

# DESENVOLVIMENTO DA COMPUTAÇÃO E DA ARQUITETURA COMPUTACIONAL ASSÍNCRONA

Leo Weber<sup>1</sup>

## Resumo

O propósito deste artigo é apresentar o desenvolvimento dos fundamentos de base que geraram os princípios das arquiteturas computacionais atuais, além de pequenas análises com as relações destes fundamentos e o modo como os computadores são organizados: sistemas computacionais síncronos e sistemas computacionais assíncronos. Por fim são abordadas discussões atuais sobre novos desafios científicos e tecnológicos da área.

**Palavras-chave:** Computação, Arquitetura de computadores, Lógica assíncrona.

## Abstract

The purpose of this article is to present basic concepts about the development of current computer's architecture principles, and small analyses with relations between these fundamentals and the organization of the computers: synchronous computer's systems and asynchronous computer's systems. In the end are approached discussions with new scientific and technologic challenges of the moment in the area.

**Keywords:** Computation, Computer's architecture, Asynchronous logic.

## 1 Introdução

Em menos de meio século, os computadores invadiram todas as atividades humanas, alterando de maneira significativa o trabalho e o comportamento das pessoas, entre outros. Ao computador associa-se sua ação fundamental, o ato de computar. Segundo a definição encontrada em dois dos principais dicionários da língua portuguesa, **computar** significa “(do latim *computare*) 1. Fazer o cômputo de; contar. 2. Calcular; orçar. 3. Igualar; ajustar; comparar. 4. Confrontar; comparar; cotejar. 5. Contar; incluir.” (FERREIRA, 1999) e “1. Fazer o cômputo de. 2. Calcular em; orçar em. 3. Efetuar confronto; comparar; igualar. 4. Incluir; inscrever; contar. 5. Cumprir todas as etapas de um algoritmo, alcançando o resultado almejado; executar tarefa usando um computador.” (HOUAISS, 2001).

A aplicação do termo computador aos atuais equipamentos é creditada a uma matéria publicada pelo jornal inglês *London Times* em 1944, acerca de equipamentos inteligentes que no futuro poderiam vir a substituir o esforço humano. O jornal chamou uma hipotética máquina pensante de *computer*. Curiosamente, os franceses, por exemplo, não utilizam o termo para definir estes equipamentos, preferindo *ordinateurs de gestion*, ou seja, ordenadores de gestão.

Ao longo do seu desenvolvimento histórico o homem sempre teve necessidade de contar e calcular, e, à medida que esses cálculos foram se tornando mais frequentes e trabalhosos, o ser humano passou a criar instrumentos para calcular. A história dos

---

<sup>1</sup> Doutorando em Informática na Universidade das Ilhas Baleares, Espanha, e Professor da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha e da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. E-mail: [leo@liberato.com.br](mailto:leo@liberato.com.br)

computadores começou no momento em que o homem sentiu a necessidade de realizar cálculos complexos com maior precisão e rapidez. A idéia de que a informação podia ser codificada, para em seguida ser processada independentemente do sentido das mensagens, foi se formando aos poucos: estava aberto o caminho para que o cálculo se tornasse progressivamente uma questão de máquinas e não mais de instrumentos (BRETON, 1987).

Este texto é fruto da intenção de trazer informações sobre um dos temas de maior interesse do século XXI: os computadores. Apesar de tantos e relevantes trabalhos já apresentados, entendemos ser oportuno abordar aspectos de sua evolução histórica e as nuances, muitas vezes pequenas, que geraram ao longo de centenas de anos o acúmulo que propiciou chegarmos no patamar tecnológico atual. Finalmente, no decorrer do mesmo, percebemos que deveríamos fazer prospecções sobre alternativas que se colocam a nossa frente, o, por assim dizer, estado da arte e a integração das características de várias áreas do conhecimento na concepção de sistemas computacionais.

## **2 Desenvolvimento da computação**

A transformação de uma determinada informação de entrada, em outra de saída, contempla o conceito de processamento. Nele reside a generalidade da estrutura de um sistema e também a diferença entre processamentos que consomem muita energia (processamento industrial, por exemplo) ou envolvem pequena quantidade de energia (processamento computacional, por exemplo). O cálculo é, por excelência, o processamento da informação (LEVY, 1987).

Cronologicamente, os artefatos utilizados para contar e calcular evoluíram até o mundo contemporâneo e até o computador, o qual é, fundamentalmente, um equipamento capaz de manipular informações, tendo sua operação baseada no cálculo (PESSOTTA, 1993). No entanto, é importante considerar que o avanço científico-tecnológico tem, de modo simplificado, duas etapas: na primeira surge uma idéia ou descoberta inovadora muito importante e a segunda compreende tempos durante os quais as idéias maturam e estabelecem-se.

Costuma-se considerar o ábaco como o primeiro dispositivo criado para facilitar o trabalho do homem em processar informações. Este instrumento é composto por barras e pequenas bolas, sendo usado pelos mercadores para contar e calcular, ou, em outras palavras, trata-se de um calculador decimal operado manualmente. Ele surgiu há milhares de anos no Oriente Médio e ainda hoje é muito utilizado. Por exemplo, no Japão é comum encontrar-se comerciantes que continuam preferindo fazer contas utilizando ábacos e, em certos casos, as fazem mais rapidamente do que com as pequenas calculadoras eletrônicas.

Em 1617 o teólogo e matemático escocês John Napier inventou as tabelas de multiplicação, criando regras e algoritmos para este fim. A régua de cálculo foi construída no final de 1620 por William Oughtred e outros, valendo-se de evoluções das tabelas de Napier. Devido à sua portabilidade, este artefato teve uma grande aplicação até algumas décadas atrás, quando se generalizou o uso das calculadoras de bolso.

Os primeiros computadores eram compostos exclusivamente por elementos mecânicos. Eles herdaram força dos automatismos, tradição ancorada nas técnicas e na busca da construção de seres artificiais. Os primeiros autômatos eram “engenhocas” mecânicas que reproduziam partes humanas ou seu todo, segundo Losano (1990), para, em seguida, derivar para aplicações no controle de processos e na regulação de sistemas realimentados. Estava aí posta a necessidade crescente da realização de cálculos,

inicialmente muito simples. À medida que os processos tornaram-se mais complexos, também a carência de executar operações nestes níveis aumentou. Blaise Pascal, filósofo francês, entre os anos de 1642 e 1652, desenvolveu mais de cinquenta versões de uma máquina de calcular totalmente mecânica chamada *Pascalene*. Ela era constituída por um disco para cada potência de 10, cada um destes dotado de 10 dígitos, com uma ligação inovadora que fazia com que o disco rodasse de uma posição enquanto um excedente era produzido por um disco em uma posição inferior. Uma janela era colocada sobre o disco para permitir que sua posição atual fosse observada, de modo semelhante a um odômetro de carro, com a diferença que os discos eram posicionados horizontalmente, como um disco de telefone rotativo. Embora fosse projetado para realizar apenas operações de adição e subtração, outras operações, como multiplicação e divisão, podiam ser realizadas através da combinação das primeiras. Por volta de 1673 surgiu a calculadora de Gottfried Wilhelm von Leibniz, matemático alemão, capaz de executar facilmente operações de adição, subtração, multiplicação e divisão. Este equipamento foi utilizado extensivamente até o advento das calculadoras eletrônicas.

Durante o século XVIII incorporou-se ao rol de conhecimentos da humanidade uma grande contribuição, que de início nada tinha a ver com números. Entre 1801 e 1804, Jacques Marie Jacquard, trabalhador de uma fábrica de sedas em Lyon, introduziu a idéia de programar máquinas e inventou um tear mecânico dotado de uma leitora de cartões perfurados, os quais controlavam automaticamente os desenhos e as cores dos tecidos; portanto um processador das informações relativas ao padrão do tecido. Para mudar o padrão produzido bastava trocar um conjunto de cartões por outro.

No século XIX, o matemático inglês Charles Babbage descreveu a máquina de diferenças, capaz de calcular tabelas de números úteis à navegação, sendo projetada para executar um algoritmo simples, o método das diferenças finitas utilizando polinômios. Embora tenha construído um primeiro protótipo, baseado na existência de discos mecânicos e acionada através de uma manivela, acrescentando modificações e aperfeiçoamentos entre 1823 e 1833, enquanto contava com financiamento do governo britânico, por fim viu-se obrigado a abandonar tal empreendimento sem concluí-lo totalmente. O aspecto mais interessante desta máquina era seu método de saída: ela perfurava os resultados numa placa de cobre, adaptando a concepção de Jacquard à computação e renunciando meios que posteriormente teriam grande uso. Em 1834 concebeu outra máquina mais ambiciosa, a qual também nunca chegou a ser construída completamente devido às tolerâncias mecânicas exigidas e à tecnologia existente na época, que denominou Máquina Analítica. Ela seria dotada de um dispositivo a que chamou de Moinho, uma máquina de somar com precisão de até 50 casas decimais, e um dispositivo de entrada, inspirados no tear de Jacquard, que leria cartões perfurados contendo não somente números, os dados, mas também instruções, o que fazer com os dados. Imaginou, ainda, um dispositivo de memória que chamou de Armazém para guardar os números, um banco com 1000 “registradores”, cada qual capaz de armazenar um número de 50 dígitos, os números dados pelos cartões de entrada ou então números resultantes de operações do Moinho. Finalmente, incluiu um dispositivo impressor para dar saída aos resultados. As instruções, gravadas em cartões, passíveis de serem implementadas pelo Moinho eram: 1. entrar com um número no Armazém; 2. entrar com um número no Moinho; 3. mover um número do Moinho para o Armazém; 4. mover um número do Armazém para o Moinho; 5. comandar o Moinho para executar uma operação; 6. sair com um resultado. Babbage contou com a colaboração inestimável da matemática Ada Augusta Lovelace, filha do poeta Lord Byron. Ada desenvolveu séries de instruções para o calculador analítico, criando conceitos tais como sub-rotinas, *loops* e saltos condicionais. Babbage é considerado o precursor do

computador (*hardware*). Ada é considerada a precursora da programação (*software*) e, em sua homenagem, foi assim referenciada a linguagem de computação de mesmo nome.

O estatístico norte-americano Herman Hollerith, no final do século XIX, também inspirou-se nos cartões de Jacquard para criar uma máquina para acumular e classificar informações: a Tabuladora de Censos. Os cartões perfurados continham 12 linhas por 20 colunas com informações sobre o censo demográfico dos Estados Unidos da América, diminuindo o tempo de processamento dos dados de 8 para 3 anos. A tecnologia de cartões perfurados foi adotada rapidamente por diversos países da Europa, difundindo a utilização das máquinas Hollerith a nível mundial e por longo tempo. Desta forma foi fundada a *Tabulating Machine Company*, a qual, após várias fusões e mudanças de nome, constituiu-se na IBM (*International Business Machines*).

Por volta do ano de 1930 constatam-se progressos significativos no sentido de inventar uma máquina que executasse operações complexas. Neste ano é construído o analisador diferencial por Vannevar Bush no M.I.T (*Massachusetts Institute of Technology*). Graças a esta máquina foi possível resolver-se complexas equações diferenciais. Apesar de sua importância, esse instrumento de cálculo apresentava alguns inconvenientes: seu tamanho, com grande número de eixos, engrenagens e fios, decorrência de executar cálculos baseados no sistema decimal; o fato de ser um dispositivo analógico que media velocidades e distâncias a partir das quais executava seus cálculos; a montagem de um determinado problema exigia que se calculasse um grande número de relações de engrenagens, trabalho que demandava de dois a três dias para ser executado.

Todos os instrumentos de calcular até então desenvolvidos trabalhavam com código decimal, o qual predominava já há muito tempo sobre outros sistemas, tais como o de base 60 surgido entre os povos babilônicos, ou o de base 12, do qual havia remanescentes entre os povos de língua inglesa. No entanto, praticamente todo computador desenvolvido a partir da década de 1950 teria seu processo de cálculo baseado no código binário.

Uma das primeiras pessoas a encarar de maneira científica o uso do código binário foi Gottfried Wilhelm Leibniz, que em 1666 escreve o trabalho “Da Arte Combinatória (Sobre a Arte das Combinações)” onde propõe um método para reduzir todo o pensamento a enunciados de perfeita exatidão. A lógica, a qual Leibniz denominava como as leis de pensar, seria transposta do domínio verbal repleto de ambigüidades para o domínio da matemática, onde se pode definir com precisão as relações entre os objetos ou enunciados. Dada a pouca receptividade entre seus contemporâneos, o próprio Leibniz abandonou a idéia da nova linguagem.

Muito tempo depois, o matemático inglês George Boole estudou e empregou idéias algébricas no domínio da lógica, daí advindo a terminologia Álgebra Booleana (LIPSCHUTZ, 1976; MENDELSON, 1977; YAGLOM, 1998). Em seu trabalho “*An Investigation of the Laws of the Thought*” ele investigou e concebeu uma forma de álgebra com três operações fundamentais *AND*, *OR*, *NOT*, com as quais podia manipular proposições quase da mesma maneira como se faz com os números. Para tanto, criou o conceito de portas lógicas, que processam dois tipos de entidades: verdade ou falso, sim ou não, aberto ou fechado, um ou zero.

O matemático norte-americano Charles Sanders Peirce, contemporâneo de Boole, introduziu a álgebra booleana nos Estados Unidos e, durante quase 20 anos, modificou-a e expandiu-a. Peirce compreendeu que a lógica de dois estados de Boole presta-se à descrição de circuitos elétricos de comutação, onde os mesmos estão ligados ou desligados, assim como uma proposição é verdadeira ou falsa. Desse modo, um

interruptor funciona como uma porta lógica ao permitir ou não que a corrente, ou a “verdade”, prossiga até o interruptor seguinte.

A introdução da álgebra booleana foi rapidamente integrada aos cursos universitários dos EUA de lógica e filosofia e, em função disso, Claude E. Shannon, bacharelado em engenharia elétrica e matemática tomou conhecimento desse assunto. Rapidamente estabeleceu uma ligação entre a teoria algébrica de Boole e a aplicação prática em circuitos elétricos com relés. Sua dissertação de mestrado “*A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*”, publicada em 1938, surtiu um rápido efeito sobre o planejamento dos sistemas telefônicos e na ciência dos computadores. Cerca de 10 anos após, Shannon publica outra obra relevante, “*Mathematical Theory of Communications*”, onde propôs um método para definir e medir a informação em termos matemáticos utilizando dígitos binários e que constituiu a base das modernas comunicações. Os estudos que realizou sobre os números binários levaram-no a definir o “*bit*” (*binary digit*), menor unidade de informação do código binário.

Em 1936, o matemático inglês Alan Turing apresentou o conceito de uma máquina lógica que permitia a definição de um número computável, posteriormente conhecida como máquina de Turing, que consistia numa memória que armazenava uma variável chamada estado interno e uma unidade leitora de fita. A fita, em princípio ilimitada, era dividida em células que podiam conter ou não símbolos de um código. Dependendo do estado interno e do símbolo na célula que estivesse na unidade leitora, a máquina podia tomar as seguintes ações: mover a fita de uma célula para frente ou para trás, escrever ou não algum símbolo se a célula estivesse vaga, apagar o símbolo ou alterar o seu estado interno. Esse modelo era um computador teórico, sendo reconhecido hoje como o protótipo teórico do computador digital eletrônico e, em princípio, a operação de qualquer computador digital executando um algoritmo pode ser reduzida a uma máquina de Turing (HODGES, 2001; KOVÁCS, 1997; STRATHERN, 2000).

O professor de física norte-americano John Atanasoff, em 1938, decidiu basear sua máquina para resolução de equações no sistema binário de numeração, justificando tal medida com sua simplicidade e relativa facilidade de representar dois símbolos em vez de dez. Durante os anos subsequentes, Atanasoff trabalhou na construção de um protótipo de computador que adotasse os seguintes princípios: 1. utilização de válvulas eletrônicas em vez de relés eletromecânicos; 2. substituição do sistema decimal pelo sistema binário; 3. utilização de capacitores para construir dispositivos de armazenamento de informação (memórias). A máquina, denominada ABC (*Atanasoff-Berry Computer*), era surpreendentemente avançada para a época.

O matemático norte-americano George Stibitz, em 1937, ao perceber que a lógica booleana era uma linguagem natural para os circuitos de relés eletromecânicos, valeu-se desta lógica de portas booleanas e de alguns relés de telefonia e construiu o primeiro somador eletromecânico dos EUA. Nos dois anos seguintes, Stibitz e o engenheiro Samuel Williams desenvolveram, na *Bell Telephone Laboratories*, a Calculadora de Números Complexos, que podia somar, subtrair, multiplicar e dividir números complexos.

Na Alemanha, entre os anos de 1936 e 1938, o engenheiro Konrad Zuse construiu em casa sua máquina para cálculos, na qual os problemas eram propostos via teclado, utilizando circuitos com relés e baseada em princípios booleanos. Essa máquina foi denominada de Z1. Para melhorar a eficiência da operação realizada via teclado, Zuse substituiu-o por um dispositivo capaz de interpretar as instruções contidas em filmes de 35mm usados, nos quais eram feitos orifícios, denominando esta máquina de Z2. Durante a segunda guerra mundial, no ano de 1941 e dois anos antes do MARK I entrar em operação nos EUA, Zuse completou a execução de um computador

eletromecânico completamente funcional, controlado por programa e baseado no sistema binário, versão que recebeu o nome de Z3. Assim como o seu sucessor, o Z4, estes equipamentos foram usados para resolver problemas de engenharia de aeronaves e de projeto de mísseis. Em 1942, Zuse e o engenheiro eletricista austríaco Helmut Schreyer propuseram ao governo alemão construir uma variação do Z3, mas implementado com válvulas eletrônicas. Embora com a justificativa de que seria muito mais veloz, a proposta foi recusada, em função das prioridades de curto prazo da Alemanha na guerra. Em 1949 Schreyer radicou-se no Brasil, prestando relevantes serviços como professor universitário e aos serviços de Correios e Telégrafos (PACITTI, 1998).

No final de 1941, logo após a entrada dos norte-americanos na segunda guerra mundial, Tomas J. Watson, presidente da IBM, propôs a construção de um computador baseado nos planos do matemático Howard Aiken. Este projeto, o MARK I, foi desenvolvido na *Harvard University* e ficou pronto em 1943, feito à base de relés eletromecânicos e comandado por fitas perfuradas, mas operando com números decimais codificados. Foi intensamente usado pela marinha americana a partir de 1944 e permaneceu operacional por mais 16 anos.

Nos primeiros anos da guerra, para cifrar suas mensagens, a engenharia alemã havia criado uma máquina chamada de *Enigma*. Os serviços de contra-espionagem dos países aliados conseguiram interceptar as mensagens dos alemães, mas eram incapazes de decifrá-las. Quando o conseguiam, isto não adiantava para as mensagens seguintes, pois *Enigma* gravava novos códigos a cada mensagem. Descobrir como esses códigos eram programados passou a ser uma prioridade absoluta. Na Inglaterra, uma equipe composta de engenheiros e professores de literatura, na qual figurava o matemático Alan Turing, ocupou-se de construir uma máquina para quebrar os códigos de comunicações alemães, utilizando, inicialmente, relés eletromecânicos. No final de 1943 surgiu o *Colossus*, com cerca de 2000 válvulas eletrônicas. As mensagens cifradas eram introduzidas através de uma leitora fotoelétrica que explorava uma fita de papel perfurada. Tudo isso foi mantido em segredo militar até o pós-guerra e as dez unidades construídas do *Colossus* foram desmontadas em 1946, para evitar que caíssem em mãos inimigas; somente mais tarde a obra de Turing foi tornada pública.

Em agosto de 1942, em Filadélfia, nos EUA, também como resultado da necessidade de cálculos balísticos, surgiu a proposta do físico John W. Mauchly e do engenheiro J. Prosper Eckert de construir um computador de alta velocidade com válvulas eletrônicas. Em abril de 1943 o exército americano passa a financiar a idéia, mas somente no final de 1945, após o término da guerra, ficou pronto o assim conhecido ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Calculator*). Embora operasse com números na forma decimal, era um dispositivo muito próximo em função e espírito à máquina universal teórica de Turing. A entrada de dados era baseada na tecnologia de cartões perfurados e os programas eram modificados através de reconfigurações, instalando fios dentro do conjunto de circuitos. A memória interna da máquina comportava apenas os números envolvidos na computação que estava sendo executada. Apesar das dúvidas com relação à sua confiabilidade, o ENIAC permaneceu operacional por mais de 10 anos. O ENIAC foi o primeiro equipamento a operar plenamente utilizando os três princípios básicos propostos por Atanasoff, acarretando um longo caso de disputa judicial deste com a dupla de desenvolvedores Mauchly-Eckert, acusados de pirataria científica. O processo arrastou-se por 28 anos, quando finalmente, em 1973, uma corte americana decidiu que o ENIAC havia derivado das idéias de Atanasoff (CASTRILLÓN, 1990).

Antes do ENIAC ser mostrado ao público, a dupla Mauchly-Eckert já trabalhava no seu sucessor, o EDVAC (*Electronic Discret Variable Automatic Computer*), que continha uma expansão da memória interna na qual eram armazenadas tanto programas quanto dados. Essa nova versão já codificava as informações em forma binária, o que reduzia substancialmente o número de válvulas empregadas. No final de 1944, junta-se à dupla o matemático austro-húngaro John von Neumann, que viria exercer uma profunda influência no desenvolvimento dos computadores pós-guerra. Em junho de 1945, von Neumann escreveu um artigo lançando as bases para um computador com programa armazenado, o EDVAC, onde descrevia a máquina e a lógica sobre a qual se apoiava sua operação. Uma proposta sua, inspirada na tecnologia de entrada de dados utilizada na época, expandiu para os programas o que já se fazia com os dados. Este conceito revolucionou a programação de computadores, tornando-os mais flexíveis e versáteis e é geralmente atribuído a von Neumann, mas, sabe-se hoje, foi simultaneamente concebida por Turing (HODGES, 2001; STRATHERN, 2000). Esse relatório veio a público, tornando-se o primeiro documento sobre computadores digitais eletrônicos que teve ampla circulação. No entanto, muito embora com extraordinárias inovações, a maneira como foi feita sua divulgação causou desavenças internas, em função da omissão dos nomes de Eckert e Mauchly, culminando na dissolução da equipe. Muitos dos pioneiros do desenvolvimento dos computadores acreditam que a adoção do termo máquina de von Neumann promove este, que escreveu as idéias, de forma exagerada e dá muito pouco crédito à dupla Mauchly-Eckert, que construiu as máquinas (PATTERSON e HENNESSY, 1998).

O próximo computador a ficar conhecido foi o MARK I, construído na Inglaterra. O projeto foi coordenado pelos cientistas F.C. Williams, Tom Kilburn e Max Neuman, da *Royal Society Computing Machine Laboratory, Manchester University*. Foi a primeira máquina capaz de executar um conjunto de operações aritméticas sob o controle de uma seqüência codificada de instruções. Executou seu primeiro programa em junho de 1948.

No ano de 1949, o cientista inglês Maurice Wilkes, baseando-se nas idéias da dupla Mauchly e Eckert, divulgadas por eles mesmos em uma série de conferências realizadas em 1946, termina a construção do EDSAC (*Electronic Delay Storage Automatic Calculator*), primeiro computador de programa armazenado do mundo, dois anos antes do próprio EDVAC estar concluído.

Logo após a saída do projeto EDVAC, em 1946, John von Neumann, Herman Goldstine e Arthur Burks, trabalhando no *Institute for Advanced Study (IAS), Princeton*, publicaram um artigo cujas idéias eram muito avançadas para a época. A maioria dos conceitos ali apresentados ainda prevalece nos dias de hoje. Este artigo levou ao desenvolvimento de uma máquina no IAS, que, como foi discutido com outros grupos de pesquisa e obteve ampla divulgação na comunidade científica da época, inspirou o desenvolvimento de muitos outros computadores a partir de então. A máquina de von Neumann possuía cinco partes básicas: memória, unidade lógico-aritmética, unidade de controle de programa e dispositivos de entrada e saída. Embora concluído somente em 1952, o IAS constituiu-se no protótipo de quase todos os computadores de propósito geral subsequentes (STALLINGS, 2000). Mais tarde, o duto de comunicação entre a memória e a unidade central de processamento (lógico-aritmética e de controle de programa) foi denominada de gargalo de von Neumann por Backus (1978).

Desde os primeiros projetos implementados, inicialmente com a utilização de relés e válvulas eletrônicas, os computadores conheceram aperfeiçoamentos incessantes no que diz respeito a seus componentes eletrônicos (*hardware*), chegando até aos modernos circuitos integrados. No entanto, os princípios de base e a forma como os

elementos de um computador estão organizados, sua arquitetura, continuam os mesmos (BRETON, 1987). Mesmo com o advento dos microprocessadores, eles continuam sendo compostos por dispositivos de entrada, de saída, unidade de memória, unidade aritmética e unidade de controle, com processamento serial, sincronismo dos eventos a partir de um oscilador (relógio), controle centralizado e comunicação baseada em endereçamentos (CARPINELLI, 2001; MURDOCCA e HEURING, 2000; PATTERSON e HENNESSY, 1998; STALLINGS, 2000; TANENBAUM 1999; WEBER, R. 2000).

O primeiro computador brasileiro nasceu da ousadia de quatro jovens estudantes do ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica), São José dos Campos, São Paulo: José Ellis Ripper, Fernando Vieira de Souza, Alfred Volkmer e Andras Vásárhelyi. Em 1961, com o apoio do chefe da Divisão de Eletrônica do ITA, professor tcheco Richard Wallauschek, eles decidiram projetar e construir um computador como trabalho final de graduação em Engenharia Eletrônica (O NÚMERO..., 2003, p.10). O equipamento, apelidado de *Zezinho*, tinha capacidade para realizar 20 operações matemáticas, utilizava 1500 transistores e operava em ciclo fechado, repetindo sempre o mesmo programa. Em 1963, Valdemar Setzer, como seu trabalho de formatura para curso de graduação, deu andamento ao projeto. O *Zezinho* foi exibido, em 1964, no Congresso da Sociedade de Computadores e Máquinas de Escritório, entidade que antecedeu a atual SUCESU (Associação de Usuários de Informática e Telecomunicações).

Também fruto de um trabalho de fim de curso, já o primeiro computador bem documentado e com estrutura clássica, foi desenvolvido na Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), São Paulo. O projeto *Patinho Feio* transcorreu entre 1971 e 1972, coordenado pelo professor norte-americano Glenn Langdon, especialista em protótipos, e executado por um grupo de cerca de 20 profissionais, entre engenheiros eletrônicos, estagiários e físicos, entre eles o engenheiro Edson Fregni. O equipamento, ainda hoje exposto na USP, possui 450 pastilhas de circuitos integrados, formando 3 mil blocos lógicos distribuídos em 45 placas de circuitos impressos, com a memória podendo armazenar 4096 palavras de 8 bits (A MÁQUINA..., 2003, p.11).

### **3 Desenvolvimento da Arquitetura Computacional Assíncrona**

Um sistema computacional assíncrono, ou sem relógio, é baseado na operação por eventos, fazendo com que diferentes *bits* de um *chip* sejam processados com velocidades diversas, enviando-se e recebendo-se dados conforme a necessidade. Historicamente, os circuitos assíncronos foram conhecidos e usados antes dos circuitos síncronos serem desenvolvidos. Os primeiros circuitos digitais implementados foram construídos com relés eletromecânicos, que se adequavam mais a operações assíncronas. Por esta razão, os métodos de configurações tradicionais de circuitos assíncronos consistiam em conectá-los com um ou vários elos de realimentação (MANO, 2002).

Um dos principais motivos para a não difusão natural dos circuitos assíncronos, ao longo do processo de evolução tecnológica, é a maior dificuldade de projeto das redes lógicas assíncronas em relação às síncronas, porque as primeiras envolvem problemas mais drásticos de tempo (ROTH, 1995). O adequado projeto síncrono elimina problemas de tempo, porque todo o dispositivo aguarda um tempo suficientemente longo, depois das mudanças externas na entrada, para que todos os *flip-flops* alcancem um estado estável antes de aplicar o pulso de *clock*. No entanto, para redes lógicas assíncronas, são necessárias técnicas especiais de projeto, a fim de eliminar problemas resultantes de tempos, advindos dos atrasos desiguais através dos

vários caminhos da rede.

A utilização de métodos assíncronos de projeto data antes de 1950, particularmente devido a duas pessoas: Huffman e Muller. Huffman desenvolveu uma metodologia de projeto, conhecida atualmente como *fundamental mode circuits* (HUFFMAN, 1954a; 1954b). O modo de operação *fundamental mode* assume que os sinais nas entradas irão mudar somente quando o circuito está em uma condição estável, isto é, somente quando não houver mudanças nos sinais internos da rede. Muller desenvolveu a teoria *speed-independent circuits* (MULLER e BARTKY, 1959). Adequada a canais digitais de comunicação, neste caso não há quaisquer restrições em relação às entradas, saídas e às mudanças de estado dos sinais, exceto que devem estar de acordo com o protocolo envolvido. Uma terceira e interessante metodologia chama-se *pulse mode* (HILL e PETERSON, 1981; ROTH, 1995; TINDER, 2000). Nela, as entradas são pulsos em vez de níveis, tornando a operação similar à de circuitos síncronos, exceto que a mudança dos estados é comandada pelos pulsos de entrada em vez do *clock*. O projeto desta última apresenta severas restrições ligadas aos sinais de entrada.

Uma outra abordagem é expressa por Phister (1958), que entende que o modelo geral para sistemas digitais é conceitualmente muito difícil de manusear. Não existiam, principalmente nos primórdios do desenvolvimento computacional, ferramentas matemáticas apropriadas à síntese de estruturas lógicas, excetuando-se a álgebra booleana. Tal situação é hoje facilitada pela possibilidade de uso de alternativas confiáveis de minimização e projeto de *hardware* para circuitos assíncronos, como, por exemplo, a Rede de Petri (CARDOSO e VALLETE, 1997; YAKOVLEV, GOMES e LAVAGNO, 2000) e a Transformada Numérica (DEL PICCHIA, 1993; MARTINS, 1985; PESSOTTA, 1993; WEBER, FIGUEREDO e KLEIN, 1998; WEBER, L. 2002). A Rede de Petri é uma ferramenta gráfica e matemática que se adapta bem a um grande número de aplicações em que as noções de eventos e de evoluções simultâneas são importantes. A Transformada Numérica é uma ferramenta usada para descrever funções e expressões da álgebra booleana e do cálculo proposicional, transformando uma expressão algébrica em uma expressão numérica e operando-se neste campo numérico.

Nas décadas de 1950 e 1960 foram projetados circuitos assíncronos associados aos computadores ILLIAC e ILLIAC II, *University of Illinois*, Estados Unidos, e Atlas e MU-5, *University of Manchester*, Inglaterra. O ILLIAC, finalizado em 1952, e o ILLIAC II, finalizado em 1962, foram projetados com técnicas *speed-independent*. O ILLIAC II usava três controles operacionais concorrentes: um controle aritmético, um controle entre operações para transferência de dados e um controle supervisor chamado Controle Avançado. Este último trazia e armazenava operandos, indexava e construía endereços, decodificava parcialmente ordens de outros operandos, entre outras funções. Os três controles, fortemente assíncronos e de características *speed-independent*, foram assim projetados para aumentar a confiabilidade e facilitar a manutenção. Eles coletavam respostas dos sinais para verificar se todas as operações em execução no passo corrente estavam completadas antes de ir para o passo seguinte. A unidade aritmética não utilizava técnicas *speed-independent* e, em função disso, acreditava-se que tinha acrescentado complexidade e custo, além de ser mais lenta. Os dispositivos eletromecânicos periféricos também não usavam técnicas *speed-independent*, pois eram inerentemente assíncronos.

Durante as décadas de 1960 e 1970, *Washington University, St. Louis*, Estados Unidos, foram desenvolvidos macromódulos assíncronos, que são blocos operacionais, como registradores, somadores, memórias, dispositivos de controle, a partir dos quais é possível implementar estruturas computacionais operacionais de maior complexidade.

Para facilitar a interconexão entre estes macromódulos, foram tomadas precauções no projeto, que permitiram fabricar dispositivos de maior porte, notadamente em relação a problemas de compatibilidade elétrica. Os sistemas computacionais eram montados em *racks* com conexões por fios, que continham os sinais com os dados e distribuía sinais de controle indicando a chegada de informações válidas. Os fios também determinavam a seqüência de operações, pois os macromódulos normalmente eram feitos para realizar diretamente descrições de um algoritmo em forma de diagramas de fluxo. Outra importante aplicação da técnica de lógica assíncrona neste período foi o projeto do primeiro sistema gráfico comercial pelos pesquisadores Evans e Sutherland. Este último, no momento, está engajado em um dos mais expressivos grupos de pesquisadores sobre lógica assíncrona, o da *Sun Microsystems*, Califórnia, Estados Unidos (COMPUTING..., 2001; OLD..., 2001).

Várias companhias japonesas desenvolveram os assim chamados processadores de dados na década de 1980. Viu-se que era mais eficiente o fluxo de dados controlar a velocidade de operação do que os programas contadores controlando o tempo de execução das operações. Em outras palavras, a operação era iniciada quando todos os dados necessários chegavam.

Em 1989, pesquisadores da *Caltech* apresentaram o primeiro microprocessador totalmente assíncrono. Apesar da simplicidade da arquitetura projetada e dos resultados modestos, ele foi significativo por introduzir interessantes concepções de operação, utilizar idéias de processamento tipo *pipeline* e pelo reduzido grupo de trabalho envolvido.

*The Amulet Group, University of Manchester*, Inglaterra, completou o processador assíncrono AMULET I em 1994, o primeiro a ser compatível em código com outro já existente, o microprocessador ARM. Os projetos seguintes, AMULET II e III, mostraram significativas características de performance, como grande velocidade de processamento, reduzido consumo e baixa emissão de rádio-freqüência.

*Philips Research Laboratories*, Holanda, já apresentaram inúmeros projetos bem sucedidos de estruturas assíncronas. Em 1994, o grupo desenvolveu um procedimento totalmente automatizado de especificação de *hardware* assíncrono com a linguagem TANGRAM. Em 1997, os circuitos de operação em *stand-by* de *paggers* basearam-se em sistemas assíncronos e, em 1998, foi feito um microcontrolador totalmente assíncrono compatível com o 80C51, um dos mais utilizados em aplicações industriais.

Mais recentemente foi desenvolvido o projeto RAPPID (*Revolving Asynchronous Pentium Instruction Decoder*), *Intel Semiconductors*, Califórnia, Estados Unidos, conduzido entre 1995 e 1999, que emula totalmente o conjunto de instruções de um Pentium II 32 bit MMX. Do mesmo modo, *Sun Microsystems*, Califórnia, Estados Unidos, apresentaram seu primeiro protótipo de um microprocessador assíncrono em 2001 (COMPUTING..., 2001; OLD..., 2001).

No Brasil, a construção das primeiras máquinas não von Neumann, denominadas como da geração “n-m-p” (n entradas, m saídas, p realimentações) (CUESTA GARCIA, PADILLA e DOMINGUEZ, 1994; TINDER, 2002; MARTINS, 1985), ocorreu em 1982 como conseqüência da verificação experimental de idéias contidas na tese de MARTINS (1965), que permitiram o emprego dos dispositivos *EPR0M's* (memórias programáveis eletricamente e unicamente de leitura) diretamente no projeto de máquinas seqüenciais atendendo ao modelo geral de sistemas simultâneos de funções booleanas, segundo Phister (1958), para qualquer sistema digital. Esta proposta de trabalho resultou em uma linha independente de pesquisa básica, que produziu na Escola Politécnica da USP teses de doutorado, de livre docência, além de inúmeros

trabalhos e artigos em outras instituições, como, por exemplo, os mencionados em Martins (1985) e Fink (1997).

Este trabalho também gerou a formalização de alguns resultados relacionados aplicáveis ao *hardware* (simplificação e implementação de circuitos lógicos) e ao *software* (aplicação na dedução em lógica e desenvolvimento de sistemas computacionais com características de sistemas especialistas) de Del Picchia (1971; 1993) e grande colaboração dos engenheiros Brunazo (1987; 1988) e Pessota (1993).

#### **4 Considerações finais: novas fronteiras**

Prever o futuro de sistemas computacionais, embora possível, trata-se de algo muito difícil dadas as diferentes alternativas e possibilidades. A capacidade de processamento computacional desde 1950 até os dias de hoje foi acrescida de um fator de dez bilhões, ditado pela lei de Moore, que estabelece uma multiplicação por dois a cada 18 meses (HAWKING, 2001; KAKU, 1998). Pode-se, no entanto, apresentar algumas discussões atuais e os principais intérpretes.

Os computadores processam informação, através da codificação de dígitos binários e pela operação com circuitos lógicos, que se traduzem em fenômenos elétricos e programas que transportam os objetos lógicos do sistema. A teoria quântica participou do desenvolvimento dos sistemas computacionais possibilitando, entre tantas coisas, o surgimento do transistor. Possivelmente ela também ditará a migração para o que hoje definimos como computador quântico. Diferentemente dos circuitos eletrônicos que manipulam estados representados por tensões elétricas, têm-se portas lógicas reguladas pela mecânica quântica, com estados que permitem a existência da superposição entre si (LUNGARZO, 2003). A unidade básica de informação computacional, o bit, transforma-se no *qubit*, o bit quântico. Também neste rumo, pode-se pensar em programas que rodem em um computador quântico. Muitas das ferramentas e métodos de programação utilizados por computadores convencionais podem ser reproduzidas parcial ou completamente, como, por exemplo, os operadores relacionais.

A distinção entre ciência e tecnologia é cada vez mais tênue, gerando um processo acentuado de expansão do conhecimento e a superação da dicotomia ciências naturais/ciências sociais (SOUSA SANTOS, 2001). Tais afirmações encaixam-se perfeitamente para expressar a linha divisória de muitas discussões sobre o cérebro, a memória e a consciência. Há diversas correntes, com interpretações e divergências profundas, indo da fisiologia à filosofia. O que há de mais afirmativo é que a compreensão da mente talvez seja uma das últimas fronteiras do conhecimento humano.

Dois dos grandes artífices da computação contemporânea, Turing e von Neumann, apresentaram análises sobre o cérebro, tentando relacioná-lo com estruturas computacionais. Estes modelos constituíram a base de muitos dos atuais dispositivos computacionais, assim denominados inteligentes. A idéia da máquina de Turing, formalizada posteriormente por von Neumann, definiu-a como um autômato não-finito, com o que os autômatos finitos, como os computadores, constituem um caso particular do conceito geral. Os modelos matemáticos desenvolvidos com computadores são todos discretos, já que implementam autômatos finitos, e deverão envolver, necessariamente, funções computáveis. Embora desdobramentos destes conceitos levem a suposição de que os modelos computacionais podem representar integralmente os processos mentais, já em seu clássico livro von Neumann (2000) caracterizou profundas diferenças entre a linguagem do cérebro e a linguagem matemática, apresentando suas aparentes simplicidade e similaridade lógica, mas com inumeráveis formas de transmissão da

informação e riqueza de detalhes, que podem tornar irrelevantes, ou inferiores para o sistema nervoso, a linguagem comumente utilizada pela matemática e pela lógica.

O matemático inglês Roger Penrose, *Oxford University*, Inglaterra, constituiu-se em um dos grandes pensadores contemporâneos sobre as questões da mente humana. Em várias publicações, incluindo Penrose (1998), apresenta objeções em relação a capacidade dos modelos computacionais. Segundo ele, de um modo mais geral, o entendimento matemático não é algo computacional, mas sim algo que depende de nossa capacidade de ter ciência das coisas; a não-computabilidade seria uma característica de toda consciência. Afirma também que a verdadeira teoria quântica da gravidade pode ser não-computável. Apresenta a questão do livre-arbítrio e dos elementos de acaso, ressaltando a diferença de determinismo e computabilidade, exemplificando com palavras que envolvem elementos não-computáveis, como juízo, senso comum, intuição, sensibilidade estética, compaixão, moralidade, etc.

Uma das diferenças básicas que existem entre computadores e seres humanos tem a ver com a aplicação do que é memorizado. Esta diferença consiste em que enquanto um computador armazena informação que somente pode ser chamada de maneira explícita por um programa, o homem aprende, ou seja, a aquisição de nova informação modifica seu comportamento, possibilitando a geração de novos critérios para a tomada de decisões (CASTRILLÓN, 1990). Os conteúdos emocionais das memórias afetam a maneira como são armazenadas e a facilidade com que são lembradas, bem como o humor e a motivação influenciam o quê e quanto é lembrado, uma espécie de dependência de estado (DALMAZ e NETTO, 2004). Para o pesquisador Ivan Izquierdo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, cada lembrança tem um sentido, uma lembrança puxa a outra, como num processo ativo de reconstrução, ou seja, a memória é a aquisição, conservação e evocação de informações (IZQUIERDO, 2004).

Robert Ornstein, há vinte anos estudioso das funções dos hemisférios cerebrais, aborda em Ornstein (1998) a bilateralidade cerebral e a evolução da especialização dos lados direito e esquerdo do cérebro. O hemisfério esquerdo, com processamento seqüencial, seria mais apto para a análise e subjacente à razão e à lógica (texto) e com maior sensibilidade a sinais de alta frequência. Já o hemisfério direito veria tudo ao mesmo tempo, com processamento paralelo, maior sensibilidade a sinais de baixa frequência e aptidão a percepção espacial e às noções de julgamento, ou de contexto. Em outras palavras, existe uma boa parte do cérebro dedicada a saber como os elementos das situações da vida se encaixam, onde nos encontramos no espaço e no tempo e onde os eventos se encaixam (hemisfério direito), enquanto outra parte focaliza os pequenos elementos da visão, as nuances auditivas e os movimentos precisos (hemisfério esquerdo).

Uma das mais instigantes obras da atualidade foi escrita há mais de 15 anos e revista recentemente em versão disponível na Internet (HAMEROFF, 1987). Seu autor, Stuart Hameroff, *University of Arizona*, Estados Unidos, adota a premissa que os citoesqueletos constituem o controle biológico do sistema nervoso, realizando interessantes afirmações sobre a possível mescla entre a mente e a máquina, denominando-a como *Ultimate Computing*. Uma das principais questões debatidas é a da nanotecnologia e a da crescente possibilidade de fusão entre biologia e tecnologia, a partir de métodos mais eficientes de processamento da informação e implementação em escalas nanométricas ( $10^{-9}$  m). Outros aspectos fundamentais de sua obra, que chamaram atenção de Roger Penrose, são suas profundas observações sobre o cérebro humano. Cada célula nervosa tem capacidade de processar informação sofisticada nela mesmo, constituindo o que ele chama de inteligência coletiva, fenômeno de intrincadas

redes de neurônios conectados entre si e com intensa operação paralela. Outro ponto é a definição do cérebro como um sistema contínuo, que pode prover saídas simultaneamente com a execução de tarefas de processamento e, também, enquanto novas entradas fazem-se presentes. O cérebro, assim, pode ser descrito com maior proximidade como um sistema computacional assíncrono e paralelo. Finalmente, os efeitos coletivos manifestam reverberação difusa, sustentando oscilações, transições de fase e caos determinístico.

### **Bibliografia consultada**

BUNCH, Bryan; HELLEMANS, Alexander. **The Timetables of Technology: A Chronology of the Most Important People and Events in the History of Technology**. New York: Touchstone, 1993.

DEL PICCHIA, Walter. **Autômatos e Máquinas Seqüenciais**. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Eletricidade, 1972.

O NÚMERO 1 dos computadores. **Computação Brasil, Sociedade Brasileira de Computação**, São Paulo, ano IV, ed. 99, p.10, Mar 2003.

ROSENCHER, Emmanuel. **A Pulga e o Computador**. Tradução de Jorge Pinheiro. Lisboa: Instituto Piaget, 1995.

TENÓRIO, Robinson Moreira. **Computadores de Papel**. 2ª ed. São Paulo: Cortez, 2001.

WEBER, Leo. et al. Uma Arquitetura Computacional Alternativa. **Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 336, p.37-42, Jan. 2001.

WEBER, Leo. Porque um circuito computacional pode trabalhar sem relógio ? **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.2, n.2, p.39-43, Nov. 2001.

### **Referências bibliográficas**

A MÁQUINA que entrou para a história. **Computação Brasil, Sociedade Brasileira de Computação**, São Paulo, ano IV, ed. 99, p.11, Mar 2003.

BACKUS, John. Can programming be liberted from the von-Neumann style? A functional style and its algebra of programs. **Communications of the ACM**, v.21, n.8, p.613-641, Aug. 1978.

BRETON, Philippe. **Histoire de L'informatique**. Paris: La Découverte, 1987.

BRUNAZO FILHO, Amilcar; DEL PICCHIA, Walter. **Generalização do Problema de Substituição de Sistemas Simultâneos de Funções Booleanas**. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Eletricidade, 1987.

BRUNAZO FILHO, Amilcar; DEL PICCHIA, Walter. **Resolução de Problemas de Decisão Qualitativa no Cálculo Proposicional Utilizando Equações Booleanas**. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Eletricidade, 1988.

- CARDOSO, Janete; VALLETE, Robert. **Redes de Petri**. Florianópolis: UFSC, 1997.
- CARPINELLI, John D. **Computer Systems – Organization & Architecture**. New York: Addison Wesley Longman, 2001.
- CASTRILLÓN, Laura Viana. **Memória Natural y Artificial**. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1990.
- COMPUTING Pioneer Challenges the Clock. **The New York Times**, New York, March 5<sup>th</sup>, 2001. Technology.
- CUESTA GARCIA, Luis Miguel; PADILLA, Antonio J. Gil; DOMINGUEZ, Fernando Remiro. **Electrónica Digital**. Lisboa: Mc Graw Hill, 1994.
- DALMAZ, Carla; NETTO, Carlos Alexandre. A Memória. **Ciência e Cultura**, São Paulo, ano 56, n. 1, p.30-31, Jan/Fev/Mar. 2004.
- DEL PICCHIA, Walter. **A Transformada Numérica e sua Aplicação à Simplificação de Funções e à Resolução de Equações Booleanas**. São Paulo: USP, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Eletricidade, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1971.
- DEL PICCHIA, Walter. **Métodos Numéricos para a Resolução de Problemas Lógicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1993.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Aurélio – Século XXI: O Dicionário da Língua Portuguesa**. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
- FINK, Daniel. **A Solution of the General Model for a Digital System**. Novo Hamburgo: Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, 1997.
- HAMEROFF, Stuart. R. **Ultimate Computing – Biomolecular Consciousness and Nanotechnology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1987.
- HAWKING, Stephen. **The universe in a nutshell**. New York: Bantam Books, 2001.
- HILL, Fredrick J.; PETERSON, Gerald R. **Introduction to Switching Theory & Logical Design**. 3<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- HOUAISS, Antônio. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.
- HODGES, Andrew. **Turing**. Tradução de Marcos Barbosa de Oliveira. São Paulo: Unesp, 2001.
- HUFFMAN, D. A. The Synthesis of Sequential Switching Circuits – part I. **Journal of the Franklin Institute**, v.257, n.3, p.161-190, Mar. 1954a.

HUFFMAN, D. A. The Synthesis of Sequential Switching Circuits – part II. **Journal of the Franklin Institute**, v.257, n.4, p.275-303, Apr. 1954b.

IZQUIERDO, Iván. **Questões Sobre Memória**. São Leopoldo: Unisinos, 2004.

KAKU, Michio. **Visions – How Science Will Revolutionize the 21<sup>st</sup> Century**. New York: Bantam Books, 1998.

KOVÁCS, Zsolt. L. **O Cérebro e a sua Mente**. São Paulo: Edição Acadêmica, 1997.

LÉVY, Pierre. **La machine univers**. Paris: La Découverte, 1987.

LIPSCHUTZ, Seymour. **Teoria dos Conjuntos**. Tradução de Fernando Vilain Heusi da Silva. São Paulo: Mc Graw Hill, 1976.

LOSANO, Mario. G. **Storie di automi**. Torino: Giulio Einaudi, 1990.

LUNGARZO, Carlos A. A Programação Quântica: Aproveitando os Códigos Clássicos. **Ciência e Cultura**, São Paulo, ano 55, n. 3, p.4-5, Jul/Ago/Set. 2003.

MANO, M. Morris. **Digital Design**. 3<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

MARTINS, Wagner Waneck. **Contribuição ao estudo dos circuitos lógicos interruptores**. São Paulo: Tese de Livre Docência, EPUSP, Departamento de Engenharia de Eletricidade, 1965.

MARTINS, Wagner Waneck. **Esção (n-m-p): Um Computador Não-Von Neumann**. São Paulo: Cartgraf, 1985.

MENDELSON, Elliott. **Álgebra Booleana e Circuitos de Chaveamento**. Tradução de Celso Mauro Paciornick. São Paulo: Mc Graw Hill, 1977.

MULLER, D. E.; BARTKY, W. S. A Theory of Asynchronous Circuits. In **Procedures International Symposium on the Theory of Switching**, p.204-243, Cambridge, Apr. 1959, Harvard University Press.

MURDOCCA, Miles J.; HEURING, Vincent P. **Principles of Computer Architecture**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

OLD tricks for new chips. **The Economist**, London, April 19<sup>th</sup>, 2001. Science and Technology.

ORNSTEIN, Robert. **A Mente Certa**. Tradução de Ana Beatriz Rodrigues e Priscilla Martins Celeste. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

PACITTI, Tércio. **Do Fortran à Internet**. São Paulo: Makron, 1998.

PATTERSON, David A.; HENNESSY, John L. **Computer Organization and Design – The hardware/software interface**. 2<sup>nd</sup> ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1998.

PENROSE, Roger. **O Grande, o Pequeno e a Mente Humana**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Unesp/Cambridge University, 1998.

PESSOTTA, Roberto Clarete. **C.L.P. “Não-Von” a Tempo Real, Matematicamente Programável**. São Paulo: USP, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

PHISTER Jr., Montgomery. **Logical Design of Digital Computers**. New York: John Wiley, 1958.

ROTH Jr., Charles H. **Fundamentals of Logic Design**. 4<sup>th</sup> ed. Boston: PWS Publishing Company, 1995.

SOUSA SANTOS, Boaventura de. **Um Discuso sobre as Ciências**. 12<sup>a</sup>. ed. Porto: Afrontamento, 2001.

STALLINGS, William. **Computer Organization and Architecture**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

STRATHERN, Paul. **Turing e o Computador**. Tradução de Maria Luiza Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2000.

TANENBAUM, Andrew S. **Organização Estruturada de Computadores**. 3<sup>a</sup> ed. Tradução de Hélio Marques Sobrinho e Luiz Fernando Costa. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

TINDER, Richard F. **Engineering Digital Design**. 2<sup>th</sup> ed. San Diego: Academic Press, 2002.

VON NEUMANN, John. **The Computer and the Brain**. 2<sup>nd</sup>. ed. with a foreword by Churchland, P. M. and Churchland, P. S. New Haven: Yale University, 2000.

WEBER, Leo; FIGUEREDO, Melissa G.; KLEIN, Pedro A. T. A transformada numérica. **Logos**, Canoas, v. 11, p.45-49, Dez. 1998.

WEBER, Leo. Aplicação da transformada numérica na resolução de problemas da álgebra booleana. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.3, n.3, p.83-91, Nov. 2002.

WEBER, Leo. Conversor Analógico-para-Digital Implementado por uma Arquitetura Computacional Assíncrona. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.4, n.4, p.12-22, Nov. 2003.

WEBER, Raul Fernando. **Fundamentos de Arquitetura de Computadores**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto/UFRGS, 2000.

YAGLOM, I. M. **Álgebra Booleana**. Tradução de Robinson Moreira Tenório. São Paulo: Atual; Moscou: MIR, 1998.

YAKOVLEV, Alex; GOMES, Luís; LAVAGNO, Luciano. **Hardware Design and Petri Nets**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2000.