

4. Capacidade para suspender um programa e iniciar outro com um pequeno número de instruções (comutação de processos).
5. Instruções especiais para processar arquivos de áudio, imagem e multimídia.

Diversas outras características e facilidades também foram acrescentadas ao longo dos anos, em geral para acelerar alguma atividade particular.

● Eliminação da microprogramação

Os microprogramas engordaram durante os anos dourados da microprogramação (décadas de 1960 e 1970) e também tendiam a ficar cada vez mais lentos à medida que se tornavam mais volumosos. Por fim, alguns pesquisadores perceberam que, eliminando o microprograma, promovendo uma drástica redução no conjunto de instruções e fazendo com que as restantes fossem executadas diretamente (isto é, controle do caminho de dados por hardware), as máquinas podiam ficar mais rápidas. Em certo sentido, o projeto de computadores fechou um círculo completo, voltando ao modo como era antes que Wilkes inventasse a microprogramação.

Mas a roda continua girando. Processadores modernos ainda contam com a microprogramação para traduzir instruções complexas em microcódigo interno, que pode ser executado diretamente no hardware preparado para isso.

O objetivo dessa discussão é mostrar que a fronteira entre hardware e software é arbitrária e muda constantemente. O software de hoje pode ser o hardware de amanhã, e vice-versa. Além do mais, as fronteiras entre os diversos níveis também são fluidas. Do ponto de vista do programador, o modo como uma instrução é implementada não é importante, exceto, talvez, no que se refere à sua velocidade. Uma pessoa que esteja programando no nível ISA pode usar sua instrução de “multiplicar” como se fosse uma instrução de hardware sem ter de se preocupar com ela ou até mesmo sem saber se ela é, na verdade, uma instrução de hardware. O hardware de alguém é o software de outrem. Voltaremos a todos esses tópicos mais adiante neste livro.

1.2 Marcos da arquitetura de computadores

Durante a evolução do computador digital moderno, foram projetados e construídos centenas de diferentes tipos de computadores. Grande parte já foi esquecida há muito tempo, mas alguns causaram um impacto significativo sobre as ideias modernas. Nesta seção, vamos apresentar um breve esboço de alguns dos principais desenvolvimentos históricos, para entender melhor como chegamos onde estamos agora. Nem é preciso dizer que esta seção apenas passa por alto os pontos de maior interesse e deixa muita coisa de fora. A Figura 1.4 apresenta algumas máquinas que marcaram época e que serão discutidas nesta seção. Slater (1987) é uma boa referência de consulta para quem quiser material histórico adicional sobre as pessoas que inauguraram a era do computador. Biografias curtas e belas fotos em cores, de autoria de Louis Fabian Bachrach, de alguns dos principais fundadores da era do computador são apresentadas no livro de arte de Morgan (1997).

1.2.1 A geração zero – computadores mecânicos (1642–1945)

A primeira pessoa a construir uma máquina de calcular operacional foi o cientista francês Blaise Pascal (1623–1662), em cuja honra a linguagem Pascal foi batizada. Esse dispositivo, construído em 1642, quando Pascal tinha apenas 19 anos, foi projetado para ajudar seu pai, um coletor de impostos do governo francês. Era inteiramente mecânico, usava engrenagens e funcionava com uma manivela operada à mão.

Figura 1.4 Alguns marcos no desenvolvimento do computador digital moderno.

Ano	Nome	Construído por	Comentários
1834	Máquina analítica	Babbage	Primeira tentativa de construir um computador digital
1936	Z1	Zuse	Primeira máquina de calcular com relés
1943	COLOSSUS	Governo britânico	Primeiro computador eletrônico
1944	Mark I	Aiken	Primeiro computador norte-americano de uso geral
1946	ENIAC	Eckert/Mauchley	A história moderna dos computadores começa aqui
1949	EDSAC	Wilkes	Primeiro computador com programa armazenado
1951	Whirlwind I	MIT	Primeiro computador de tempo real
1952	IAS	von Neumann	A maioria das máquinas atuais usa esse projeto
1960	PDP-1	DEC	Primeiro minicomputador (50 vendidos)
1961	1401	IBM	Máquina para pequenos negócios, com enorme popularidade
1962	7094	IBM	Dominou computação científica no início da década de 1960
1963	B5000	Burroughs	Primeira máquina projetada para uma linguagem de alto nível
1964	360	IBM	Primeira linha de produto projetada como uma família
1964	6600	CDC	Primeiro supercomputador científico
1965	PDP-8	DEC	Primeiro minicomputador de mercado de massa (50 mil vendidos)
1970	PDP-11	DEC	Dominou os minicomputadores na década de 1970
1974	8080	Intel	Primeiro computador de uso geral de 8 bits em um chip
1974	CRAY-1	Cray	Primeiro supercomputador vetorial
1978	VAX	DEC	Primeiro superminicomputador de 32 bits
1981	IBM PC	IBM	Deu início à era moderna do computador pessoal
1981	Osborne-1	Osborne	Primeiro computador portátil
1983	Lisa	Apple	Primeiro computador pessoal com uma GUI
1985	386	Intel	Primeiro ancestral de 32 bits da linha Pentium
1985	MIPS	MIPS	Primeira máquina comercial RISC
1985	XC2064	Xilinx	Primeiro FPGA (Field-Programmable Gate Array)
1987	SPARC	Sun	Primeira estação de trabalho RISC baseada em SPARC
1989	GridPad	Grid Systems	Primeiro computador tablet comercial
1990	RS6000	IBM	Primeira máquina superescalar
1992	Alpha	DEC	Primeiro computador pessoal de 64 bits
1992	Simon	IBM	Primeiro smartphone
1993	Newton	Apple	Primeiro computador palmtop (PDA)
2001	POWER4	IBM	Primeiro multiprocessador com chip dual core

A máquina de Pascal podia efetuar apenas operações de adição e subtração, mas 30 anos mais tarde o grande matemático alemão, barão Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716), construiu uma outra máquina mecânica que também podia multiplicar e dividir. Na verdade, Leibniz construiu o equivalente a uma calculadora de bolso de quatro operações três séculos atrás.

Durante 150 anos nada de muito importante aconteceu, até que um professor de matemática da Universidade de Cambridge, **Charles Babbage (1792–1871), o inventor do velocímetro**, projetou e construiu sua primeira **máquina diferencial**. Esse dispositivo mecânico que, assim como o de Pascal, só podia somar e subtrair, foi projetado para calcular tabelas de números úteis para a navegação marítima. **Toda a construção da máquina foi projetada para executar um único algoritmo, o método de diferenças finitas que usava polinômios.** A característica mais interessante dessa máquina era seu método de saída: ela perfurava seus resultados sobre uma chapa de gravação de cobre com uma punção de aço, renunciando futuros meios de escrita única como cartões perfurados e CD-ROMs.

Embora o dispositivo funcionasse razoavelmente bem, Babbage logo se cansou dessa máquina que só podia executar um único algoritmo. Ele começou a gastar quantidades cada vez maiores de seu tempo e da fortuna da família (sem falar nas 17 mil libras do governo) no projeto e na construção de uma sucessora denominada **máquina analítica**. A máquina analítica tinha quatro componentes: a armazenagem (memória), o moinho (unidade de cálculo), a seção de entrada (leitora de cartões perfurados) e a seção de saída (saída perfurada e impressa). **A armazenagem consistia em 1.000 palavras de 50 algarismos decimais, cada uma usada para conter variáveis e resultados.** O moinho podia aceitar operandos da armazenagem e então os somava, subtraía, multiplicava ou dividia e, por fim, devolvia o resultado à armazenagem. Assim como a máquina diferencial, ela era inteiramente mecânica.

O grande avanço da máquina analítica era ser de uso geral. Lia instruções de cartões perfurados e as executava. Algumas instruções mandavam a máquina buscar dois números na armazenagem, trazê-los até o moinho, efetuar uma operação com eles (por exemplo, adição) e enviar o resultado de volta para a armazenagem. **Outras podiam testar um número e desviá-lo condicionalmente, dependendo se ele era positivo ou negativo.** Perfurando um programa diferente nos cartões de entrada, era possível fazer com que a máquina analítica realizasse cálculos diversos, o que não acontecia com a máquina diferencial.

Visto que a máquina analítica era programável em uma linguagem de montagem simples, ela precisava de software. Para produzi-lo, Babbage contratou uma jovem de nome Ada Augusta Lovelace, que era filha do famoso poeta britânico Lord Byron. **Assim, Ada Lovelace foi a primeira programadora de computadores do mundo.** A linguagem de programação Ada tem esse nome em sua homenagem.

Infelizmente, assim como muitos projetistas modernos, Babbage nunca conseguiu depurar o hardware por completo. O problema era que ele precisava de milhares e milhares de dentes e rodas e engrenagens produzidos com um grau de precisão que a tecnologia do século XIX não podia oferecer. Ainda assim, suas ideias estavam muito à frente de sua época e, até hoje, a maioria dos computadores modernos tem uma estrutura muito semelhante à da máquina analítica; portanto, é mais do que justo dizer que Babbage foi avô do computador digital moderno.

O próximo desenvolvimento importante ocorreu no final da década de 1930, quando um estudante de engenharia alemão chamado Konrad Zuse construiu uma série de máquinas calculadoras automáticas usando relés eletromagnéticos. Ele não conseguiu financiamento do governo após o início da guerra porque os burocratas governamentais esperavam ganhar a guerra tão rapidamente que a nova máquina só estaria pronta após o término do conflito. Zuse não conhecia o trabalho de Babbage, e suas máquinas foram destruídas pelo bombardeio aliado de Berlim em 1944, portanto, seu trabalho não teve influência alguma sobre as máquinas subsequentes. Mesmo assim, ele foi um dos pioneiros da área.

Um pouco mais tarde, nos Estados Unidos, duas pessoas também projetaram calculadoras, John Atanasoff no Iowa State College e George Stibbitz no Bell Labs. A máquina de Atanasoff era surpreendentemente avançada para sua época. Usava aritmética binária e a memória era composta de capacitores recarregados periodicamente para impedir fuga de carga, um processo que ele denominou “sacudir a memória”. Os chips modernos de memória dinâmica (DRAM) funcionam desse mesmo modo. Infelizmente, a máquina nunca se tornou operacional de fato. De certo modo, Atanasoff era como Babbage: um visionário que acabou derrotado pela tecnologia de hardware inadequada que existia em seu tempo.

O computador de Stibbitz, embora mais primitivo do que o de Atanasoff, funcionou de verdade. Stibbitz fez uma grande demonstração pública de sua máquina durante uma conferência no Dartmouth College em 1940. Uma dos presentes era John Mauchley, desconhecido professor de física da Universidade da Pensilvânia. Mais tarde, o mundo da computação ouviria mais a respeito do professor Mauchley.

Enquanto Zuse, Stibbitz e Atanasoff projetavam calculadoras automáticas, um jovem chamado **Howard Aiken** remoía tediosos cálculos numéricos à mão como parte de sua pesquisa de doutorado em Harvard. Depois de concluído o doutorado, Aiken reconheceu a importância de fazer cálculos à máquina. Foi à biblioteca, **descobriu o trabalho de Babbage e decidiu construir com relés o computador de uso geral que ele não tinha conseguido construir com rodas dentadas.**

A primeira máquina de Aiken, a Mark I, foi concluída em Harvard em 1944. Tinha 72 palavras de 23 algarismos decimais cada e um tempo de instrução de 6 s. A entrada e a saída usavam fita de papel perfurada. Quando Aiken concluiu o sucessor dessa máquina, a Mark II, os computadores de relés já eram obsoletos. A era eletrônica tinha começado.

1.2.2 A primeira geração – válvulas (1945–1955)

O estímulo para o computador eletrônico foi a Segunda Guerra Mundial. Durante a fase inicial do conflito, submarinos alemães causavam estragos em navios britânicos. As instruções de comando dos almirantes em Berlim eram enviadas aos submarinos por rádio, as quais os britânicos podiam interceptar – e interceptavam. O problema era que as mensagens eram codificadas usando um dispositivo denominado ENIGMA, cujo antecessor foi projetado pelo inventor amador e outrora presidente dos Estados Unidos, Thomas Jefferson.

Logo no início da guerra, a inteligência britânica conseguiu adquirir uma máquina ENIGMA da inteligência polonesa, que a tinha roubado dos alemães². Contudo, para decifrar uma mensagem codificada era preciso uma quantidade enorme de cálculos e, para a mensagem ser de alguma utilidade, era necessário que esse cálculo fosse concluído logo depois de ela ter sido interceptada. Para decodificar essas mensagens, o governo britânico montou um laboratório ultrassecreto que construiu um computador eletrônico denominado COLOSSUS. O famoso matemático britânico Alan Turing ajudou a projetar essa máquina. Esse computador funcionava desde 1943, mas, uma vez que o governo britânico guardou praticamente todos os aspectos do projeto como segredo militar durante 30 anos, a linha COLOSSUS foi um beco sem saída. Só vale a pena citá-lo por ter sido o primeiro computador digital eletrônico do mundo.

Além de destruir as máquinas de Zuse e estimular a construção do COLOSSUS, a guerra também afetou a computação nos Estados Unidos. O exército precisava de tabelas de alcance visando sua artilharia pesada, e as produzia contratando centenas de mulheres para fazer os cálculos necessários com calculadoras de mão (as mulheres eram consideradas mais precisas que os homens). Ainda assim, o processo era demorado e surgiam erros com frequência.

John Mauchley, que conhecia o trabalho de Atanasoff, bem como o de Stibbitz, sabia que o exército estava interessado em calculadoras mecânicas. Como muitos cientistas da computação que vieram depois dele, Mauchley montou uma proposta solicitando ao exército financiamento para a construção de um computador eletrônico. A proposta foi aceita em 1943, e Mauchley e seu aluno de pós-graduação, J. Presper Eckert, passaram a construir um computador eletrônico, ao qual deram o nome de ENIAC (**Electronic Numerical Integrator And Computer – integrador e computador numérico eletrônico**). O ENIAC consistia em 18 mil válvulas e 1.500 relés, pesava 30 toneladas e consumia 140 kw de energia. Em termos de arquitetura, a máquina tinha 20 registradores, cada um com capacidade para conter um número decimal de 10 algarismos. (Um registrador decimal é uma memória muito pequena que pode conter desde um número até outro número máximo de casas decimais, mais ou menos como o odômetro, que registra quanto um carro rodou em seu tempo de vida útil.) O ENIAC era programado com o ajuste de até 6 mil interruptores multiposição e com a conexão de uma imensa quantidade de soquetes com uma verdadeira floresta de cabos de interligação.

2 N. do RT: Antes da guerra, os alemães vendiam uma versão comercial da ENIGMA com três engrenagens, modelo igual ao que os poloneses passaram aos ingleses. A versão militar possuía quatro engrenagens. Em: Stephen Budiansky. *Battle of Wits – The complete story of codebreaking in World War II*. Penguin Books Ltd.: Londres, 2000.

A construção da máquina só foi concluída em 1946, tarde demais para ser de alguma utilidade em relação a seu propósito original. Todavia, como a guerra tinha acabado, Mauchley e Eckert receberam permissão para organizar um curso de verão para descrever seu trabalho para seus colegas cientistas. Aquele curso de verão foi o início de uma explosão de interesse na construção de grandes computadores digitais.

Após aquele curso de verão histórico, outros pesquisadores se dispuseram a construir computadores eletrônicos. O primeiro a entrar em operação foi o EDSAC (1949), construído na Universidade de Cambridge por Maurice Wilkes. Entre outros, figuravam JOHNNIAC, da Rand Corporation; o ILLIAC, da Universidade de Illinois; o MANIAC, do Los Alamos Laboratory; e o WEIZAC, do Weizmann Institute em Israel.

Eckert e Mauchley logo começaram a trabalhar em um sucessor, o EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer). Contudo, o projeto ficou fatalmente comprometido quando eles deixaram a Universidade da Pensilvânia para fundar uma empresa nova, a Eckert-Mauchley Computer Corporation, na Filadélfia. (O Vale do Silício ainda não tinha sido inventado.) Após uma série de fusões, a empresa se tornou a moderna Unisys Corporation.

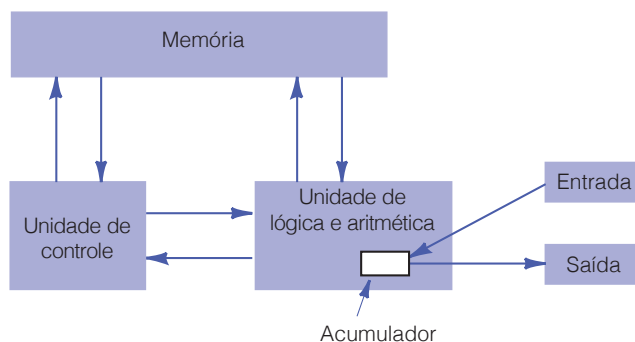
Como um aporte legal, Eckert e Mauchley solicitaram uma patente alegando que haviam inventado o computador digital. Em retrospecto, possuir essa patente não seria nada mau. Após anos de litígio, o tribunal decidiu que a patente de Eckert-Mauchley era inválida e que John Atanasoff tinha inventado o computador digital, embora nunca o tivesse patenteado, colocando efetivamente a invenção em domínio público.

Enquanto Eckert e Mauchley trabalhavam no EDVAC, uma das pessoas envolvidas no projeto ENIAC, John von Neumann, foi para o Institute of Advanced Studies de Princeton para construir sua própria versão do EDVAC, a **máquina IAS**. Von Neumann era um gênio, da mesma estirpe de Leonardo da Vinci. Falava muitos idiomas, era especialista em ciências físicas e matemática e guardava na memória tudo o que já tinha ouvido, visto ou lido. Conseguia citar sem consulta, palavra por palavra, o texto de livros que tinha lido anos antes. Na época em que se interessou por computadores, já era o mais eminente matemático do mundo.

Uma das coisas que logo ficou óbvia para ele foi que programar computadores com quantidades imensas de interruptores e cabos era uma tarefa lenta, tediosa e inflexível. Ele percebeu que o programa podia ser representado em forma digital na memória do computador, junto com os dados. Também viu que a desajeitada aritmética decimal serial usada pelo ENIAC, com cada dígito representado por 10 válvulas (1 acesa e 9 apagadas), podia ser substituída por aritmética binária paralela, algo que Atanasoff tinha percebido anos antes.

O projeto básico, o primeiro que ele descreveu, agora é conhecido como **máquina de von Neumann**. Ela foi usada no EDSAC, o primeiro computador de programa armazenado, e agora, mais de meio século depois, ainda é a base de quase todos os computadores digitais. Esse projeto – e a máquina IAS, construída em colaboração com Herman Goldstine – teve uma influência tão grande que vale a pena descrevê-lo rapidamente. Embora o nome de von Neumann esteja sempre ligado a esse projeto, Goldstine e outros também lhe deram grande contribuição. Um esboço da arquitetura é dado na Figura 1.5.

Figura 1.5 Máquina original de von Neumann.



A máquina de von Neumann tinha cinco partes básicas: a memória, a unidade de lógica e aritmética, a unidade de controle e o equipamento de entrada e saída. A memória consistia em 4.096 palavras, uma palavra contendo 40 bits, cada bit sendo 0 ou 1. Cada palavra continha ou duas instruções de 20 bits ou um inteiro de 40 bits com sinal. As instruções tinham 8 bits dedicados a identificar o tipo da instrução e 12 bits para especificar uma das 4.096 palavras de memória. Juntas, a unidade de lógica e aritmética e a unidade de controle formavam o “cérebro” do computador. Em computadores modernos, elas são combinadas em um único chip, denominado CPU (Central Processing Unit – unidade central de processamento).

Dentro da unidade de lógica e aritmética havia um registrador interno especial de 40 bits, denominado **acumulador**. Uma instrução típica adicionava uma palavra de memória ao acumulador ou armazenava o conteúdo deste na memória. A máquina não tinha aritmética de ponto flutuante porque von Neumann achava que qualquer matemático competente conseguiria acompanhar o ponto decimal (na verdade, o ponto binário) de cabeça.

Mais ou menos ao mesmo tempo em que von Neumann construía sua máquina IAS, pesquisadores do MIT também estavam construindo um computador. Diferente do IAS, do ENIAC e de outras máquinas desse tipo, cujas palavras tinham longos comprimentos e eram destinadas a cálculos numéricos pesados, a máquina do MIT, a Whirlwind I, tinha uma palavra de 16 bits e era projetada para controle em tempo real. Esse projeto levou à invenção da memória de núcleo magnético por Jay Forrester e, depois, por fim, ao primeiro minicomputador comercial.

Enquanto tudo isso estava acontecendo, a IBM era uma pequena empresa dedicada ao negócio de produzir perfuradoras de cartões e máquinas mecânicas de classificação de cartões. Embora tenha contribuído para o financiamento de Aiken, a IBM não estava muito interessada em computadores até que produziu o 701 em 1953, muito tempo após a empresa de Eckert e Mauchley ter alcançado o posto de número um no mercado comercial, com seu computador UNIVAC. O 701 tinha 2.048 palavras de 36 bits, com duas instruções por palavra. Foi o primeiro de uma série de máquinas científicas que vieram a dominar o setor dentro de uma década. Três anos mais tarde, apareceu o 704 que, de início, tinha 4.096 palavras de memória de núcleos, instruções de 36 bits e uma inovação: hardware de ponto flutuante. Em 1958, a IBM começou a produzir sua última máquina de válvulas, a 709, que era basicamente um 704 incrementado.

1.2.3 A segunda geração – transistores (1955–1965)

O transistor foi inventado no Bell Labs em 1948 por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley, pelo qual receberam o Prêmio Nobel de física de 1956. Em dez anos, o transistor revolucionou os computadores e, ao final da década de 1950, os computadores de válvulas estavam obsoletos. O primeiro computador transistorizado foi construído no Lincoln Laboratory do MIT, uma máquina de 16 bits na mesma linha do Whirlwind I. Recebeu o nome de TX-0 (Transistorized eXperimental computer 0 – computador transistorizado experimental 0), e a intenção era usá-la apenas como dispositivo para testar o muito mais elegante TX-2.

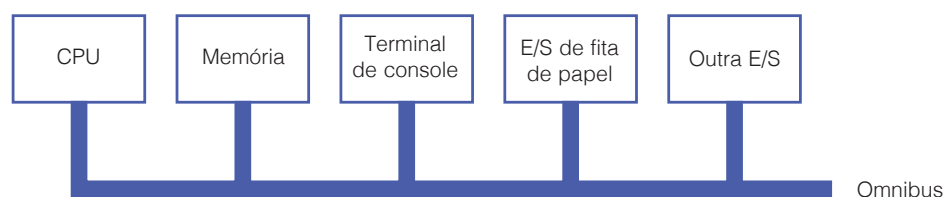
O TX-2 nunca foi um grande sucesso, mas um dos engenheiros que trabalhava no laboratório, Kenneth Olsen, fundou uma empresa, a Digital Equipment Corporation (DEC), em 1957, para fabricar uma máquina comercial muito parecida com o TX-0. Quatro anos se passaram antes que tal máquina, o PDP-1, aparecesse, principalmente porque os investidores de risco que fundaram a DEC estavam convictos de que não havia mercado para computadores. Afinal, T. J. Watson, antigo presidente da IBM, certa vez dissera que o mercado mundial de computadores correspondia a cerca de quatro ou cinco unidades. Em vez de computadores, a DEC vendia pequenas placas de circuitos.

Quando o PDP-1 finalmente apareceu em 1961, tinha 4.096 palavras de 18 bits e podia executar 200 mil instruções por segundo. Esse desempenho era a metade do desempenho do IBM 7090, o sucessor transistorizado do 709 e o computador mais rápido do mundo na época. O PDP-1 custava 120 mil dólares; o 7090 custava milhões. A DEC vendeu dezenas de PDP-1s, e nascia a indústria de minicomputadores.

Um dos primeiros PDP-1s foi dado ao MIT, onde logo atraiu a atenção de alguns novos gênios em aprimoramento tão comuns ali. Uma das muitas inovações do PDP-1 era um visor e a capacidade de plotar pontos em qualquer lugar de sua tela de 512 por 512. Em pouco tempo, os estudantes já tinham programado o PDP-1 para jogar Spacewar, e o mundo teria ganhado seu primeiro videogame.

Alguns anos mais tarde, a DEC lançou o PDP-8, que era uma máquina de 12 bits, porém muito mais barata que o PDP-1 (16 mil dólares). O PDP-8 tinha uma importante inovação: um barramento único, o omnibus, conforme mostra a Figura 1.6. Um **barramento** é um conjunto de fios paralelos usados para conectar os componentes de um computador. Essa arquitetura foi uma ruptura importante em relação à arquitetura da máquina IAS, centrada na memória, e, desde então, foi adotada por quase todos os computadores de pequeno porte. A DEC alcançou a marca de 50 mil PDP-8 vendidos, o que a consolidou como a líder no negócio de minicomputadores.

Figura 1.6 Barramento omnibus do PDP-8.



Enquanto isso, a reação da IBM ao transistor foi construir uma versão transistorizada do 709, o 7090, como já mencionamos, e, mais tarde, o 7094. Esse último tinha um tempo de ciclo de 2 microssegundos e 32.768 palavras de 36 bits de memória de núcleos. O 7090 e o 7094 marcaram o final das máquinas do tipo ENIAC, mas dominaram a computação científica durante anos na década de 1960.

Ao mesmo tempo em que se tornava uma grande força na computação científica com o 7094, a IBM estava ganhando muito dinheiro com a venda de uma pequena máquina dirigida para empresas, denominada 1401. Essa máquina podia ler e escrever fitas magnéticas, ler e perfurar cartões, além de imprimir saída de dados quase tão rapidamente quanto o 7094, e por uma fração do preço dele. Era terrível para a computação científica, mas perfeita para manter registros comerciais.

O 1401 era fora do comum porque não tinha nenhum registrador, nem mesmo um comprimento de palavra fixo. Sua memória tinha 4 mil bytes de 8 bits, embora modelos posteriores suportassem até incríveis 16 mil bytes. Cada byte continha um caractere de 6 bits, um bit administrativo e um bit para indicar o final da palavra. Uma instrução MOVE, por exemplo, tinha um endereço-fonte e um endereço-destino, e começava a transferir bytes da fonte ao destino até encontrar um bit de final com valor 1.

Em 1964, uma minúscula e desconhecida empresa, a Control Data Corporation (CDC), lançou a 6600, uma máquina que era cerca de uma ordem de grandeza mais rápida do que a poderosa 7094 e qualquer outra existente na época. Foi amor à primeira vista para os calculistas, e a CDC partiu a caminho do sucesso. O segredo de sua velocidade e a razão de ser tão mais rápida do que a 7094 era que, dentro da CPU, havia uma máquina com alto grau de paralelismo. Ela tinha diversas unidades funcionais para efetuar adições, outras para efetuar multiplicações e ainda mais uma para divisão, e todas elas podiam funcionar em paralelo. Embora extrair o melhor dessa máquina exigisse cuidadosa programação, com um pouco de trabalho era possível executar dez instruções ao mesmo tempo.

Como se não bastasse, a 6600 tinha uma série de pequenos computadores internos para ajudá-la, uma espécie de “Branca de Neve e as Sete Pessoas Verticalmente Prejudicadas”. Isso significava que a CPU podia gastar todo o seu tempo processando números, deixando todos os detalhes de gerenciamento de *jobs* e entrada/saída para os computadores menores. Em retrospecto, a 6600 estava décadas à frente de sua época. Muitas das ideias fundamentais encontradas em computadores modernos podem ser rastreadas diretamente até ela.

O projetista da 6600, Seymour Cray, foi uma figura legendaria, da mesma estatura de von Neumann. Ele dedicou sua vida inteira à construção de máquinas cada vez mais rápidas, denominadas então de **supercomputadores**, incluindo a 6600, 7600 e Cray-1. Também inventou o famoso algoritmo para comprar carros: vá à conces-

sionária mais próxima de sua casa, aponte para o carro mais próximo da porta e diga: “Vou levar aquele”. Esse algoritmo gasta o mínimo de tempo em coisas sem importância (como comprar carros) para deixar o máximo de tempo livre para fazer coisas importantes (como projetar supercomputadores).

Havia muitos outros computadores nessa época, mas um se destaca por uma razão bem diferente e que vale a pena mencionar: o Burroughs B5000. Os projetistas de máquinas como PDP-1, 7094 e 6600 estavam totalmente preocupados com o hardware, seja para que ficassem mais baratos (DEC) ou mais rápidos (IBM e CDC). O software era praticamente irrelevante. Os projetistas do B5000 adotaram uma linha de ação diferente. Construíram uma máquina com a intenção específica de programá-la em linguagem Algol 60, uma precursora da C e da Java, e incluíram muitas características no hardware para facilitar a tarefa do compilador. Nascia a ideia de que o software também era importante. Infelizmente, ela foi esquecida quase de imediato.

1.2.4 A terceira geração – circuitos integrados (1965–1980)

A invenção do circuito integrado de silício por Jack Kilby e Robert Noyce (trabalhando independentemente) em 1958 permitiu que dezenas de transistores fossem colocados em um único chip. Esse empacotamento possibilitava a construção de computadores menores, mais rápidos e mais baratos do que seus precursores transistorizados. Alguns dos computadores mais significativos dessa geração são descritos a seguir.

Em 1964, a IBM era a empresa líder na área de computadores e tinha um grande problema com suas duas máquinas de grande sucesso, a 7094 e a 1401: elas eram tão incompatíveis quanto duas máquinas podem ser. Uma era uma processadora de números de alta velocidade, que usava aritmética binária em registradores de 36 bits; a outra, um processador de entrada/saída avançado, que usava aritmética decimal serial sobre palavras de comprimento variável na memória. Muitos de seus clientes empresariais tinham ambas e não gostavam da ideia de ter dois departamentos de programação sem nada em comum.

Quando chegou a hora de substituir essas duas séries, a IBM deu um passo radical. Lançou uma única linha de produtos, a linha System/360, baseada em circuitos integrados e projetada para computação científica e também comercial. A linha System/360 continha muitas inovações, das quais a mais importante era ser uma família de uma meia dúzia de máquinas com a mesma linguagem de montagem e tamanho e capacidade crescentes. Uma empresa poderia substituir seu 1401 por um 360 Modelo 30 e seu 7094 por um 360 Modelo 75. O Modelo 75 era maior e mais rápido (e mais caro), mas o software escrito para um deles poderia, em princípio, ser executado em outro. Na prática, o programa escrito para um modelo pequeno seria executado em um modelo grande sem problemas. Porém, a recíproca não era verdadeira. Quando transferido para uma máquina menor, o programa escrito para um modelo maior poderia não caber na memória. Ainda assim, era uma importante melhoria em relação à situação do 7094 e do 1401. A ideia de famílias de máquinas foi adotada de pronto e, em poucos anos, a maioria dos fabricantes de computadores tinha uma família de máquinas comuns que abrangiam uma ampla faixa de preços e desempenhos. Algumas características da primeira família 360 são mostradas na Figura 1.7. Mais tarde, foram lançados outros modelos.

Figura 1.7 Oferta inicial da linha de produtos IBM 360.

Propriedade	Modelo 30	Modelo 40	Modelo 50	Modelo 65
Desempenho relativo	1	3,5	10	21
Tempo de ciclo (em bilionésimos de segundo)	1.000	625	500	250
Memória máxima (bytes)	65.536	262.144	262.144	524.288
Bytes lidos por ciclo	1	2	4	16
Número máximo de canais de dados	3	3	4	6

Outra importante inovação da linha 360 era a **multiprogramação**, com vários programas na memória ao mesmo tempo, de modo que, enquanto um esperava por entrada/saída para concluir sua tarefa, outro podia executar, o que resultava em uma utilização mais alta da CPU.

A 360 também foi a primeira máquina que podia emular (simular) outros computadores. Os modelos menores podiam emular a 1401, e os maiores podiam emular a 7094, de maneira que os clientes podiam continuar a executar seus antigos programas binários sem modificação durante a conversão para a 360. Alguns modelos executavam programas 1401 com uma rapidez tão maior que a própria 1401 que muitos clientes nunca converteram seus programas.

A emulação era fácil na 360 porque todos os modelos iniciais e grande parte dos que vieram depois eram microprogramados. Bastava que a IBM escrevesse três microprogramas: um para o conjunto nativo de instruções da 360, um para o conjunto de instruções da 1401 e outro para o conjunto de instruções da 7094. Essa flexibilidade foi uma das principais razões para a introdução da microprogramação na 360. É lógico que a motivação de Wilkes para reduzir a quantidade de válvulas não importava mais, pois a 360 não tinha válvula alguma.

A 360 resolveu o dilema “binária paralela” versus “decimal serial” com uma solução conciliatória: a máquina tinha 16 registradores de 32 bits para aritmética binária, mas sua memória era orientada para bytes, como a da 1401. Também tinha instruções seriais no estilo da 1401 para movimentar registros de tamanhos variáveis na memória.

Outra característica importante da 360 era (para a época) um imenso espaço de endereçamento de 2^{24} (16.777.216) bytes. Como naquele tempo a memória custava vários dólares por byte, esse tanto de memória parecia uma infinidade. Infelizmente, a série 360 foi seguida mais tarde pelas séries 370, 4300, 3080, 3090, 390 e a série z, todas usando basicamente a mesma arquitetura. Em meados da década de 1980, o limite de memória tornou-se um problema real e a IBM teve de abandonar a compatibilidade em parte, quando mudou para endereços de 32 bits necessários para endereçar a nova memória de 2^{32} bytes.

Com o benefício de uma percepção tardia, podemos argumentar que, uma vez que de qualquer modo tinham palavras e registros de 32 bits, provavelmente também deveriam ter endereços de 32 bits, mas na época ninguém podia imaginar uma máquina com 16 milhões de bytes de memória. Embora a transição para endereços de 32 bits tenha sido bem-sucedida para a IBM, essa mais uma vez foi apenas uma solução temporária para o problema do endereçamento de memória, pois os sistemas de computação logo exigiriam a capacidade de endereçar mais de 2^{32} (4.294.967.296) bytes de memória. Dentro de mais alguns anos, entrariam em cena os computadores com endereços de 64 bits.

O mundo dos minicomputadores também avançou um grande passo na direção da terceira geração quando a DEC lançou a série PDP-11, um sucessor de 16 bits do PDP-8. Sob muitos aspectos, a série PDP-11 era como um irmão menor da série 360, tal como o PDP-1 era um irmãozinho da 7094. Ambos, 360 e PDP-11, tinham registradores orientados para palavras e uma memória orientada para bytes, e ambos ocupavam uma faixa que abrangia uma considerável relação preço/desempenho. O PDP-11 teve enorme sucesso, em especial nas universidades, e deu continuidade à liderança da DEC sobre os outros fabricantes de minicomputadores.

1.2.5 A quarta geração – integração em escala muito grande (1980–?)

Na década de 1980, a VLSI (Very Large Scale Integration – **integração em escala muito grande**) tinha possibilitado colocar primeiro dezenas de milhares, depois centenas de milhares e, por fim, milhões de transistores em um único chip. Esse desenvolvimento logo levou a computadores menores e mais rápidos. Antes do PDP-1, os computadores eram tão grandes e caros que empresas e universidades tinham de ter departamentos especiais denominados **centrais de computação** para usá-los. Com a chegada do minicomputador, cada departamento podia comprar sua própria máquina. Em 1980, os preços caíram tanto que era viável um único indivíduo ter seu próprio computador. Tinha início a era do computador pessoal.

Computadores pessoais eram utilizados de modo muito diferente dos computadores grandes. Eram usados para processar textos, montar planilhas e para numerosas aplicações de alto grau de interação (como os jogos) que as máquinas maiores não manipulavam bem.

Os primeiros computadores pessoais costumavam ser vendidos como kits. Cada kit continha uma placa de circuito impresso, um punhado de chips, que em geral incluía um Intel 8080, alguns cabos, uma fonte de energia