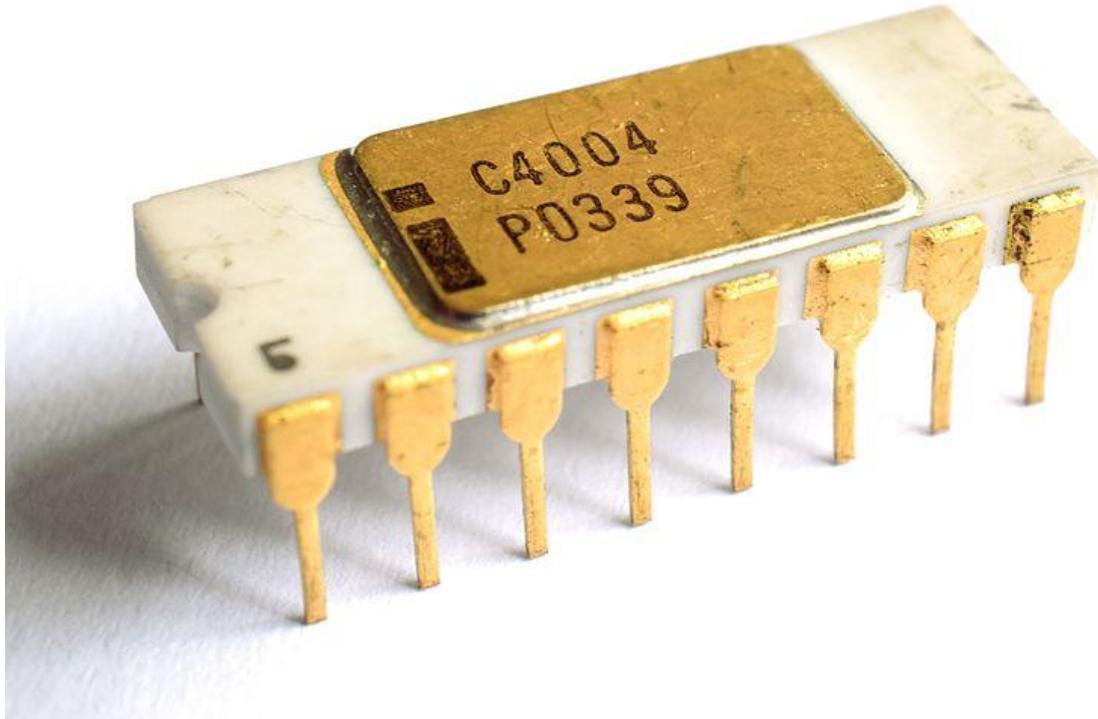


# Os 50 anos do primeiro processador

Rui Policarpo Duarte



*Figura 1 - Processador Intel 4004.*

A computação baseia-se na ativação de portas lógicas (1s e 0s) através de sinais elétricos. Na sua “infância” os sistemas começaram por ser puramente mecânicos (máquina de cálculo diferencial de Charles Babbage), eletromecânicos (Harvard Mark I usado no estudo dos efeitos de implosão da primeira bomba atômica) e posteriormente totalmente elétricos, mas baseados em válvulas (Colossos usado para decifrar as mensagens dos Nazis – ainda em funcionamento). Os maiores problemas destes computadores eram o espaço ocupado, o elevado consumo energético, o fraco desempenho, e a baixa durabilidade.

A invenção do transístor em 1947 nos Bell Labs permitiu substituir as válvulas por dispositivos semicondutores bastante compactos e de baixo consumo, e abriu a porta ao desenvolvimento do circuito integrado capaz de conter vários transístores numa pastilha de silício, em 1960 pela Fairchild. A Fairchild foi fundada em 1957 por um grupo de oito engenheiros, conhecidos como os “oito traidores”, que deixaram o Shockley Semiconductor Laboratory – que havia sido criado pelo líder do grupo nos Bells Labs, onde John Bardeen e Walter Brattain inventaram o transístor.

Em abril de 1965, Gordon Moore (diretor de investigação e desenvolvimento na Fairchild, e um dos 8 “traidores”) publica um artigo onde previa que o número de transístores num circuito integrado iria duplicar a cada ano. 10 anos mais tarde revê esta previsão em que o número de transístores duplica a cada dois anos.

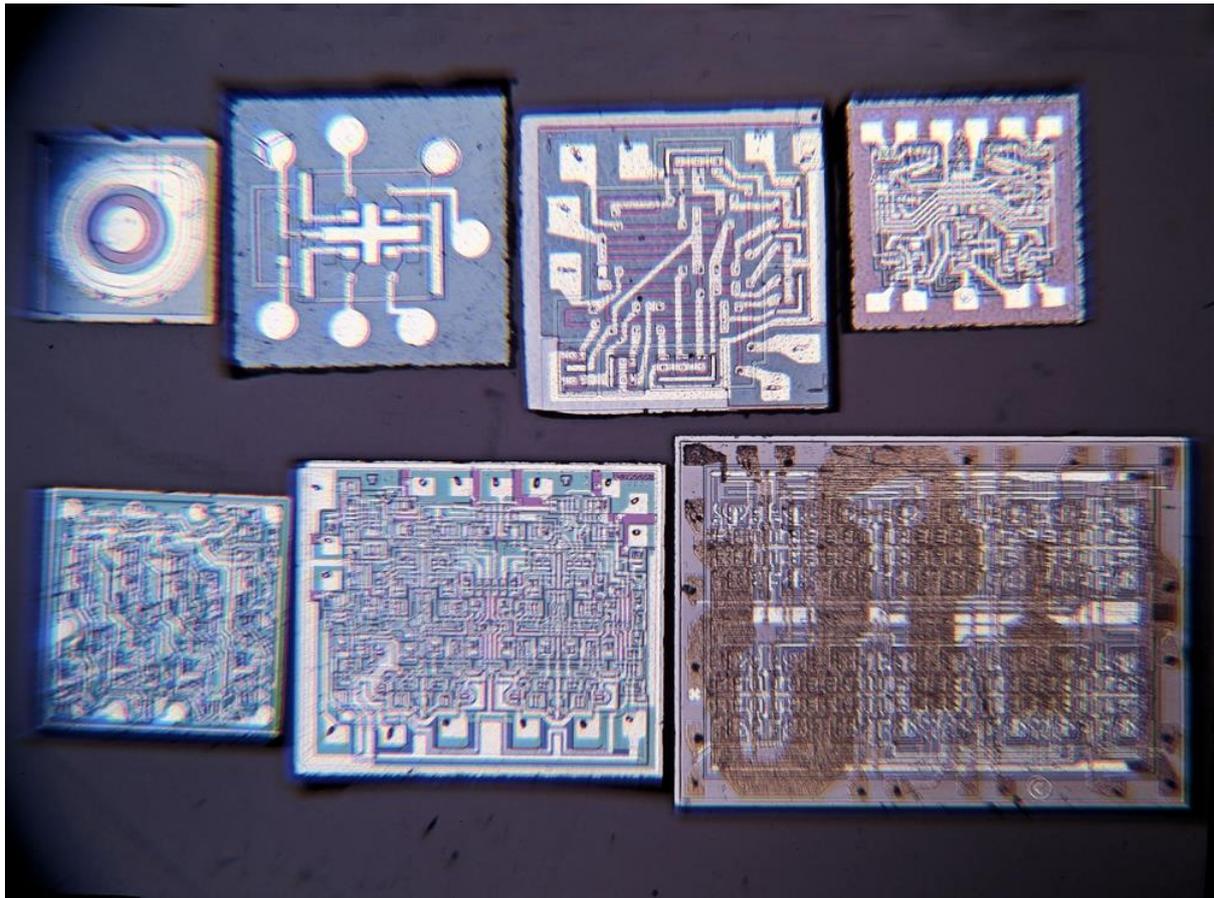


Figura 2 - Fotografias dos 5 dispositivos usados por Gordon Moore para estabelecer a taxa de crescimento do número de componentes por chip. Os 2 maiores foram usados para verificar se a tendência de crescimento se mantinha. Estes dispositivos semicondutores foram fabricados pela Fairchild: transistor 2N697 (1959),  $\mu$ Logic Type G c/ 7 transístores (1962),  $\mu$ Logic Type R c/ 33 transístores (1963), DTL 945 c/ 34 transístores (1964), contador decimal C $\mu$ L 958 c& 58 transístores (1964), 9300 registo de deslocamento de 4 bits c/ 125 transístores (1966), e Micromatrix 4500 conjunto de 32 portas lógicas programáveis c/ 264 transístores (1967). (Crédito: Computer History Museum)

Em 1968 Robert Noyce e Gordon Moore, engenheiros envolvidos no desenvolvimento da uma nova tecnologia de semicondutores MOS SGT (*Metal–Oxide–Semiconductor Silicon-Gate Technology*), abandonam a Fairchild e fundam a Intel, que fica dedicada ao fabrico de *chips* de memórias. Em 1969 a AMD (Advanced Micro Devices) é fundada por oito engenheiros que também abandonaram a Fairchild, e dedicam-se ao fabrico de *chips* lógicos para aplicações específicas, sendo o mais vendido o Am2505 um multiplicador de 4 bits.

**A 15 de novembro de 1971 a Intel lança o primeiro processador, o 4004.** Este processador de 4 bits foi o primeiro a ser fabricado num único *chip*, com cerca de 2300 transístores. O 4004 foi projetado para ser o cérebro de uma máquina de calcular digital da Busicom, a funcionar a 740kHz (740 milhares de ciclos de relógio por segundo – um CPU moderno chega aos 4 milhares de milhões de ciclos ou GHz), tem 46 instruções, suporta programas até 4KB (1KB = 1 milhar de palavras de 8 bits), e executa cerca de 92.600 instruções por segundo!

Em abril do ano seguinte a Intel lança o 8008, a 8 bits, com 3500 transístores, a funcionar a 800kHz, e com capacidade para 16KB de memória. O líder dos projetos do 4004 e do 8008, Federico Faggin, que

também tinha vindo da Fairchild, em 1974 abandona a Intel e funda a Zilog, a empresa que ficou famosa pelos processadores Z80 de 16 bits que nos anos 80 eram usados em computadores pessoais como o ZX Spectrum. A Zilog ainda existe atualmente, tendo ficado dedicada ao desenvolvimento de microcontroladores.

A Intel lança o segundo processador de 8 bits em 1974, o 8080. Este processador funciona a 2MHz (1MHz = 1 milhão de ciclos de relógio por segundo), e com capacidade para 64KB de memória. A AMD cria um clone à revelia da Intel, o Am9080. Pouco depois, as duas empresas chegaram a um acordo de licenciamento em que beneficiam dos desenvolvimentos de ambas. A Intel chega a receber contratos por ter a AMD como segundo fornecedor.

Em junho de 1978 a Intel lança o processador 8086, que viria a dar origem à arquitetura x86, a família de processadores mais vendida pela Intel. Um ano depois é lançado o 8088, uma variante do 8086, e que viria a equipar os primeiros computadores pessoais IBM-PC em 1981. A partir daqui, a arquitetura x86 vai evoluindo à custa dos desenvolvimentos na miniaturização cada vez maior dos circuitos integrados, lançando novos processadores (80186, 80286, 80386, 80486, Pentium,...), e cujo desenvolvimento acompanhava a lei de Moore.

No entanto, estes desenvolvimentos não acontecem sem competição. Em 1988 surge a Cyrix, uma start-up dedicada a *chips* de co-processadores matemáticos para processadores x86. Em 1992 a Cyrix começa a fabricar os seus próprios processadores compatíveis com arquitetura x86 da Intel. A Intel processa a Cyrix por infringir a sua propriedade intelectual, (como fazia a todos os que fizessem clones da sua arquitetura x86), mas a Cyrix ganha o caso por demonstrar independência no seu desenvolvimento. A Cyrix vai lançando os seus processadores compatíveis com os da Intel, mais baratos, e eventualmente chega a conseguir ultrapassar o desempenho dos processadores Pentium da Intel com o seu 6x86! A concorrência da Cyrix fez com que a Intel criasse a família de baixo custo Celeron. Infelizmente em 1997 a Cyrix é adquirida pela National Semiconductor e os problemas financeiros da National prejudicaram a Cyrix. Em 1998 é lançado o último processador Cyrix, o Jalapeño. A propriedade intelectual da Cyrix é reciclada, sob a forma da família de processadores Geode, sendo vendida à AMD em 2003.

A arquitetura x86 é conhecida como sendo CISC (*Complex Instruction Set Computer*) onde as suas instruções são micro-programadas. Isto significa que dentro do processador existe um controlador que gere a sequência de operações a realizar por cada instrução. Ao suportar mais instruções, o código do programa é simplificado, mas a complexidade do processador aumenta.

Por outro lado, os processadores RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) possuem poucas instruções, mas que são executadas de forma bastante eficiente e sem necessidade da micro-programação. Ao suportar menos instruções, o circuito no *chip* é mais simples e por consequência mais rápido. Os primeiros desenvolvimentos em processadores RISC começaram com a necessidade de realizar uma central telefónica pela IBM nos anos 70 em que se estimava ter de executar 10 milhões de instruções por segundo, ao passo que o melhor computador da IBM executava apenas 2 milhões. Uma equipa da IBM começou então o desenvolvimento do processador IBM 801 sem instruções micro-programadas e com uma pequena parte das instruções usadas habitualmente. O resultado final foi um processador que oferecia a execução de 15 milhões de instruções por segundo. No entanto, a IBM acabou por não produzir a central telefónica...

Em 1991 o PowerPC, um processador RISC inspirado no IBM 801, é lançado pela AIM (parceria Apple-IBM-Motorola). Apesar de terem tido expressão no mercado dos computadores pessoais, equipando os computadores da Apple entre 1994 e 2006 (PowerMachintosh, PowerBook, iMac, iBook), os

processadores PowerPC foram ainda usados noutros sistemas tais como consolas de jogos Xbox360 da Microsoft, GameCube da Nintendo e PlayStation 3 da Sony. Esta aliança durou até 2005. Em 2008 a IBM criou os servidores Power com esta arquitetura. Os robots usados nas missões da NASA a Marte em 2011 e 2020, *Curiosity* e *Perseverance*, usam dois processadores PowerPC RAD750 (o PowerPC 750 foi lançado em 2001) fabricados pela BAE Systems, com circuitos reforçados para suportar radiação do espaço. Estes processadores possuem uma arquitetura RISC de 32 bits e trabalham a 200MHz. O custo de cada sistema ronda os \$200.000.

## Desempenho dos Processadores

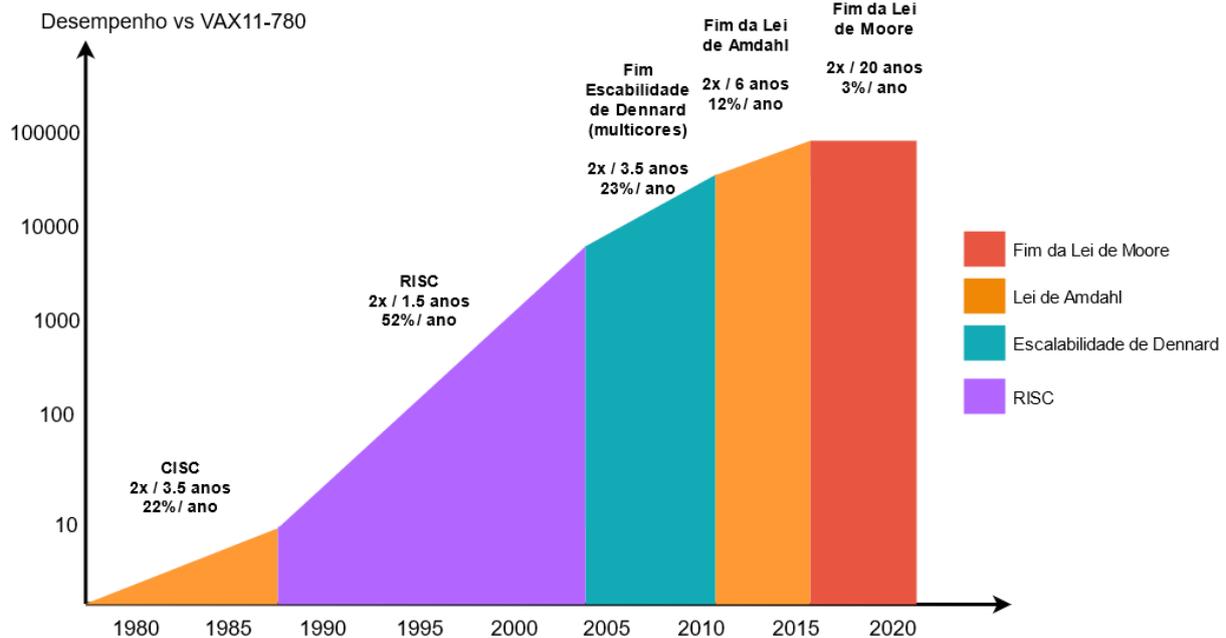


Figura 3 – Evolução do desempenho dos processadores ao longo dos últimos 50 anos. Crédito: John Hennessy and David Patterson, *Computer Architecture: A Quantitative Approach*, 6/e. 2018

A lei da escalabilidade de Dennard, que vinha sendo observada desde 1974, enuncia que o consumo energético é proporcional à área ocupada pelos transístores. Se a cada geração de tecnologia, um transístor for reduzido em 30%, ele irá ocupar metade da área, e ao reduzir o seu tamanho, aumenta a frequência de funcionamento em 40%. Baixando a sua tensão de funcionamento e a sua potência dissipada para 50% é possível ter o dobro dos transístores dissipando a mesma potência para um aumento de desempenho em 40%.

Na década de 2000 deixou de ser possível fabricar chips cada vez mais rápidos devido ao facto de não ser possível dissipar o calor gerado pelo chip. A solução passou por desligar partes do chip (*dark silicon*) e investir em arquiteturas com vários processadores (*multi-core*). Discute-se que a Lei de Moore chegou ao fim e que o tempo para duplicar o número de transístores passou para 20 anos.

Outra lei associada à computação é a Lei de Amdahl que define a taxa de aceleração obtida com vários processadores a executar um programa em paralelo. O problema é que o nível de paralelismo é limitado. A partir de um determinado momento por mais processadores que se tenham em paralelo o desempenho não aumenta.

O desempenho de um processador num telemóvel recente ultrapassa o desempenho de super-computadores de há 20 anos, e uma máquina de calcular TI-83 ultrapassa o computador de bordo da

missão Apolo 11. Mas mesmo com a desaceleração do aumento da capacidade de processamento, os processadores passaram a dominar algumas tarefas. Desde 2005 que nenhuma pessoa ganha um torneio de xadrez contra um computador. Os computadores atuais correm algoritmos de inteligência artificial com capacidade de competir com os melhores especialistas mundiais na detecção de manifestações de doenças.

Atualmente, o aumento de aplicações em inteligência artificial e cripto-moedas criaram um mercado para novos dispositivos lógicos altamente especializados (*Graphics Processing Unit - GPU* e *Field-Programmable Gate Arrays - FPGA*) com desempenhos bastante superiores aos tradicionais processadores genéricos.

Após os dois maiores fabricantes de FPGAs terem sido comprados pelos dois maiores fabricantes de processadores, a Altera foi comprada pela Intel em 2015 e a Xilinx pela AMD em 2020, espera-se uma nova geração de dispositivos heterogêneos que combinam as várias tecnologias no mesmo *chip*. Em 2018, a Intel anunciou o lançamento de um processador híbrido XEON-FPGA, contudo ainda não se encontra disponível no mercado.

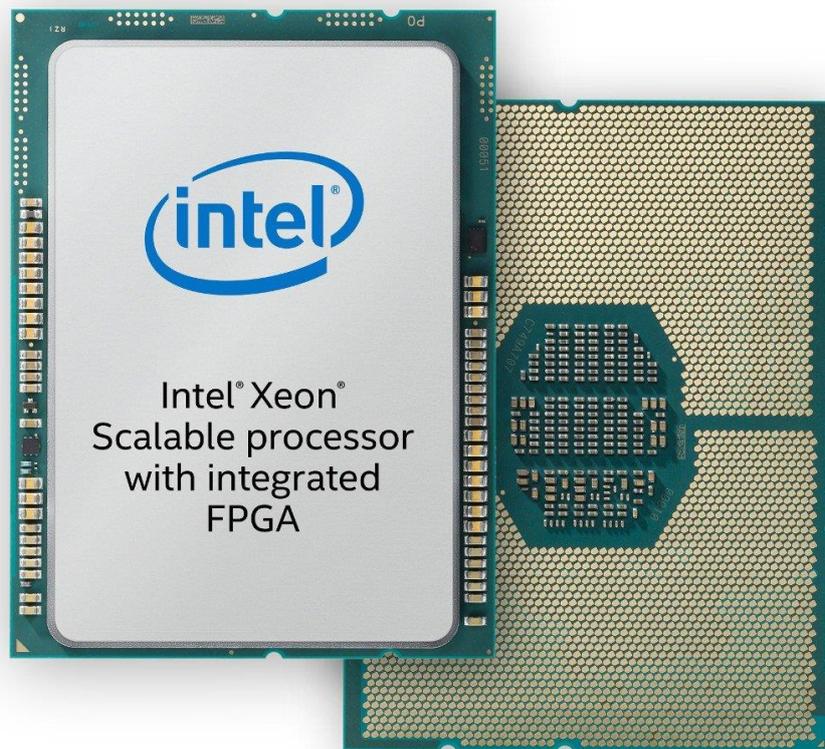


Figura 4 Futuro processador Xeon+FPGA.

Prevê-se que os próximos 50 anos de processadores venham a ser bastante interessantes, visto que as técnicas habituais usadas na evolução da tecnologia não vão durar muito tempo e novas ideias vão ser necessárias para inovar.

Como as estruturas dos transistores estão a tomar dimensões subatômicas, (o melhor que se consegue fabricar atualmente são 2nm = 0.000002mm) uma tendência de fabrico será usar novas

tecnologias, nomeadamente nano-materiais. A nível das arquiteturas espera-se investimento em arquiteturas abertas (*open-source*), bastante impulsionadas pela arquitetura RISC-V, em que cada fabricante de dispositivos tem a liberdade de criar dispositivos personalizados para as suas aplicações: imagem, vídeo, áudio, telecomunicações e inteligência artificial, mas que partilham um conjunto de instruções que são executadas de forma bastante eficiente.

Muitos dos processadores e computadores que fizeram parte da história da computação podem ser visitados no Museu Faraday no Instituto Superior Técnico em Lisboa, e os ZX Spectrum no Museu Load ZX Spectrum em Cantanhede. Para quem tem tido oportunidade de viajar para fora de Portugal, recomenda-se uma visita ao The National Computing Museum no Bletchley Park (Reino Unido) ou o Computer History Museum na Califórnia (Estados Unidos da América).