

# Microprocesadores del año 2020

David A. Patterson

*Dentro de un cuarto de siglo,  
la potencia de cualquier ordenador igualará  
a la de todos los existentes hoy en el Valle del Silicio*

A diferencia de otras muchas técnicas que se esfumaron al poco de haber ilusionado nuestra imaginación, la informática ha transformado nuestra sociedad. La locomotora de esta revolución en marcha es el microprocesador. Estas laminillas de silicio han originado un sinfín de inventos, como los ordenadores portátiles y los aparatos de telefax, y han aportado "inteligencia" a los automóviles modernos y a los relojes de pulsera. Es increíble que su rendimiento haya mejorado 25.000 veces desde su invención, hace sólo un cuarto de siglo.

Dos fueron los inventos que prendieron la mecha de la revolución informática. Consistió el primero en la noción de programa almacenado. Todos los sistemas de cómputo construidos desde los años cuarenta se han

adherido a este modelo, que prescribe un procesador para triturar números y una memoria para el almacenaje de datos y de programas. La ventaja de tal sistema estriba en que, por la facilidad con que pueden intercambiarse los programas almacenados, un mismo equipo material realiza tareas diversas. Sin esa versatilidad, los ordenadores no se hubieran generalizado. Además, en los últimos años de ese decenio, se inventó el transistor. Estos conmutadores de silicio eran muchísimo menores que las válvulas termoiónicas utilizadas en los primeros circuitos, por lo que permitieron la creación de dispositivos electrónicos mucho más rápidos.

Hubieron de transcurrir más de diez años antes de que los transistores y los programas almacenados se aunaran en la misma máquina. Y hubo que

esperar hasta 1971 para que se produjera la conjunción más importante, representada en el microprocesador Intel 4004. Este procesador fue el primero de los construidos en una sola laminilla de silicio. Por su diminuto tamaño, se dio en llamarlo microprocesador.

El método que desde entonces han seguido los fabricantes para la producción en masa de microprocesadores se parece mucho al de hornear una pizza: la masa —de silicio— empieza siendo fina y redonda. Se depositan sobre ella ciertos aderezos químicos y se lleva el montaje a un horno. El calor transforma los aderezos en transistores, conductores y aislantes. No es de sorprender que el proceso, repetido quizá veinte veces, sea más exigente que la cochura de una pizza. Una mera partícula de polvo puede deteriorar los

DAVID A. PATTERSON es titular de la cátedra E. H. y M. E. Pardee de la Universidad de California.

minúsculos transistores. Incluso las vibraciones producidas por un camión al pasar pueden desalinearse los ingredientes, echando a perder el producto final. Pero suponiendo que nada de esto ocurra, la oblea resultante se divide en piezas individuales, las laminillas o pastillas.

Aunque todavía se sigue utilizando esta vieja receta, con el transcurso del tiempo la línea de producción ha ido fabricando microcircuitos cada vez más veloces y más baratos, eructando obleas cada vez mayores y transistores cada vez más pequeños. Esta tendencia pone de relieve un importante principio de la economía de los microprocesadores: cuantos más microcircuitos por oblea, menor su costo. Los microcircuitos grandes son más veloces que los pequeños porque pueden albergar mayor número de transistores. El reciente procesador P6 de Intel, sea por caso, contiene cinco millones y medio de transistores y es mucho mayor que el Intel 4004, que alojaba 2300. Pero, cuanto mayor es el microcódigo, mayor es también la probabilidad de que tenga defectos.

Desde hace muy poco los microprocesadores han adquirido mayor potencia merced a un cambio de enfoque en su diseño. Los ingenieros de microcircuitos adoptan ahora un método cuantitativo para establecer la organización de los ordenadores. El desarrollo de los equipos va precedido de cuidadosos experimentos y se utilizan procedimientos de evaluación muy finos para juzgar sus éxitos. Los fabricantes fueron adoptando concertadamente esta metodología de diseño durante los años ochenta; gracias a ello la tasa de perfeccionamiento de la técnica de microprocesadores se ha elevado desde el 35 por ciento anual de hace sólo un decenio a cosa de un 55 por ciento al año, o sea, casi un 4 por ciento cada mes. Los procesadores triplican ahora la celeridad pronosticada a comienzos de los ochenta; es como si nuestro deseo nos hubiera sido

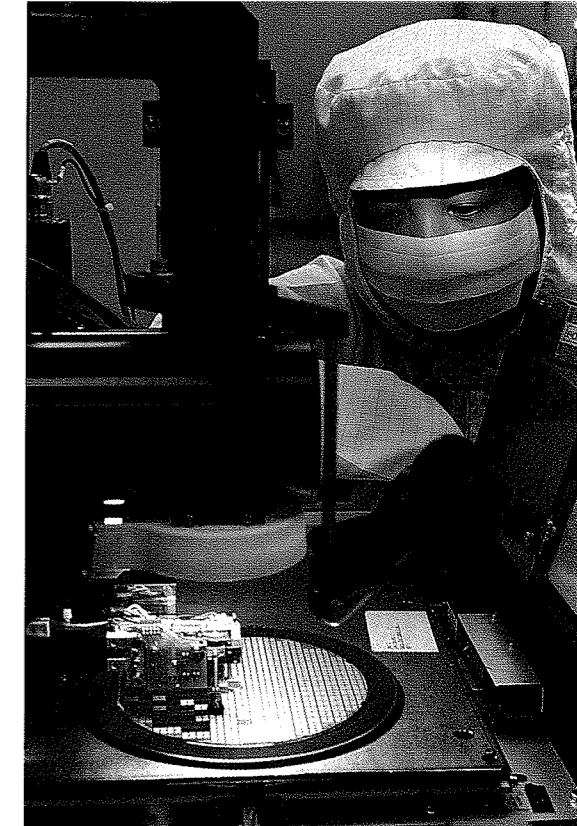
**1. LAS OBLEAS DE SILICIO actuales (fondo de la imagen) son mucho mayores que las que albergaron el primer microprocesador, el Intel 4004 (en primer plano). Una de las razones que permiten hacerlas mayores es que el proceso de manufactura es más limpio (recuadro).**

concedido y dispusiéramos de máquinas venidas del año 2000.

Además de las mejoras conseguidas en las líneas de producción y en las técnicas de tratamiento del silicio, los microprocesadores también se han beneficiado de cambios en los sistemas de diseño, avances que, en un futuro cercano, desembocarán en nuevos progresos. Una de las técnicas clave es el procesamiento concurrente por etapas (conocido en la jerga por *pipelining*, o "canalización"). Quienquiera que haya tenido que hacer la colada ha utilizado de forma intuitiva esta táctica. En un proceso no concurrente se procede como sigue: se llena la lavadora con una carga de ropa sucia; terminado el lavado, la colada húmeda se lleva a la secadora y cuando la secadora acaba, se plancha la ropa. Terminada esta tarea, se empieza otra vez. De esta forma, si para dejar lista una carga se necesita una hora, para veinte cargas harán falta veinte horas.

El proceso de canalización es mucho más rápido. En cuanto la primera carga se encuentra en la secadora, se introduce en la lavadora una segunda, y así en lo sucesivo. Todas las fases del proceso se desarrollan concurrentemente. Resulta paradójico que se tarde lo mismo en lavar por uno y otro método un solo calcetín sucio. Pero la canalización es más rápida, en el sentido de que son más las cargas terminadas por hora. Suponiendo que cada fase requiera el mismo tiempo, el tiempo ahorrado por este método es proporcional al número de etapas en que se descomponga la tarea. En el ejemplo de la colada, el lavado concurrente consta de cuatro fases, por lo que sería casi cuatro veces más rápido que la colada doméstica habitual.

El proceso concurrente se encarga de que los microprocesadores sean mucho más veloces. Por así decirlo, los proyectistas de microcircuitos "bombean" por conductos distintos las instrucciones de bajo nivel enviadas al equipo físico. Los primeros microprocesadores de esta técnica utilizaban una división en cinco etapas. (El número de etapas ejecutadas por segundo está dado por la "velocidad de reloj". Un ordenador personal provisto de un reloj de 100 megahertz ejecuta, pues, 100 millones de etapas por segundo.) Dado que la aceleración por canalización es igual al número de etapas, los microprocesadores han adoptado sistemas de ocho o más etapas. Un microprocesador fabricado en 1995 se vale de este recurso para alcanzar una velocidad de reloj de 300 megahertz. Conforme

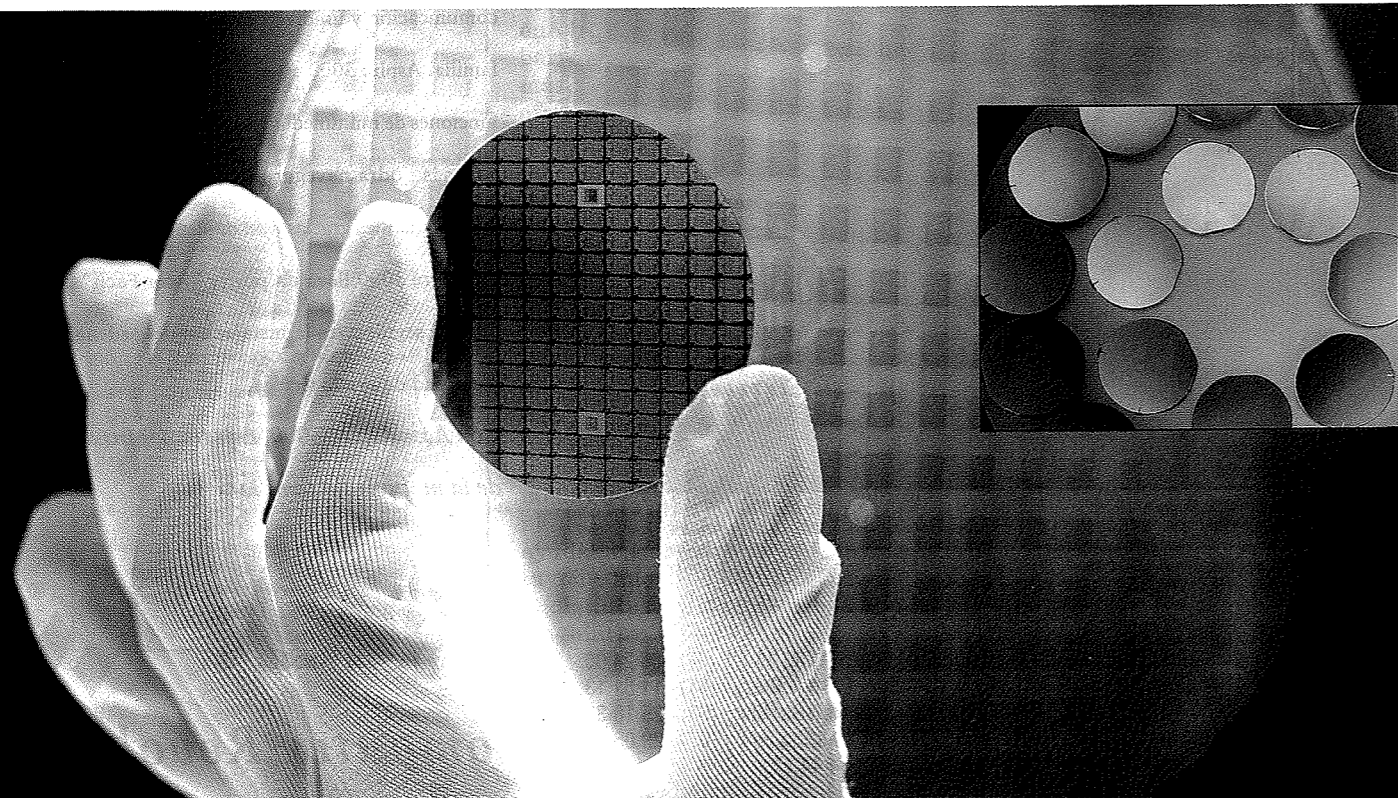


**2. LAS SALAS BLANCAS, en las que se construyen las obleas, están diseñadas para reducir al mínimo la manipulación por seres humanos y protegerlas de las partículas que flotan en el aire.**

avanzan las máquinas hacia el siglo venidero, son de esperar mayores números de etapas y velocidades de reloj más elevadas.

Buscando la forma de fabricar microcircuitos más rápidos, los ingenieros han empezado a incluir más circuitería, para ejecutar más tareas en cada fase del proceso por etapas. Este método ha recibido el apodo de procesamiento "superescalar". Una lavadora superescalar, por ejemplo, utilizaría máquinas industriales, capaces de lavar, digamos, triple carga de una vez. Los microprocesadores superescalares modernos tratan de realizar de tres a seis instrucciones en cada etapa. Por tanto un microprocesador superescalar de cuatro vías, con reloj de 250 megahertz, puede ejecutar 1000 millones de instrucciones por segundo. Un microprocesador del siglo XXI podría lanzar docenas de instrucciones en cada etapa.

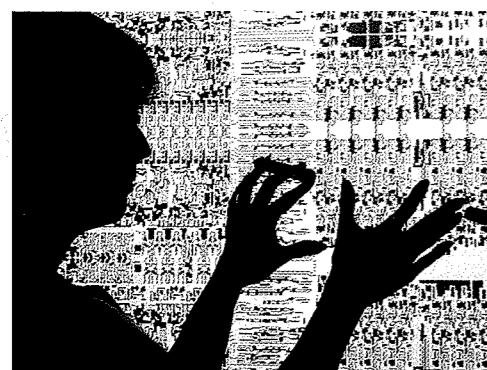
Aunque factibles, las mejoras en circuitos de proceso resultarán inútiles si no van a la par con ganancias similares en los elementos de memoria. Desde que a mediados de los años setenta quedaron disponibles las pastillas de memoria de acceso aleatorio (RAM), la capacidad de éstas ha venido cuadruplicándose cada tres años. Pero la velocidad de las memo-



## Los límites de la litografía

Aunque los microprocesadores continuarán mejorando con rapidez, no es seguro que tal progreso mantenga un paso constante. No está claro cómo construir transistores más pequeños y más rápidos. Los métodos fotolitográficos en uso están encontrando limitaciones serias. Si no se consigue resolver este problema, el progreso que venimos disfrutando desde hace decenios se detendrá chirriando.

En fotolitografía se utiliza luz para transferir las configuraciones circunferenciales desde una plantilla de cuarzo, llamada máscara, a la superficie de una laminilla de silicio. La técnica actual permite trazar en esta lámina elementos cuya anchura no baje de unas 0,35 micras. Si esta anchura pudiera acortarse a la mitad, los transistores podrían ser cuatro veces más pequeños, pues se trata de dispositivos esencialmente bidimensionales. Pero parece imposible construir elementos tan diminutos mediante la luz: las ondas luminosas son demasiado anchas. Muchas compañías han investigado la posibilidad de emplear rayos X, hasta la fecha sin éxito.



REDUCCION DE LAS MASCARAS y su proyección sobre obleas para fabricar circuitos.

No faltan propuestas de otros tipos; por ejemplo, utilizar los haces de electrones con los que se crean las máscaras de cuarzo empleadas para configurar las obleas de silicio. El fino chorro de partículas cargadas podría ir trazando directamente sobre la laminilla, una por una, las líneas de un diagrama circuital. Aunque se trata de una solución factible, resulta lentísima y, en consecuencia, muy costosa.

Además de los obstáculos de índole técnica, el perfeccionamiento de los microprocesadores está amenazado también por el costo de las plantas de manufactura. Estos complejos cuestan hoy mil veces más que hace treinta años. Tanto los compradores como los vendedores de equipos para semiconductores se atienen a la regla de que la reducción a la mitad del tamaño del elemento mínimo provoca la duplicación del precio. Como es obvio, aunque se descubran métodos innovadores, los ingresos generados por la venta de láminas menores habrán de duplicarse para asegurar la continuada inversión en nuevas líneas. Esta regla solamente podrá cumplirse creando más laminillas o encareciéndolas. (D.A.P.)

rias no ha podido mantener este ritmo. Y el vacío entre la velocidad máxima de los procesadores y la velocidad máxima de las memorias se está ensanchando.

Un recurso habitual consiste en instalar un tampón o antememoria (*cache memory*) en el propio procesador. La antememoria alberga aquellos segmentos de programa que se emplean con mayor frecuencia, lo cual evita en muchas ocasiones que el procesador haya de recurrir a la memoria externa. Algunos microprocesadores dedican ya tantos transistores a la antememoria como al procesador. Los microprocesadores del futuro asignarán todavía más recursos a antememoria,

para mejor salvar la diferencia de velocidades.

El santo grial de la informática se esconde en el "procesamiento en paralelo", que proporciona todos los beneficios de un solo procesador rápido haciendo funcionar simultáneamente muchos procesadores de bajo costo. En nuestro símil, podríamos ir a una lavandería y utilizar a la vez 20 lavadoras y 20 secadoras para hacer simultáneamente 20 cargas de colada. Como es obvio, el proceso en paralelo constituye una solución poco económica para cargas pequeñas. Y la construcción de un programa capaz de utilizar 20 procesadores a la vez es mucho más difícil que la distribución de colada

entre 20 lavadoras, puesto que tales programas tienen que especificar qué instrucciones han de ejecutarse en cada momento por cada uno de los procesadores.

El procesamiento superescalar guarda semejanzas con el procesamiento en paralelo y es más popular, porque el propio equipo determina automáticamente las instrucciones lanzables al mismo tiempo. Pero carece de su potencial de proceso. Si la confección de los programas necesarios no resultara tan difícil, los procesadores en paralelo podrían adquirir toda la potencia que uno pudiera permitirse. La cruda realidad es que el proceso en paralelo sólo resulta práctico para unos cuantos tipos de programa.

Repasando viejos artículos me he topado con fantásticas predicciones sobre los ordenadores de 1995. No pocos afirmaban que la electrónica cedería el paso a los dispositivos ópticos; otros, que los ordenadores serían de materiales biológicos; que se abandonaría la noción de programa almacenado. Tales visiones demuestran cuán imposible resulta prever qué inventos cuajarán y revolucionarán el sector informático. En mi carrera profesional he visto el asentamiento de sólo tres nuevas técnicas: los microprocesadores, las memorias de acceso aleatorio y las fibras ópticas. Decenios después de su puesta de largo, su influjo no se ha debilitado.

No cabe duda de que en los próximos 25 años se producirán algunos inventos que modificarán la informática. Mi conjetura es, sin embargo, que la noción de programa almacenado es demasiado elegante para que pueda prescindirse de ella fácilmente. Estoy convencido de que los ordenadores futuros serán muy similares a las máquinas del pasado, aun cuando se construyan con materiales muy distintos. No creo que el microprocesador del año 2020 deje boquiabiertas a las personas de nuestro tiempo, aunque los microcircuitos más rápidos puedan ser mucho mayores que la primera oblea de silicio y pese a que los más económicos puedan ser mucho más diminutos que el Intel 4004 original.

Las técnicas de canalización, de antememoria y la organización superescalar continuarán desempeñando papeles principales en el progreso de la técnica de microprocesadores y, si las esperanzas se materializan, a ellas se sumará el procesamiento en paralelo. Lo que va a resultar pasmoso es que habrá microprocesadores en todo, desde los interruptores de la luz hasta los pedazos de papel.

## ¿Y después del año 2020?

Los diseños microelectrónicos actuales, que tienen en sus entrañas una formidable capacidad innovadora, dominarán buena parte del siglo XXI. Esto no impide que muchos laboratorios exploren técnicas novedosas, aplicables tal vez al diseño de nuevas generaciones de ordenadores y de dispositivos microelectrónicos. En ciertos casos dichas técnicas permitirían que los diseños de microcircuitos alcanzasen una miniaturización imposible de obtener por técnicas parecidas a las litográficas al uso. Entre las líneas de investigación acometidas destacan:

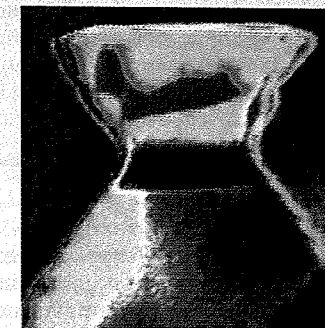
**Puntos cuánticos.** Los puntos cuánticos son disposiciones moleculares que permiten atrapar electrones individuales y registrar sus movimientos. En teoría, estos dispositivos pueden servir de registros binarios en los que la presencia o ausencia de un electrón sirve para representar el 0 o el 1 de un bit de datos. Una variante de este esquema consiste en que, al incidir luz láser sobre átomos, podría hacerlos saltar de su estado electrónico fundamental a un estado excitado, cambiando así el valor del bit. Pero al hacer tan extremadamente pequeños los transistores y los conductores, ocurre que los efectos cuánticos comienzan a perturbar su función. Los componentes lógicos mantienen con menor fiabilidad sus valores 0 y 1, porque resulta difícil especificar las ubicaciones de electrones individuales. Sin embargo, podría sacarse partido de esta propiedad: Seth Lloyd y otros están estudiando la posibilidad de desarrollar técnicas cuánticas de computación que capitalicen el comportamiento no-clásico de los dispositivos.

**Computación molecular.** En lugar de construir componentes de silicio, algunos investigadores están tratando de desarrollar sistemas de almacenamiento de datos con moléculas biológicas. Robert L. Birge estudia el potencial computacional de moléculas relacionadas con la bacterio-

rodopsina, un pigmento que altera su configuración en respuesta a la luz. Una ventaja de tal molécula es que podría emplearse en un computador óptico, en el cual chorros de fotones desempeñarían el papel de los electrones. Otra consiste en que muchas de estas moléculas podrían sintetizarse por microorganismos. Según ciertas estimaciones, las biomoléculas fotónicamente activadas podrían quedar concatenadas en un sistema de memoria tridimensional cuya capacidad llegaría a ser 300 veces mayor que los CD-ROM actuales.

**Puertas lógicas nanomecánicas.** En estos sistemas, para realizar operaciones lógicas se procedería a desplazar físicamente diminutos haces o filamentos de un átomo de espesor.

**Puertas lógicas reversibles.** Conforme aumenta la densidad de componentes de los microcircuitos, más difícil se torna la disipación del calor generado en los cómputos. Se está valorando la posibilidad de reponer las capacitancias a su estado original cuando acaba un cálculo. Dado que las puertas lógicas reversibles recapturarían parte de la energía consumida, en ellas se disiparía menos calor.



UN PUNTO CUANTICO (violeta) atrapa electrones en este semiconductor.

La Redacción

Los microprocesadores y las memorias se fabrican actualmente en líneas de manufactura distintas, pero no es obligado que sea así. Quizás en un futuro cercano ambos queden asociados en una misma micropastilla, igual que el microprocesador casó los diversos componentes de un procesador en una sola pieza. Para reducir el vano entre los rendimientos de los procesadores y de las memorias, para aprovecharse del procesamiento en paralelo, para amortizar los costos de manufactura y, sencillamente, para sacar partido pleno del fenomenal número de transistores que caben en una laminilla, pronostico que, en el año 2020, el microprocesador de gama alta constituirá por sí solo un ordenador completo.

Podríamos llamarlo IRAM ("memoria inteligente de acceso aleatorio"), pues la mayoría de los transistores de este microcircuito estarán dedicados a memoria. Mientras que los microprocesadores actuales han de recurrir a centenares de líneas de conexión con las memorias externas, los IRAM

necesitarán sólo las conexiones a una red informática y a una toma de corriente. Los dispositivos de entrada/salida estarán enlazados a ellos a través de redes. Si necesitan más memoria, obtendrán al mismo tiempo mayor capacidad de proceso, y viceversa; esta organización mantendrá equilibrada la capacidad de memoria y la velocidad del procesador. Los IRAM serían también módulos ideales para el proceso en paralelo. Puesto que serán tan pocas las conexiones externas que requieran, estos procesadores podrían ser además pequeñísimos. Es muy posible que veamos "picoprocesadores" baratos y menores que el antiguo 4004 de Intel. Si el proceso en paralelo tiene éxito, este mar de transistores podría utilizarse también para constituir múltiples procesadores sobre una sola laminilla, proporcionándonos un micromultiprocesador.

Los microprocesadores actuales son casi cien mil veces más veloces que sus troglodíticos antepasados de los años

cincuenta y cuestan mil veces menos; estos extraordinarios hechos explican el enorme papel que la informática desempeña ahora en nuestro mundo. Mirando hacia el futuro, es bastante posible que también en el próximo siglo el rendimiento de los microprocesadores siga duplicándose cada año y medio.

### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MICROPROCESSORS: FROM DESKTOPS TO SUPERCOMPUTERS. F. Baskett y J. L. Hennessy. *Science*, vol. 261, págs. 864-871; 1993.

COMPUTER ORGANIZATION AND DESIGN: THE HARDWARE/SOFTWARE INTERFACE. J. L. Hennessy y D. A. Patterson. Morgan Kaufmann Publishers, 1995.

COMPUTING PERSPECTIVES. M. V. Wilkes. Morgan Kaufmann Publishers, 1995. Siga la referencia en la World Wide Web <http://cra.org:80/research.impact/> y mire bajo el epígrafe "RISC" para saber más sobre el rápido aumento del rendimiento de los procesadores.