Tema 8. El Microprocesador.

El microprocesador o *computador en un chip* como fue denominado en sus orígenes constituye sin lugar a dudas, "uno de los productos más revolucionarios en la historia de la humanidad", según palabras de Gordon Moore, cofundador de Intel.

Su aparición, tras pocos años de escasa trascendencia, significó un cambio radical en la industria de los computadores que se ha ido consolidando hasta nuestros días. En la historia de la Informática, este cambio radical ha señalado el comienzo de la llamada cuarta generación de computadores.

Por su potencia de cálculo, reducido coste, tamaño y consumo, el microprocesador ha permitido la incorporación de un cierto grado de inteligencia en infinidad de productos de consumo, extendiendo de forma en un principio inimaginable su campo de aplicación, y por tanto el de la informática en general.

Tras una aparición en cierto modo casual, el microprocesador ha seguido una evolución vertiginosa que se apoya en cuatro bases diferentes: la tecnología de integración de circuitos, que permite cada vez mayor potencia en un tamaño más reducido; la capacidad de las memorias que permite la ejecución eficiente de programas más complejos y la gestión de un mayor volumen de datos; la tecnología de los lenguajes de programación y sus compiladores, que hacen permiten programar de forma sencilla y eficiente aplicaciones de complejidad creciente; y las diversas aplicaciones que requieren incesantemente mayor potencia y funciones más elaboradas en los procesadores.

8.1 Historia del microprocesador

Aparición

En 1969, la empresa japonesa Busicom convocó un concurso cuyo objetivo era el diseño de un conjunto de chips para una calculadora. La empresa Intel, de reciente creación, resultó ganadora al presentar el diseño, realizado por el ingeniero Ted Hoff, de un conjunto de chips de propósito general.

El chip-set diseñado por Hoff constaba de cuatro elementos:

- Una Unidad Central de Proceso (CPU) de 4 bits.
- Una memoria ROM para el almacenamiento de programas.
- Una memoria RAM para almacenar operandos: datos y resultados.
- Un registro de desplazamiento de 10 bits para gestionar la entrada/salida.

Tras ciertos retrasos debidos a problemas de fabricación de los circuitos, la inclusión de Federico Faggin, ingeniero venido de la empresa competidora Fairchild, en el grupo de Ted Hoff permitió que en 197 estuviera completado el diseño físico de los circuitos, y en 1971 apareciera en el mercado el primer microprocesador, el 4004 de Intel. Como se ha dicho, este procesador es uno de los cuatro chips de una familia, llamada 4000 por su longitud de palabra de 4 bits, implementada en la nueva tecnología MOS integrada (inventada por F. Faggini). Los miembros de la familia 4000 eran los cuatro circuitos diseñados inicialmente por Ted Hoff:

- 4001: memoria ROM de 2048 bits.
- 4002: memoria RAM de 320 bits.
- 4003: registro de desplazamiento de 10 bits.
- 4004: CPU de 4 bits.

Durante el tiempo transcurrido entre el concurso de Busicom y la aparición de la familia 4000, el precio de las calculadoras sufrió una reducción importante, lo que llevo a que Busicom perdiera su interés inicial por el producto de Intel. Este hecho permitió la renegociación del contrato, consiguiendo Intel el derecho a la explotación del microprocesador en cualquier campo de aplicación, excepto la fabricación de calculadoras, que seguía perteneciendo a Busicom. De esta manera Intel gano el derecho casi exclusivo para la explotación de su gran invención, el microprocesador.

Los años siguientes a la aparición del microprocesador fueron a la vez inciertos para la continuidad del producto, y complejos por la diversidad de productos similares y competencia que se desencadeno. De hecho, en 1971 Texas Instruments anuncia su capacidad para fabricar circuitos integrados LSI (Large Scale of Integration, más de 1000 transistores por chip) en tecnología MOS. Intel continúa su fabricación de microprocesadores con el proyecto 1201 (luego paso a llamarse 8008, el segundo microprocesador de Intel) que pretende la integración en un solo chip MOS de más de 100 circuitos en tecnología TTL. Otras empresas comienzan a interesarse, pero sin decidirse a meterse de lleno en el diseño de microprocesadores.

Los problemas llegan debido a la falta de mercado para la familia 4000. Aunque es un producto innovador y con un previsible futuro, ninguna empresa se arriesga a incorporarlo en sus desarrollos. Intel afronta además problemas de organización interna frente al microprocesador: es una empresa especializada en la fabricación de memorias, y carece de la experiencia en programación necesaria para obtener productos útiles a partir de un sistema programable como es la familia 4000.

La llegada a la dirección de Intel de Ed Gelbach, procedente de Texas Instruments y con gran interés en el microprocesador, unido a un aumento de las ventas en verano de 1972 significo la superación del periodo de crisis. La eclosión real se dio en 1974, con la aparición del 8080, un nuevo diseño de Intel consistente en un microprocesador de 8 bits, implementado en tecnología nMOS (MOS de canal negativo) de mayor capacidad de integración. El 8080 fue incorporado en más de un centenar de diseños diferentes, en muy distintos campos de aplicación, con lo que el mercado comenzó a solicitar de los fabricantes cada vez más y más potentes microprocesadores.

Evolución: CISC.

La evolución inicial de los microprocesadores vino de la mano de la mejora de las técnicas de integración. Los microprocesadores podían incorporar cada vez más transistores, y ser por ello más potentes. Con la idea de facilitar cada vez más su programación, la complejidad potencial de los chips se invertía en aproximar los conjuntos de instrucciones nativos de los propios microprocesadores a los lenguajes de programación de alto nivel. Esta tendencia ha dado lugar a la llamada filosofía CISC (Complex Instruction Set Computer), donde el juego de instrucciones del microprocesador (computador) incluye cada vez instrucciones más complejas y de más alto nivel, cuya ejecución controla la circuitería, cada vez más potente, del chip.

Esta evolución ha ido pasando por varias generaciones de procesadores, cada vez con mayor complejidad, clasificadas además en función del ancho de palabra de la máquina, creciendo siempre por la disponibilidad de un mayor número de transistores en el chip.

En primer lugar se tienen los primeros procesadores, simples, con palabras de 8 bits y hasta 16 bits de direccionamiento. El número de transistores es inferior a los 10.000. Los miembros más destacados de esta generación serían el 8080 de Intel (1974), el 6800 de Motorola (1975), el Z-80 de Zilog (1976), por citar sólo algunos ejemplos.

En la segunda generación se incluyen procesadores de 16 bits, con más de 20 bits de direcciones, conteniendo menos de 100.000 transistores. La mayor complejidad disponible se utiliza en la inclusión de operaciones más complejas (típicamente de multiplicación y división de enteros, entre otras) y soporte para los sistemas operativos (distintos modos de operación, gestión avanzada de excepciones, instrucciones atómicas, facilidad para la gestión de la pila y el cambio de contexto...). Es destacable además la aparición de circuitos de soporte de complejidad similar a la de los microprocesadores para la construcción de computadores más complejos. Circuitos típicos serían las unidades en coma flotante (FPU), circuitos de gestión de memoria (MMU), circuitos especializados de E/S (PIO, UART,...). Entre los microprocesadores más destacables de esta generación estarían el TMS 99000 de Texas Instruments (1976) el 8086 (1978) y el 80286 (1982) de Intel, el 68000 de Motorola (1979) y el Z-8000 de Zilog (1979).

La siguiente generación de procesadores comprende a los de 32 bits, con otros tantos de direcciones. El número de transistores es menor que 1.000.000. Las instrucciones se aceleran mediante la inclusión de pipelines en el cauce de ejecución. Se ofrece apoyo más avanzado a los sistemas operativos, y muchos de los que antes eran chips de apoyo (FPU, MMU) así como las memorias caché se incluyen en el propio microprocesador. Debido a este aumento de complejidad con respecto a los orígenes, el nombre que va prevaleciendo es el de procesador pues el sufijo micro es cada vez menos justificable, salvo por el tamaño. Los procesadores más importantes de este grupo serían el NS32032 de National Semiconductors (1983), el 68020 (1983) y el 68030 (1987) de Motorola y el 80386 de Intel (1985).

Como se ha visto, en la evolución de los microprocesadores dentro de la filosofía CISC es constante el aumento de complejidad de los dispositivos permitido por una capacidad de integración cada vez mayor. Esto se traduce en un número mayor de unidades funcionales por chip, que permiten la incorporación características propias de los lenguajes de alto nivel, y soporte eficiente para los sistemas operativos.

Como ejemplos extremos, existe un gran número de procesadores muy especializados con características muy concretas, que al final han supuesto en la mayor parte de los casos un fracaso comercial debido a sus reducidas prestaciones (por exceso de complejidad) y a lo restrictivo de su aplicación. Estos ejemplos además han servido para fundamentar la crítica a la filosofía CISC. Se pueden citar dentro de este grupo el 432 de Intel (1981) orientado a la gestión de objetos y con una elevada fiabilidad, los Transputers de Inmos (1985) especialmente diseñados para el procesamiento paralelo pues permitían de forma nativa la gestión de comunicaciones o los numerosos procesadores LISP, por ejemplo el CLM de Texas Instruments (198x) especialmente diseñado para ser programado en dicho lenguaje.

Cambio a la filosofía RISC.

A principios de la década de los 80 se estableció un debate para reflexionar sobre la arquitectura de los computadores, considerando que el camino trazado por los CISC estaba desviándose hacia resultados poco satisfactorios. El debate, liderado fundamentalmente por las universidades estadounidenses de Stanford (de la que saldría la arquitectura MIPS) y Berkeley (origen de la arquitectura SPARC), partía de las idea de que el incremento en la complejidad de los conjuntos de instrucciones de los procesadores no era conveniente pues reducía la velocidad de ejecución de las instrucciones, incrementaba el tiempo de diseño de cada nueva generación y complicaba la tarea de diseñar compiladores eficientes.

Para justificar la veracidad de estos postulados, se realizaron numerosos estudios de mezcla de instrucciones, comprobándose que en realidad las instrucciones complejas son usadas muy raramente, mientras que un elevado porcentaje (80-90%) de las realmente ejecutadas constituye un grupo muy reducido (20-30%) de las disponibles, coincidiendo además con las más simples.

Basándose en estos resultados, se concluye que el diseño de nuevos procesadores debe seguir la simplicidad como norma general, incluyéndose pocas instrucciones, muy simples, que permitan una ejecución mucho más rápida de las mismas. Las instrucciones complejas se realizarán mediante secuencias de estas instrucciones más simples. Esta regla de diseño permite ahorrar espacio en el chip que puede ser utilizado para incluir cachés mayores, más registros, etcétera, y además hace que el proceso de diseño de cada nueva generación sea mucho más rápido y menos susceptible de errores.

De esta manera nace la filosofía RISC (Reduced Instruction Set Computer), que al incluir únicamente instrucciones sencillas en los procesadores, permite que las unidades centrales sean cableadas (más rápidas que las microprogramadas), que se añadan pipelines de ejecución para permitir la ejecución de una instrucción por ciclo de reloj, y que se acelere el acceso a memoria mediante el uso de la arquitectura Harvard (memorias separadas para datos e instrucciones) y load-store (accesos a memoria de datos explícitos en operaciones de transferencia, y nunca en operaciones computacionales). El ahorro en el número de transistores que permite esta simplicidad de diseño se invierte en aumentar el número de registros del procesador y el tamaño de las cachés, aliviando aún más los problemas de acceso a memoria.

Los procesadores RISC más importantes aparecidos durante la década de los 80 serían el R2000 (1986) y R3000 (1988) de MIPS, el Sparc de Sun MicroSystems (1987), el 88000 de Motorola (1988) y el 80860 de Intel (1989).

Las grandes empresas fabricantes de microprocesadores observaron, a finales de los 80, cómo nuevas empresas de reciente creación (MIPS, Sun MicroSystems) se convertían en un serio competidor pues ofrecían nuevos productos, los microprocesadores RISC, de mejores prestaciones que las líneas CISC bien establecidas en el mercado, como las familias 80x86 y 680x0. Estas últimas seguían con una parte significativa del mercado gracias a la gran plataforma de software existente, cuya compatibilidad con los nuevos procesadores de las familias CISC garantizaba la venta de millones de procesadores fundamentalmente para ordenadores personales y estaciones de trabajo de la gama baja. Por otra parte, las empresas recién llegadas al mercado, con su potente producto RISC, apostaban por el desarrollo de sistemas abiertos, basados en el sistema operativo UNIX, e iban ganando el mercado de las estaciones de trabajo de potencia media y alta.

La primera reacción de las empresas diseñadoras de procesadores CISC intentando no perder el mercado frente a los más potentes RISC fue la incorporación de características de estos últimos en sus propios diseños. De esta manera nacen los procesadores denominados CRISP (Complex and Reduced Instruction Set Processor), que incorporan un núcleo con filosofía RISC (pipeline, control cableado...) que ejecuta las instrucciones más simples de la arquitectura, mientras que las más complejas son ejecutadas mediante microcódigo, haciéndolas más lentas pero manteniendo la compatibilidad que reclama el mercado. Los procesadores más importantes de este grupo serían el 68040 de Motorola (1989) y los 80486 (1989), Pentium (1994) y Pentium Pro (1995) de Intel.

El segundo gran cambio de la época RISC ha sido a nivel de estrategia empresarial más que de cambio de diseño o tecnológico. Hasta la década de los 90 existían separadamente empresas productoras de ordenadores (personales o estaciones de trabajo) y de microprocesadores. Prácticamente sólo Sun Microsystems producía estaciones de trabajo en las que incorporaba su propio procesador, una implementación de la arquitectura libre Sparc. El resto de fabricantes de ordenadores (sin considerar entre estos a los supercomputadores, que requerirían tratamiento aparte) utilizaban procesadores o diseños de otras empresas.

A principios de los años 90 el panorama empieza a cambiar. Las empresas de ordenadores comienzan a acercarse más al mercado de los microprocesadores, bien produciendo los suyos propios para sus máquinas, bien firmando acuerdos de colaboración muy estrechos con fabricantes de microprocesadores bien asentados. En este sentido, cabe destacar ciertas empresas que de una u otra forma han seguido la línea descrita:

IBM: En 1990, con la finalidad de introducirse en el mundo de las estaciones de trabajo UNIX, IBM fabrica su primer procesador RISC, el RS/6000 primera implementación de la arquitectura POWER. Esta línea ha seguido evolucionando con procesadores de mayores prestaciones, mientras que para continuar con el mercado de los ordenadores personales de la gama alta, IBM firma un acuerdo con Motorola y, junto con Apple (previamente comprada por IBM), se lanza entre 1991 y 1992 la familia de procesadores PowerPC.

Hewlett-Packard: Bien introducido en el mercado de las estaciones de trabajo UNIX desde tiempo atrás, con procesadores Motorola de la familia 680x0, en 1992 HP lanza su propia arquitectura RISC, llamada Performance Architecture (PA-RISC), en base a la cual diseña su nueva familia de estaciones de trabajo, la serie 700. En la actualidad HP continúa sacando nuevas versiones de su arquitectura PA-RISC al tiempo que prepara junto con Intel, empresa con la que ha firmado un acuerdo de colaboración, un procesador para la próxima generación de estaciones de trabajo.

Sun MicroSystems: Como se ha dicho antes, Sun es una empresa pionera en el diseño de procesadores RISC. Partiendo, como en el caso anterior, de estaciones de trabajo basadas en procesadores de Motorola, a partir de 1987 prepara la nueva familia de workstations, llamada Sun Sparc porque incorpora éste procesador RISC. Desde entonces hasta ahora, Sun ha continuado con su línea de estaciones de trabajo basadas en versiones más potentes de la arquitectura Sparc: SuperSparc (1993), HyperSparc (1994), UltraSparc(1995)...

Silicon Graphics: Como su nombre indica, la empresa SG comenzó con productos especialmente diseñados para la síntesis y gestión de imágenes y gráficos, para ser en la actualidad una de las más importantes empresas vendedoras de estaciones de trabajo de propósito general. Inicialmente utilizaba procesadores RISC de la empresa MIPS, siendo muy famosas por su calidad las máquinas basadas en el procesador R4000 (1992). En 1993 SG compra MIPS, para a partir de ese momento poseer la empresa que fabrique los procesadores para sus máquinas. Desde entonces han aparecido el R8000 (1994) y el R10000 (1996).

Digital Equipment Corporation: En 1992, para afrontar la grave crisis en que estaba sumida la empresa, DEC sacó al mercado su potente procesador RISC llamado Alpha. Hasta ese momento, DEC había seguido con su propia arquitectura, llamada VAX, y sus propias implementaciones. Desde la aparición del Alpha las nuevas máquinas, basadas en este procesador, se han introducido en el mercado de las estaciones de trabajo UNIX aunque sin la misma fuerza que otras empresas de las antes mencionadas.

8.2. Evolución: Tecnología y prestaciones.

Al hablar de la evolución de los microprocesadores, nos encontramos ante un producto que ha sufrido, desde su aparición en 1971, un incremento en potencia con un factor 25.000, al tiempo que el precio, a igual potencia, se divide entre 10 cada 10 años.

Es evidente que tal evolución trae unas consecuencias decisivas para la historia, al menos, de la tecnología de la humanidad. Es también evidente que se hace necesario señalar los factores que determinan tal evolución.

Tecnología de integración.

Tal vez el factor más determinante del rápido incremento en potencia de los microprocesadores (así como de todos los circuitos electrónicos en general) es el avance de la tecnología de integración, que hoy permite ubicar casi 10.000.000 de transistores en un cuadrado de poco más de un centímetro de lado. La mejora en los procesos de fabricación de circuitos integrados hace posible este avance.

Cada día se reduce el tamaño del menor elemento que se puede dibujar en una pastilla de silicio (minimum feature size en inglés) estando en la actualidad por debajo de las 0,35 micras. Al mismo tiempo, la limpieza de las salas blancas (lugares donde se fabrican los circuitos integrados a partir del silicio original) hace que el riesgo de contaminación por impurezas sea menor, con lo que se puede aumentar el tamaño del lado de los circuitos. De esta manera se pueden incluir muchos más transistores en un solo chip, haciendo que este sea no sólo más potente, sino también más rápido pues las distancias entre componentes se acortan.

Esta evolución constante se encuentra lógicamente con problemas de diversa índole. A nivel tecnológico, el minimum feature size de 0,35 micras está en los límites de la tecnología óptica (los circuitos se fabrican mediante un proceso similar al fotográfico, mediante exposición selectiva por medio de máscaras del silicio a alguna radiación, en este caso, luz). La solución pasa por las tecnologías de Rayos X o haces de electrones, que al tener menor longitud de onda que la luz permiten una mayor resolución.

A nivel económico los problemas también son grandes. Cada vez que se implanta una nueva tecnología, el precio de las fábricas capaces de trabajar con ellas se duplica. A este ritmo, muchas empresas fabricantes de semiconductores no podrán afrontar el desembolso económico que el mercado les reclamará en breve.

A nivel físico, incluso, está claro que la capacidad de integración no puede seguir indefinidamente. Las moléculas tiene un tamaño real, del cual no se puede descender. Con tamaños muy pequeños las leyes que gobiernan el comportamiento de los semiconductores se ven dominadas por los efectos cuánticos, lo que requiere un replanteamiento de la teoría de funcionamiento de los sistemas. Algunas soluciones pasan por sustituir la tecnología actual de fabricación de circuitos, basada en el silicio como material de soporte, por la tecnología de arseniuro de galio (GaAs), más pequeño y rápido (con menos oposición a la circulación de electrones).

Otras tendencias recientes más ingeniosas para conseguir incluir más transistores en cada circuito integrado pasan por la disposición de varios circuitos de forma vertical sobre el principal, en una estructura en tres dimensiones (la integración se realiza únicamente en dos dimensiones). Un ejemplo sería el último procesador de Sun MicroSystems (1997) que sitúa parte del circuito integrado en las alas del disipador de calor del procesador.

Potencia de los procesadores.

La ley de Moore indica que el aumento de la potencia de los procesadores ha seguido una proporción constante en los últimos años. Esta ley parece seguir siendo válida en un futuro a corto y medio plazo. Las razones de índole tecnológico han sido descritas en el apartado anterior. En un segundo lugar estarían las innovaciones en el diseño, mediante técnicas que permiten aumentar el rendimiento con una tecnología dada.

Entre las aportaciones de diseño está la inclusión de memorias caché, más rápidas que las memorias normales tanto por su tecnología como por su proximidad al procesador. Sin embargo, el factor de diseño fundamental para incrementar la potencia de los procesadores es la explotación del paralelismo a nivel de instrucción.

En un principio los procesadores ejecutaban en serie las instrucciones de su código básico, y no comenzaban la ejecución de una instrucción hasta que no acababan con la anterior. Muy pronto se vio que los pasos que se llevan a cabo al ejecutar una instrucción pueden separarse, de manera que mientras se esta realizando, por ejemplo la segunda fase de una instrucción determinada, se puede ejecutar al mismo tiempo la primera fase de la instrucción siguiente. Dependiendo del numero de fases aisladas en que se descomponga la ejecución, se estarán ejecutando a la vez varias instrucciones. A esta técnica se le denomina segmentación o pipelining, y se emplea hoy en día en todos los procesadores.

Llevando la segmentación más allá, si el procesador es capaz de leer de memoria más de una instrucción a un tiempo, y de ejecutar en unidades funcionales distintas estas instrucciones, se tiene un paralelismo total. si cada una de las unidades de ejecución está segmentada, la explotación del paralelismo es aún mayor. La aplicación de esta técnica, donde se tienen entre 2 y 4 unidades funcionales distintas, da lugar a los procesadores llamados superescalares (o VLIW cuando la planificación es estática).

El paralelismo, como era de esperar, presenta también ciertos problemas. Por una parte, el paralelismo en general presenta problemas de programación, ya que los algoritmos paralelos se resuelven de forma eficiente con arquitecturas especificas, siendo mas difícil hacerlo con sistemas de propósito general.

Por otra parte, estudios efectuados sobre código real demuestran que el nivel de paralelismo de los programas para microprocesadores estándar casi nunca es mayor que 4, por lo que aunque se pueda aumentar indefinidamente el número de unidades funcionales de un procesador superescalar, buena parte de ellas estarán ociosas la mayor parte del tiempo y no se observarán mejoras en los tiempos de ejecución.

Capacidad de las memorias.

Es evidente que si los microprocesadores deben ser capaces de ejecutar cada vez más instrucciones por unidad de tiempo, la velocidad del dispositivo donde se almacenen esas instrucciones debe crecer a su vez al mismo ritmo. De ahí que la relación entre las prestaciones de los procesadores y la capacidad y velocidad de las memorias sea un factor decisivo en el aumento de potencia de los ordenadores.

Una primera técnica, incluida entre las mejoras aplicadas a los procesadores, es la inclusión de memorias caché, rápidas e integradas en el mismo chip del procesador para reducir tiempos de acceso. En cualquier caso, la mayor cantidad de memoria de un sistema reside en los chips de memoria externos a la CPU. Son estas memorias las que han seguido un ritmo de mejora constante, si bien inferior al del procesador.

Como en el caso anterior, esta mejora se debe a dos factores. Por una parte el tecnológico, donde cada mejora de la tecnología de fabricación de circuitos integrados lleva consigo un aumento en la capacidad y en la velocidad de la memoria. Por otra parte aparecen diseños que se adaptan mejor a las necesidades de los procesadores, como son los accesos en modo ráfaga (burst), las memorias EDO (extended data output), memorias con pipeline para solapar la adquisición de dirección con la obtención del dato, las memorias síncronas, etcétera.

De todas formas, como ya se ha dicho, el crecimiento de potencia en las memorias es siempre inferior al del procesador, por lo que hoy en día representan el principal freno al aumento de prestaciones en los sistemas informáticos.