. Sin embargo, **INC** era por lo regular un poco más rápida que **ADD**, así que se incluyó.

Se añadieron muchas otras instrucciones al microprograma siguiendo el mismo razonamiento. Entre ellas estaban

1. Instrucciones para multiplicación y división de enteros.
2. Instrucciones para aritmética de punto flotante.
3. Instrucciones para invocar procedimientos y regresar de ellos.
4. Instrucciones para acelerar los ciclos.
5. Instrucciones para manejar cadenas de caracteres.

Además, una vez que los diseñadores de máquinas vieron lo fácil que era añadir nuevas instrucciones, comenzaron a buscar otras funciones que añadir a sus microprogramas. Ejemplos de tales adiciones son

1. Funciones para acelerar cálculos con matrices (direccionamiento indexado e indirecto).
2. Funciones para trasladar programas de un lugar a otro de la memoria después de que han iniciado su ejecución (recursos de reubicación).
3. Sistemas de interrupciones que avisan a la computadora cuando se termina una operación de entrada o salida.
4. La capacidad para suspender un programa e iniciar otro en un número reducido de instrucciones (conmutación de procesos).

Con los años, se han añadido muchas otras funciones y recursos, casi siempre para acelerar alguna actividad específica.

La eliminación de la microprogramación

Los microprogramas crecieron durante los años dorados de la microprogramación (años sesenta y setenta). El único problema fue que también tendían a volverse más y más lentos a medida que se hacían más voluminosos. Por fin algunos investigadores se dieron cuenta de que si eliminaban el microprograma, reducían considerablemente el conjunto de instrucciones y hacían que las instrucciones restantes se ejecutaran en forma directa (es decir, control por hardware de la trayectoria de datos), las máquinas podían acelerarse. En cierto sentido, el

diseño de computadoras había descrito un círculo completo, volviendo a la forma que tenía antes de que Wilkes inventara la microprogramación.

El punto importante de esta explicación es mostrar que la frontera entre hardware y software es arbitraria y cambia constantemente. El software de hoy podría ser el hardware de mañana, y viceversa. Además, las fronteras entre los diversos niveles también son variables. Desde el punto de vista del programador, la forma en que se implementa una instrucción dada no es importante (excepto tal vez por su velocidad). Una persona que programa en el nivel ISA puede utilizar su instrucción de multiplicar como si fuera una instrucción de hardware sin preocuparse por ello, o sin siquiera saber si en efecto es una instrucción de hardware. El hardware de una persona es el software de otra. Regresaremos a estos temas más adelante.

1.2 ACONTECIMIENTOS IMPORTANTES EN ARQUITECTURA DE COMPUTADORAS

Se han diseñado y construido cientos de tipos distintos de computadoras durante la evolución de la computadora digital moderna. Casi todos se han perdido en el olvido, pero unos cuantos han tenido un impacto importante sobre las ideas modernas. En esta sección bosquejaremos brevemente algunos de los sucesos históricos clave para entender mejor cómo llegamos a donde estamos ahora. No es necesario decir que esta sección sólo trata los puntos principales y deja muchas cosas sin mencionar. En la figura 1-4 se lee una lista de algunas de las máquinas que trataremos en esta sección. Slater (1987) presenta material histórico adicional acerca de las personas que inauguraron la era de las computadoras. En la obra de Morgan (1997), se encuentran biografías breves, ilustradas con bellas fotografías a color de esos fundadores, tomadas por Louis Fabian Bachrach. Otro libro de biografías es (Slater, 1987).

1.2.1 La generación cero – computadoras mecánicas (1642-1945)

La primera persona que construyó una máquina calculadora funcional fue el científico francés Blaise Pascal (1623-1662), en cuyo honor se nombró el lenguaje de programación Pascal. Este dispositivo, construido en 1642, cuando Pascal tenía apenas 19 años, fue diseñado para ayudar a su padre, un cobrador de impuestos del gobierno francés. La calculadora era totalmente mecánica, con engranes, y se impulsaba con una manivela operada a mano.

La máquina de Pascal sólo podía sumar y restar, pero 30 años después el gran matemático alemán Barón Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716) construyó otra máquina mecánica que también podía multiplicar y dividir. Efectivamente, Leibniz había construido el equivalente de una calculadora de bolsillo de cuatro funciones, hace tres siglos.

No sucedió algo relevante durante 150 años hasta que un profesor de matemáticas de la University of Cambridge, Charles Babbage (1792-1871), inventor del velocímetro, diseñó y construyó su **máquina de diferencias**. Este aparato mecánico, que al igual que el de Pascal sólo podía sumar y restar, fue diseñado para calcular tablas de números útiles para la navegación marítima. La máquina entera estaba diseñada para ejecutar un solo algoritmo, el método

Año	Nombre	Hecho por	Comentario
1834	Máquina analítica	Babbage	Primer intento de construir una computadora digital
1936	Z1	Zuse	Primera máquina calculadora de relevadores funcional
1943	COLOSSUS	Gobierno inglés	Primera computadora electrónica
1944	Mark I	Aiken	Primera computadora estadounidense de propósito general
1946	ENIAC I	Eckert/Mauchley	Inicia la historia moderna de la computación
1949	EDSAC	Wilkes	Primera computadora de programa almacenado
1951	Whirlwind I	M.I.T.	Primera computadora de tiempo lineal
1952	IAS	Von Neumann	Casi todas las máquinas actuales emplean este diseño
1960	PDP-1	DEC	Primera minicomputadora (50 vendidas)
1961	1401	IBM	Máquina pequeña para negocios de enorme popularidad
1962	7094	IBM	Dominó la computación científica a principios de los años sesenta
1963	B5000	Burroughs	Primera máquina diseñada para un lenguaje de alto nivel
1964	360	IBM	Primera línea de productos diseñada como familia
1964	6600	CDC	Primera supercomputadora científica
1965	PDP-8	DEC	Primera minicomputadora con mercado masivo (50,000 vendidas)
1970	PDP-11	DEC	Dominó las minicomputadoras en los años setenta
1974	8080	Intel	Primera computadora de propósito general de 8 bits en un chip
1974	CRAY-1	Cray	Primera supercomputadora vectorial
1978	VAX	DEC	Primera superminicomputadora de 32 bits
1981	IBM PC	IBM	Inició la era de la computadora personal moderna
1985	MIPS	MIPS	Primera máquina RISC comercial
1987	SPARC	Sun	Primera estación de trabajo RISC basada en SPARC
1990	RSC6000	IBM	Primera máquina superescalar

Figura 1-4. Algunos acontecimientos importantes en la evolución de la computadora digital moderna.

de diferencias finitas empleando polinomios. La característica más interesante de la máquina de diferencias era su método de salida: perforaba sus resultados en una placa de cobre para grabados con un troquel de acero, un precursor de posteriores medios de escritura única como las tarjetas perforadas y los CD-ROM.

Aunque la máquina de diferencias funcionaba razonablemente bien, Babbage pronto se aburrió de una máquina que sólo podía ejecutar un algoritmo. Él comenzó a dedicar cantidades cada vez más grandes de su tiempo y de la fortuna de su familia (sin mencionar 17,000 libras esterlinas de dinero del gobierno) en el diseño y construcción de una sucesora llamada **máquina analítica**. La máquina analítica tenía cuatro componentes: el almacén (memoria), el molino (unidad de cómputo), la sección de entrada (lector de tarjetas perforadas) y la

sección de salida (salidas perforadas e impresas). El almacén consistía en 1000 palabras de 50 dígitos decimales, cada una de las cuales servía para almacenar variables y resultados. El molino podía aceptar operandos del almacén, y luego sumarlos, restarlos, multiplicarlos o dividirlos, y por último devolver el resultado al almacén. Al igual que la máquina de diferencias, la máquina analítica era totalmente mecánica.

El gran avance de la máquina analítica fue su utilidad general: leía instrucciones de tarjetas perforadas y las ejecutaba. Algunas instrucciones ordenaban a la máquina obtener dos números del almacén, llevarlos al molino, efectuar operaciones sobre ellos (por ejemplo, sumarlos) y enviar el resultado de vuelta al almacén. Otras instrucciones podían probar un número y efectuar una ramificación condicional dependiendo de si era positivo o negativo. Al perforar un programa distinto en las tarjetas de entrada, era posible lograr que la máquina analítica realizara diferentes cálculos, algo que no podía hacer la máquina de diferencias.

Puesto que la máquina analítica era programable en un sencillo lenguaje ensamblador, necesitaba software. Para producir este software, Babbage contrató a una joven mujer llamada Ada Augusta Lovelace, hija del afamado poeta británico Lord Byron. Así, Ada Lovelace fue la primera programadora de computadoras del mundo. El moderno lenguaje de programación Ada® honra su memoria.

Desafortunadamente, al igual que muchos diseñadores modernos, Babbage nunca logró eliminar todos los problemas del hardware. La dificultad es que necesitaba miles y miles de levas y engranes y ruedas fabricadas con un grado de precisión que la tecnología del siglo XIX no podía alcanzar. No obstante, sus ideas se habían adelantado mucho a su época, e incluso hoy la mayor parte de las computadoras modernas tienen una estructura muy similar a la de la máquina analítica, por lo que es justo decir que Babbage fue el padre (o el abuelo) de la computadora digital moderna.

El siguiente avance importante ocurrió a fines de la década de los treinta, cuando un estudiante de ingeniería alemán llamado Konrad Zuse construyó una serie de máquinas calculadoras automáticas empleando relevadores electromagnéticos. Zuse no logró obtener financiamiento del gobierno después de iniciada la guerra porque los burócratas esperaban ganar la guerra con tal rapidez que la nueva máquina no estaría lista antes de terminar las acciones. Zuse no conocía el trabajo de Babbage, y sus máquinas fueron destruidas por el bombardeo aliado de Berlín en 1944, por lo que su trabajo no influyó en las máquinas subsiguientes. No obstante, Zuse fue uno de los pioneros en este campo.

Poco tiempo después, en Estados Unidos, dos personas diseñaron también calculadoras: John Atanasoff del Iowa State College y George Stibitz de Bell Labs. La máquina de Atanasoff era asombrosamente avanzada para su época; utilizaba aritmética binaria y tenía una memoria de condensadores, los cuales se renovaban periódicamente para evitar que la carga desapareciera, en un proceso que él llamaba “refrescar la memoria”. Los modernos chips de memoria dinámica (RAM) funcionan exactamente de la misma manera. Por desgracia, la máquina nunca logró entrar en operación. En cierto modo, Atanasoff era como Babbage: un visionario que finalmente fue derrotado por la insuficiente tecnología de hardware de su época.

La computadora de Stibitz, aunque más primitiva que la de Atanasoff, sí funcionaba. Stibitz hizo una demostración pública en una conferencia en Dartmouth College en 1940. Entre el públi-

UNIVERSIDAD DE LA PAZ
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE
DOCUMENTACION Y BIBLIOTECAS

co estaba John Mauchley, un profesor de física desconocido de la Universidad de Pennsylvania. El mundo de las computadoras oiría más acerca del profesor Mauchley posteriormente.

Mientras Zuse, Stibitz y Atanasoff diseñaban calculadoras automáticas, un joven llamado Howard Aiken realizaba tediosos cálculos numéricos a mano como parte de su tesis de doctorado en Harvard. Después de graduarse, Aiken reconoció la importancia de poder efectuar cálculos con una máquina. Él acudió a la biblioteca, descubrió los trabajos de Babbage, y decidió construir con relevadores la computadora de propósito general que Babbage no había logrado construir con ruedas dentadas.

La primera máquina de Aiken, el Mark I, se completó en Harvard en 1944. Tenía 72 palabras de 23 dígitos decimales cada una, y un tiempo de instrucción de 6 segundos. Las entradas y salidas se efectuaban mediante una cinta de papel perforada. Para cuando Aiken terminó su sucesor, el Mark II, las computadoras de relevadores eran obsoletas. Se había iniciado la era de la electrónica.

1.2.2 La primera generación – bulbos (1945-1955)

El estímulo para la computadora electrónica fue la Segunda Guerra Mundial. Durante la primera parte de la guerra, submarinos alemanes hacían estragos entre la armada británica. Los almirantes alemanes enviaban órdenes por radio hasta los submarinos, pero eran interceptadas por los ingleses. El problema es que los mensajes se codificaban mediante un aparato llamado **ENIGMA**, cuyo precursor había sido diseñado por un inventor aficionado y expresidente de Estados Unidos, Thomas Jefferson.

A principios de la guerra, los espías británicos lograron adquirir una máquina ENIGMA de los espías polacos, quienes la habían robado a los alemanes. Sin embargo, se requería un número abrumador de cálculos para decodificar un mensaje, y esto tenía que hacerse inmediatamente después de interceptarse el mensaje para que sirviera de algo. Para decodificar estos mensajes, el gobierno británico estableció un laboratorio supersecreto que construyó una computadora electrónica llamada COLOSSUS. El famoso matemático británico Alan Turing ayudó a diseñar esta máquina. COLOSSUS entró en operación en 1943, pero como el gobierno británico mantuvo prácticamente todos los aspectos del proyecto clasificados como secreto militar durante 30 años, la línea de COLOSSUS fue básicamente un callejón sin salida. Sólo vale la pena mencionarlo porque fue la primera computadora electrónica digital del mundo.

Además de destruir las máquinas de Zuse y estimular la construcción de COLOSSUS, la guerra también afectó la computación en Estados Unidos. El ejército necesitaba tablas de alcance para apuntar su artillería pesada, y producía esas tablas contratando a cientos de mujeres que las elaboraban utilizando calculadoras manuales (se pensaba que las mujeres eran más precisas que los hombres). No obstante, el proceso era muy tardado y los errores eran frecuentes.

John Mauchley, quien conocía el trabajo de Atanasoff y de Stibitz, se dio cuenta de que el ejército estaba interesado en calculadoras mecánicas. Al igual que muchos científicos de la computación que le siguieron, Mauchley elaboró una propuesta de subvención en la que pedía al ejército fondos para construir una computadora electrónica. La propuesta fue acepta-

da en 1943, y Mauchley y su estudiante de posgrado, J. Presper Eckert, procedieron a construir una computadora electrónica a la que llamaron **ENIAC** (*Electronic Numerical Integrator And Computer*). ENIAC consistía en 18,000 bulbos y 1500 relevadores, pesaba 30 toneladas y consumía 140 kilowatts de potencia. En términos de arquitectura, la máquina tenía 20 registros, cada uno capaz de almacenar un número decimal de 10 dígitos. (Un registro decimal es una memoria muy pequeña que puede almacenar un número menor que cierto número máximo de dígitos decimales, parecido al odómetro que registra la distancia recorrida por un automóvil.) ENIAC se programaba ajustando 6000 interruptores de multiposición y conectando numerosas bases con una verdadera maraña de cables interconectores.

La máquina no quedó terminada sino hasta 1946, demasiado tarde para realizar su tarea original. Sin embargo, como la guerra había terminado, se les permitió a Mauchley y Eckert organizar un curso de verano para describir el trabajo a sus colegas científicos. Ese curso de verano fue el principio del auge del interés en construir computadoras digitales grandes.

Después de ese histórico curso de verano, muchos otros investigadores se propusieron construir computadoras electrónicas. La primera que entró en operación fue EDSAC (1949), construida por Maurice Wilkes en la Universidad de Cambridge. Otras fueron JOHNIAC, de la Rand Corporation, ILLIAC de la Universidad de Illinois, MANIAC de Los Alamos Laboratory y WEIZAC del Instituto Weizmann de Israel.

Eckert y Mauchley pronto comenzaron a trabajar en un sucesor, **EDVAC** (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*). Sin embargo, ese proyecto quedó condenado al fracaso cuando ellos dejaron la Universidad de Pennsylvania para formar una compañía nueva, la Eckert-Mauchley Computer Corporation, en Filadelfia (todavía no se había creado Silicon Valley). Después de una serie de fusiones, esta compañía se convirtió en la moderna Unisys Corporation.

Como dato curioso, Eckert y Mauchley solicitaron una patente asegurando haber inventado la computadora digital. En retrospectiva, habría sido bueno tener una patente así. Después de años de pleitos, las cortes decidieron que la patente de Eckert y Mauchley no era válida y que John Atanasoff era el inventor de la computadora digital, aunque nunca la haya patentado.

Mientras Eckert y Mauchley estaban trabajando en la EDVAC, una de las personas que participaron en el proyecto ENIAC, John von Neumann, acudió al Institute of Advanced Studies de Princeton para construir su propia versión de EDVAC, la **máquina IAS**. Von Neuman fue un genio del calibre de Leonardo da Vinci; hablaba muchos idiomas, era experto en las ciencias físicas y en matemáticas, y recordaba perfectamente todo lo que había escuchado, visto o leído. Podía citar de memoria el texto exacto de libros que había leído hacía años. Cuando se interesó por las computadoras, ya era el matemático más eminente del mundo.

Una cosa que pronto fue obvia para él era que programar computadoras con un gran número de interruptores era lento, tedioso e inflexible. Von Neumann se dio cuenta de que el programa podía representarse en forma digital en la memoria de la computadora, junto con los datos. Él percibió también que la torpe aritmética decimal en serie utilizada por ENIAC, en la que cada dígito estaba representado por 10 bulbos (uno encendido y nueve apagados) podía ser sustituida por una aritmética binaria.

El diseño básico, que él describió por primera vez, ahora se conoce como **máquina de von Neumann**. Se usó en EDSAC, la primera computadora de programa almacenado, y sigue siendo la base de casi todas las computadoras digitales aun ahora, más de medio siglo después. Este diseño, y la máquina IAS, construida en colaboración con Herman Goldstine, ha tenido una influencia de tal magnitud que vale la pena describirla brevemente. En la figura 1-5 se presenta un bosquejo de su arquitectura.

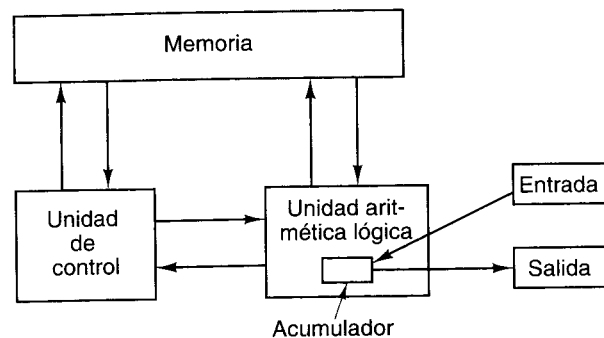


Figura 1-5. La máquina de von Neumann original.

La máquina de von Neumann tenía cinco partes básicas: la memoria, la unidad aritmética lógica, la unidad de control y el equipo de entrada y salida. La memoria constaba de 4096 palabras, cada una de las cuales contenía 40 bits que podían ser 0 o 1. Cada palabra contenía dos instrucciones de 20 bits o bien un entero con signo de 40 bits. Ocho bits de cada instrucción estaban dedicados a indicar el tipo de instrucción, y 12 bits se dedicaban a especificar una de las 4096 palabras de memoria.

Dentro de la unidad de aritmética lógica había un registro interno especial de 40 bits llamado **acumulador**. Una instrucción típica sumaba una palabra de la memoria al acumulador o almacenaba el contenido del acumulador en la memoria. La máquina no tenía aritmética de punto flotante porque von Neumann pensaba que cualquier matemático competente debería poder seguir mentalmente la pista al punto decimal (en realidad el punto binario).

Más o menos en las mismas fechas en que von Neumann estaba construyendo la máquina IAS, investigadores de MIT también estaban construyendo una computadora. A diferencia de IAS, ENIAC y otras máquinas de su clase, que empleaban palabras largas y estaban diseñadas para manipulación pesada de números, la máquina del MIT, Whirlwind I, tenía palabras de 16 bits y estaba diseñada para el control en tiempo real. Este proyecto dio pie a la invención de la memoria de núcleos magnéticos por Jay Forrester, y finalmente a la primera minicomputadora comercial.

Mientras todo esto estaba sucediendo, IBM era una compañía pequeña dedicada a fabricar perforadoras de tarjetas y máquinas clasificadoras de tarjetas. Aunque IBM había aportado parte del financiamiento de Aiken, no estaba muy interesada en las computadoras hasta que produjo la 701 en 1953, mucho después de que la compañía de Eckert y Mauchley se había convertido en la número uno del mercado comercial con su computadora UNIVAC.

La 701 tenía 2048 palabras de 36 bits, con dos instrucciones por palabra. Era la primera de una serie de máquinas científicas que llegaron a dominar la industria en el plazo de una década. Tres años después apareció la 704, que tenía 4K de memoria de núcleos, instrucciones de 36 bits y hardware de punto flotante. En 1958 IBM inició la producción de su última máquina de bulbos, la 709, que básicamente era una 704 más potente.

1.2.3 La segunda generación – transistores (1955-1965)

El transistor fue inventado en los Bell Labs en 1948 por John Bardeen, Walter Brattain y William Schockley, quienes fueron galardonados con el premio Nobel de física de 1956 por su trabajo. En un plazo de 10 años el transistor revolucionó a las computadoras, y para fines de la década de los cincuenta las computadoras de bulbos eran obsoletas. La primera computadora transistorizada se construyó en el Lincoln Laboratory del MIT, una máquina de 16 bits con un diseño parecido al de la Whirlwind I. Se le llamó **TX-0** (computadora Transistorizada eXperimental 0) y su único propósito era probar la TX-2, mucho más elegante.

La TX-2 no logró un progreso decisivo, pero uno de los ingenieros que trabajaban en el laboratorio, Kenneth Olsen, formó una compañía, Digital Equipment Corporation (DEC) en 1957 para fabricar una máquina comercial parecida a la TX-0. Tuvieron que pasar cuatro años para que apareciera esta máquina, la PDP-1, principalmente porque los inversionistas que financiaban a DEC creían firmemente que no había mercado para las computadoras. En vez de ello, DEC se dedicó primordialmente a vender pequeñas tarjetas de circuitos.

Cuando por fin la PDP-1 apareció en 1961, tenía 4K de palabras de 18 bits y un tiempo de ciclo de 5 μ s.† Este desempeño era la mitad del de la IBM 7090, la sucesora transistorizada de la 709 y la computadora más rápida del mundo en esas fechas. La PDP-1 costaba \$120,000 dólares; la 7090 costaba millones. DEC vendió docenas de PDP-1, y con esto la industria de las minicomputadoras había nacido.

Una de las primeras PDP-1 se entregó a MIT, donde rápidamente atrajo la atención de algunos de los jóvenes genios en formación tan comunes en esa institución. Una de las muchas innovaciones de la PDP-1 era una presentación visual y la capacidad de graficar puntos en cualquier lugar de su pantalla de 512 por 512. En poco tiempo, los estudiantes habían programado la PDP-1 para jugar guerras espaciales, y el mundo tuvo su primer juego de video.

Unos cuantos años después DEC introdujo la PDP-8, que era una máquina de 12 bits, pero mucho más económica que la PDP-1 (\$16,000). La PDP-8 tenía una importante innovación: un bus único, u ómnibus, que se muestra en la figura 1-6. Un **bus** es un conjunto de alambres en paralelo que sirve para conectar los componentes de una computadora. Esta arquitectura marcó una divergencia importante respecto a la máquina IAS centrada en la memoria, y ha sido adoptada por casi todas las computadoras pequeñas posteriores. DEC llegó a vender 50,000 PDP-8, lo que la estableció como líder en el negocio de las minicomputadoras.

†Prefijos métricos: mili = 10^{-3} , micro (μ) = 10^{-6} , nano = 10^{-9} ; kilo = 10^3 , mega = 10^6 , giga = 10^9 .

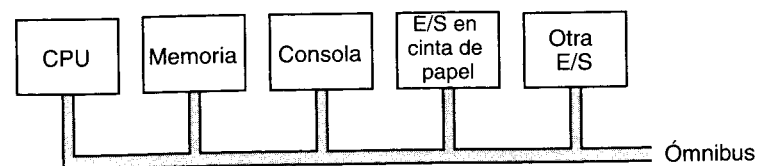


Figura 1-6. El ómnibus de la PDP-8.

Mientras tanto, la reacción de IBM ante el transistor fue construir una versión transistorizada de la 709, la 7090, como ya dijimos, y después la 7094. Ésta tenía un tiempo de ciclo de 2 μ s y una memoria de núcleos de 32 K con palabras de 36 bits. La 7090 y la 7094 marcaron el fin de las máquinas tipo ENIAC, y dominaron la computación científica gran parte de la década de los sesenta.

Al mismo tiempo que IBM se convertía en un protagonista importante en la computación científica con la 7094, estaba ganando enormes cantidades de dinero vendiendo una pequeña máquina orientada hacia los negocios: la 1401. Esta máquina podía leer y grabar cintas magnéticas, leer y perforar tarjetas, e imprimir salidas casi tan rápidamente como la 7094, a una fracción del precio. Era muy mala para la computación científica, pero era perfecta para la contabilidad comercial.

La 1401 era poco común en cuanto a que no tenía registros, y ni siquiera una longitud de palabra fija. Su memoria consistía en 4K bytes de 8 bits (4 KB[†]). Cada byte contenía un carácter de 6 bits, un bit administrativo y un bit que servía para indicar el fin de una palabra. Una instrucción MOVE (mover), por ejemplo, tenía una dirección de origen y una de destino, y comenzaba a transferir bytes del origen al destino hasta encontrar uno cuyo bit de fin de palabra valía 1.

En 1964 una compañía nueva, Control Data Corporation (CDC), introdujo la 6600, una máquina que era casi un orden de magnitud más rápida que la poderosa 7094. Para los “tritadores de números” fue amor a primera vista, y CDC estaba camino al éxito. El secreto de su velocidad, la razón por la que era mucho más rápida que la 7094, era que dentro de la CPU había una máquina con alto grado de paralelismo: contaba con varias unidades funcionales para sumar, otras para multiplicar y otras para dividir, y todas podían operar en paralelo. Aunque para aprovecharla al máximo se requería una programación cuidadosa, con un poco de esfuerzo era posible lograr la ejecución simultánea de 10 instrucciones.

Como si esto no fuera suficiente, la 6600 tenía en su interior varias computadoras pequeñas que la ayudaban, algo así como Blanca Nieves y las siete personas con disfunción vertical. Esto permitía a la CPU dedicar todo su tiempo a la trituración de números, dejando todos los detalles de control de trabajos y entrada/salida a las computadoras pequeñas. En retrospectiva, la 6600 se había adelantado décadas a su época. Muchas de las ideas fundamentales en que se basan las computadoras modernas se remontan directamente a la 6600.

El diseñador de la 6600, Seymour Cray, fue una figura legendaria, comparable con von Neumann. Dedicó su vida a construir máquinas cada vez más rápidas, ahora llamadas

[†]1K = 2^{10} = 1024, así que 1 KB = 1024 bytes; también 1M = 2^{20} = 1,048,576 bytes

supercomputadoras, entre las que figuraron la 6600, la 7600 y la Cray-1. También inventó un algoritmo para comprar automóviles que se ha hecho famoso: acudir a la concesionaria más cercana al hogar, apuntar al automóvil más cercano a la puerta, y decir: “Me llevo ése.” Este algoritmo desperdicia el mínimo de tiempo en hacer cosas sin importancia (como comprar automóviles) y deja el máximo de tiempo libre para hacer cosas importantes (como diseñar supercomputadoras).

Hubo muchas otras computadoras en esta era, pero una sobresale por una razón muy distinta y vale la pena mencionarla: la Burroughs B5000. Los diseñadores de máquinas como la PDP-1, la 7094 y la 6600 se concentraban totalmente en el hardware, ya sea en bajar su costo (DEC) o en hacerlo más rápido (IBM y CDC). El software casi no venía al caso. Los diseñadores de la B5000 adoptaron una estrategia distinta: construyeron una máquina con la intención específica de programarla en Algol 60, un precursor del Pascal, e incluyeron en el hardware muchas funciones que facilitaban la tarea del compilador. Había nacido la idea de que el software también cuenta. Lo malo es que la idea cayó en el olvido casi de inmediato.

1.2.4 La tercera generación – circuitos integrados (1965-1980)

La invención del circuito integrado de silicio por Robert Noyce en 1958 hizo posible colocar docenas de transistores en un solo chip. Este empaquetamiento permitió construir computadoras más pequeñas, más rápidas y menos costosas que sus predecesores transistorizados. A continuación se describen algunas de las computadoras más importantes de esta generación.

Para 1964 IBM era el principal fabricante de computadoras y tenía un problema grave con sus dos máquinas de mayor éxito, la 7094 y la 1401: eran absolutamente incompatibles. Una era un triturador de números de alta velocidad que empleaba aritmética binaria en paralelo con registros de 36 bits, y la otra era un procesador de entrada/salida que parecía hacer más de lo que en verdad hacía y que utilizaba aritmética decimal en serie con palabras de longitud variable en la memoria. Muchos de sus clientes corporativos tenían ambas máquinas y no les gustaba la idea de mantener dos departamentos de programación distintos que nada tenían en común.

Cuando llegó la hora de sustituir estas dos series, IBM dio un paso radical: introdujo una sola línea de productos, la System/360, basada en circuitos integrados, diseñada para computación tanto científica como comercial. La System/360 contenía muchas innovaciones, siendo la más importante que era una familia de cerca de media docena de máquinas con el mismo lenguaje ensamblador y con tamaño y potencia crecientes. Una compañía podía reemplazar su 1401 por una 360 Model 30 y su 7094 por una 360 Model 75. La Model 75 era más grande y rápida (y más costosa), pero el software escrito para ella podía, en principio, ejecutarse en la Model 30. En la práctica, el software escrito para un modelo inferior se ejecutaba en un modelo superior sin problemas, pero al pasar de una máquina superior a una inferior existía la posibilidad de que el programa no cupiera en la memoria. Aun así, esto representó un avance importante respecto a la situación que prevalecía con la 7094 y la 1401. La idea de las familias de máquinas de inmediato fue bien recibida, y en unos cuantos años casi todos los fabricantes de computadoras tenían una familia de máquinas similares que cubrían una

amplia gama de precio y desempeño. En la figura 1-7 se muestran algunas características de la familia 360 inicial. Posteriormente se introdujeron otros modelos.

Propiedad	Modelo 30	Modelo 40	Modelo 50	Modelo 65
Desempeño relativo	1	3.5	10	21
Tiempo de ciclo (ns)	1000	625	500	250
Memoria máxima (KB)	64	256	256	512
Bytes obtenidos por ciclo	1	2	4	16
Número máximo de canales de datos	3	3	4	6

Figura 1-7. La oferta inicial de la línea de productos IBM 360.

Otra importante innovación de la 360 fue la **multiprogramación**: tener varios programas en la memoria a la vez de modo que mientras uno estaba esperando el término de una operación de entrada/salida otro podía realizar cálculos.

La 360 también fue la primera máquina que podía emular (simular) otras computadoras. Los modelos más pequeños podían emular la 1401, y los más grandes podían emular la 7094, para que los clientes pudieran seguir usando sus antiguos programas binarios sin modificación en tanto efectuaban la conversión a la 360. Algunos modelos ejecutaban los programas de la 1401 con tal rapidez (mucho mayor que en la 1401 misma) que muchos clientes nunca convirtieron sus programas.

La emulación era fácil en la 360 porque todos los modelos iniciales y casi todos los modelos posteriores eran microprogramados. Lo único que tenía que hacer IBM era escribir tres microprogramas: para el conjunto de instrucciones nativo de la 360, para el conjunto de instrucciones de la 1401 y para el conjunto de instrucciones de la 7094. Esta flexibilidad fue una de las razones principales por las que se introdujo la microprogramación.

La 360 resolvió el dilema de binaria paralela *versus* decimal en serie con un término medio: la máquina tenía 16 registros de 32 bits para la aritmética binaria, pero su memoria estaba organizada en bytes, como la de la 1401. Además, contaba con instrucciones seriales tipo 1401 para transferir registros de tamaño variable en la memoria.

Otra característica importante de la 360 fue un espacio de direcciones enorme (para esa época) de 2^{24} bytes (16 megabytes). Puesto que la memoria costaba varios dólares por byte en esos días, 16 megabytes parecía casi infinito. Desafortunadamente, la serie 360 fue seguida más adelante por la serie 370, la 4300, la 3080 y la 3090, todas las cuales empleaban la misma arquitectura. Para mediados de los ochenta, el límite de 16 megabytes se había convertido en un verdadero problema, e IBM tuvo que abandonar parcialmente la compatibilidad al cambiar a las direcciones de 32 bits que se necesitaban para direccionar la nueva memoria de 2^{32} bytes.

En retrospectiva, puede argumentarse que como esas máquinas tenían palabras y registros de 32 bits, probablemente debían haber tenido también direcciones de 32 bits, pero en

esa época nadie podía imaginarse una máquina de 16 megabytes. Criticar a IBM por esta falta de visión es como criticar a un moderno fabricante de computadoras personales por tener direcciones de sólo 32 bits. En unos cuantos años las computadoras personales tal vez necesiten más de 4 GB de memoria, y entonces las direcciones de 32 bits serán intolerablemente pequeñas.

El mundo de las minicomputadoras también dio un gran paso en la tercera generación cuando DEC introdujo la serie PDP-11, un sucesor de la PDP-8 de 16 bits. En muchos sentidos, la serie PDP-11 era como el hermano menor de la serie 360, igual que la PDP-1 había sido como un hermanito de la 7094. Tanto la 360 como la PDP-11 tenían registros orientados hacia palabras y memoria orientada hacia bytes, y ambas abarcaban una gama muy amplia de precio y desempeño. La PDP-11 tuvo un éxito enorme, sobre todo en las universidades, y mantuvo la ventaja de DEC sobre los otros fabricantes de minicomputadoras.

1.2.5 La cuarta generación – integración a muy grande escala (1980-?)

Para los años ochenta la **VLSI (integración a muy grande escala, Very Large Scale Integration)** había hecho posible colocar primero decenas de miles, luego centenares de miles y por último millones de transistores en un solo chip. Este avance dio pie a computadoras más pequeñas y más rápidas. Antes de la PDP-1, las computadoras eran tan grandes y costosas que las compañías y universidades necesitaban departamentos especiales llamados **centros de cómputo** para operarlas. Con la llegada de la minicomputadora, un departamento podía comprar su propia computadora. Para 1980 los precios habían bajado tanto que una persona podía tener su propia computadora. Se había iniciado la era de la computadora personal.

Las computadoras personales se usaban de forma muy diferente que las computadoras grandes; se utilizaban para procesamiento de texto, hojas de cálculo y muchas otras aplicaciones altamente interactivas que las computadoras grandes no podían manejar bien.

Las primeras computadoras personales solían venderse como “kits”. Cada kit contenía una tarjeta de circuitos impresos, un puñado de chips, que típicamente incluían un Intel 8080, varios cables, una fuente de potencia y tal vez una unidad de disco flexible de 8 pulgadas. Al comprador correspondía armar las piezas para crear una computadora. No se proporcionaba software. Si usted quería software, lo escribía. Más adelante se popularizó el sistema operativo CP/M para el 8080, escrito por Gary Kildall. Era un verdadero sistema operativo para disco (flexible), con un sistema de archivos y comandos de usuario que se introducían con el teclado.

Otra de las primeras computadoras personales fue la Apple y posteriormente la Apple II, diseñadas por Steve Jobs y Steve Wozniak en la proverbial cochera. Esta máquina se popularizó mucho entre los usuarios caseros y en las escuelas y convirtió a Apple de la noche a la mañana en protagonista.

Después de muchas deliberaciones y de observar lo que otras compañías estaban haciendo, IBM, que entonces era la fuerza dominante en la industria de la computación, por fin decidió que quería ingresar en el negocio de las computadoras personales. En lugar de diseñar una máquina desde cero, empleando únicamente componentes de IBM, lo cual habría tardado mucho tiempo, IBM hizo algo totalmente fuera de carácter: entregó a uno de sus ejecutivos, Philip Estridge, una gran bolsa de dinero y le ordenó irse a algún lugar lejos de los entrometidos burócratas de las oficinas corporativas en Armonk, N.Y., y que no volviera

antes de tener una computadora personal funcional. Estridge se estableció lejos de la oficina central, en Boca Raton, Florida, escogió el Intel 8088 como su CPU, y construyó la IBM Personal Computer a partir de componentes comerciales. La máquina se introdujo en 1981 y se convirtió de inmediato en la computadora más vendida de la historia.

IBM hizo otra cosa fuera de carácter de la que más tarde se arrepentiría. En lugar de mantener totalmente en secreto el diseño de la máquina (o al menos protegido por una barrera de patentes), como normalmente hacía, publicó los planos completos, incluidos todos los diagramas de circuitos, en un libro que vendió a 49 dólares. Lo que se buscaba es que otras compañías fabricaran tarjetas que pudieran insertarse en la IBM PC (plugins) a fin de aumentar su flexibilidad y popularidad. Por desgracia para IBM, dado que el diseño ya era totalmente público y todas las piezas se podían conseguir fácilmente de proveedores comerciales con facilidad, muchas otras compañías comenzaron a fabricar clones de la PC, casi siempre a un costo mucho menor que lo que IBM cobraba. Fue así como nació toda una industria.

Aunque otras compañías fabricaron computadoras personales utilizando unas CPU que no eran de Intel, como las Commodore, Apple, Amiga y Atari, el ímpetu de la industria de la IBM PC era tan grande que las demás fueron arrolladas. Sólo unas cuantas sobrevivieron, aunque estuvieron restringidas a ciertos nichos del mercado, como estaciones de trabajo de ingeniería o supercomputadoras.

La versión inicial de la IBM PC venía equipada con el sistema operativo MS-DOS provisto por la entonces pequeña Microsoft Corporation. Cuando Intel logró producir CPU cada vez más potentes, IBM y Microsoft pudieron producir un sucesor del MS-DOS llamado OS/2, que contaba con una interfaz gráfica con el usuario similar a la de la Apple Macintosh. Mientras tanto, Microsoft creó también su propio sistema operativo Windows que se ejecutaba encima del MS-DOS, por si acaso el OS/2 no tenía aceptación. Sin abundar en la historia, el OS/2 no experimentó una buena acogida, IBM y Microsoft tuvieron una gran pelea extremadamente pública, y Microsoft se dedicó a hacer de Windows un enorme éxito. La forma en que la diminuta Intel y la todavía más diminuta Microsoft lograron destronar a IBM, una de las corporaciones más grandes, ricas y poderosas en la historia del mundo, es una parábola que sin duda se relata con lujo de detalle en escuelas de negocios de todo el mundo.

Para mediados de los ochenta una nueva idea llamada RISC comenzó a dominar, reemplazando arquitecturas complejas (CISC) por otras mucho más sencillas pero más rápidas. En los noventa comenzaron a aparecer las CPU superescalares. Estas máquinas podían ejecutar varias instrucciones al mismo tiempo, a menudo en un orden distinto del que tenían en el programa. Presentaremos los conceptos de CISC, RISC y superescalar en el capítulo 2 y los trataremos con detalle en todo el libro.

1.3 EL ZOOLÓGICO DE LAS COMPUTADORAS

En la sección anterior presentamos una muy breve historia de los sistemas de cómputo. En ésta examinaremos el presente y miraremos hacia el futuro. Aunque las computadoras personales son las computadoras más conocidas, hay otras clases de máquinas en uso actualmente, y vale la pena dar un vistazo a esas otras computadoras.

1.3.1 Fuerzas tecnológicas y económicas

La industria de la computación está avanzando como ninguna otra. La fuerza motriz es la capacidad de los fabricantes de chips para empaquetar cada vez más un chip. Un mayor número de transistores, que son diminutos interruptores, implica memorias más grandes y procesadores más potentes.

La rapidez del progreso tecnológico puede modelarse de acuerdo con una observación llamada **ley de Moore**, descubierta por Gordon Moore, cofundador y director de Intel, en 1965. Mientras preparaba un discurso para un grupo de la industria, Moore se dio cuenta de que cada nueva generación de chips de memoria se estaba introduciendo tres años después de la anterior. Puesto que cada nueva generación tenía cuatro veces más memoria que su predecesora, Moore se percató de que el número de transistores en un chip estaba aumentando de forma constante y predijo que este crecimiento continuaría durante varias décadas. Hoy día, la ley de Moore suele expresarse como que el número de transistores se duplica cada 18 meses. Cabe señalar que esto equivale a un incremento de cerca del 60% en el número de transistores cada año. Los tamaños de los chips de memoria y sus fechas de introducción, que se muestran en la figura 1-8, confirman que la ley de Moore se sigue cumpliendo.

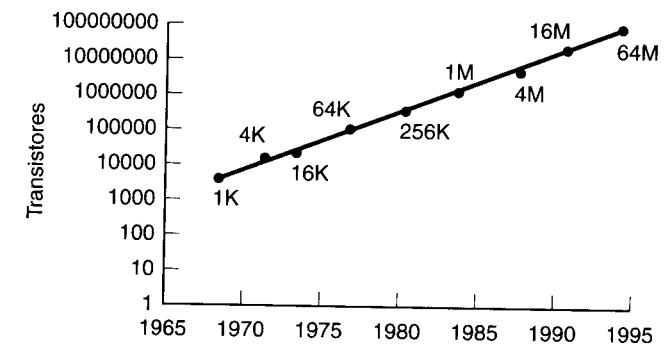


Figura 1-8. La ley de Moore predice un incremento anual de 60% en el número de transistores que se pueden colocar en un chip. Los puntos de datos dados en esta figura son tamaños de memoria, en bits.

Desde luego, la ley de Moore no es realmente una ley, sino sólo una observación empírica acerca de la rapidez con que los físicos de estado sólido y los ingenieros de proceso están empujando hacia adelante las fronteras tecnológicas, y una predicción de que seguirán haciéndolo al mismo ritmo en el futuro. Muchos observadores de la industria esperan que la ley de Moore se seguirá cumpliendo ya entrado el siglo XXI, posiblemente hasta 2020. En ese punto los transistores consistirán en un número demasiado reducido de átomos como para ser confiables, aunque los adelantos en la computación cuántica podrían hacer posible para entonces el almacenamiento de un bit utilizando el espín de un solo electrón.

La ley de Moore ha creado lo que algunos economistas llaman un **círculo virtuoso**. Los adelantos en la tecnología (transistores por chip) dan pie a mejores productos y precios más bajos. Los precios bajos dan pie a nuevas aplicaciones (nadie estaba creando juegos de video