

Arquitetura de Computadores I

António de Brito Ferrari
ferrari@ua.pt

ABF - AC I

1

1. Organização da disciplina

ABF - AC I

2

Objetivos da disciplina

- Compreender a organização dos computadores digitais
- Adquirir familiariedade com a arquitetura de microprocessadores através da programação em *assembly*
- Compreender a estrutura interna dos processadores
- Conhecer as formas de representação da informação nos computadores digitais, com relevo para a representação da informação numérica (inteiros e vírgula flutuante) e as operações aritméticas básicas.

ABF - AC I

3

Programa (ver Guião no Moodle)

1. Introdução: sistemas de computação de uso geral. Microprocessadores.
2. A arquitetura MIPS
3. O *assembler* e o processo de “assemblagem”
4. Aritmética computacional
5. Organização interna do processador: unidades operativas e unidade de controlo
6. Pipelining - introdução

ABF - AC I

4

Bibliografia

- Livro de texto:
Computer Organization and Design – the Hardware / Software Interface
David Patterson, John Hennessy
Morgan Kaufmann
4th edition, Capítulos 1, 2, 3 e 4 e Apêndice D
2nd e 3rd editions, Capítulos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e Apêndice C
- Existem na biblioteca vários exemplares da 3^a e da 2^a edições

ABF - AC I

5

Volume de trabalho necessário

Área científica: Arquitetura de Sistemas Computacionais

Cursos: Mestrado Integrado em Engenharia de Computadores e Telemática,
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica e de Telecomunicações

Escolaridade semanal: 3 horas de aulas teórico-práticas; 2 horas de aulas práticas

Código: 40334

Créditos ECTS: 8 **216 horas de trabalho do aluno** (8 * 27h)

Horas de aulas $\approx 15 * 5 = 75$ h

Preparação para exame ≈ 20 h

Horas de trabalho extra-aulas ≈ 120 h correspondentes a

8h de trabalho semanal para além das aulas

ABF - AC I

6

Avaliação (ver Guião no Moodle)

Nota final = $0.6 \times$ Nota Teórica + $0.4 \times$ Nota Prática

Nota Teórica = Nota obtida no exame escrito realizado na época de exames

Nota Prática = $0.4 \times$ Mini-Testes + $0.1 \times$ (Log-book e desempenho nas aulas) + $0.5 \times$ Exame prático final

A aprovação à disciplina implica uma avaliação global superior ou igual a **9.5 valores** sendo que **em nenhuma** das componentes (teórica e prática) a nota correspondente pode ser inferior a **8 valores**.

Quem tenha obtido avaliação positiva na componente prática no ano letivo de 2012/2013 conserva a respectiva nota a menos que, por escrito, manifeste a intenção de se submeter novamente a avaliação na componente laboratorial.

Quem teve avaliação positiva na componente prática em 2012/2013 e se tenha inscrito numa das turmas práticas, perde automaticamente a nota prática obtida anteriormente se não anular a inscrição até **17.9.2013**.

ABE - AC

7

Avaliação Trabalhadores-Estudantes (ver Moodle)

Os alunos com o estatuto de trabalhador-estudante que pretendam usufruir do mesmo modelo de avaliação dos estudantes em regime ordinário, deverão declará-lo por escrito, entregando a respectiva declaração, o mais tardar até à segunda aula prática, ficando obrigados a assistir e participar em, pelo menos, 80% das aulas práticas.

ABF - AC

8

Aulas práticas

Os alunos que estejam obrigados a frequentar as aulas práticas terão obrigatoriamente que possuir um caderno de registo (*log book*) das atividades dessa componente destinado exclusivamente a esta disciplina.

Este caderno de registo deverá ter o formato A4 ou A5 e as suas folhas agrafadas. Na primeira página terá obrigatoriamente o nome e número mecanográfico do seu proprietário.

Este caderno será utilizado para efeitos da componente de apreciação do docente na avaliação da disciplina.

Docentes

Regente e aulas TP:

António Ferrari ferrari@ua.pt Gabinete: no IEETA

Aulas práticas:

António Cruz (cruz@ua.pt) - P1D, P2C, P3C, P6A

José Luís Azevedo (la@ua.pt) – P1E, P5B

Pedro Cabral (pcabral@ua.pt) – P1B, P2A, P3B, P4A

Pedro Lavrador (plavrador@ua.pt) - P1C, P2B, P4B

Tomás Oliveira e Silva (tos@ua.pt) - P1A, P3A, P5A

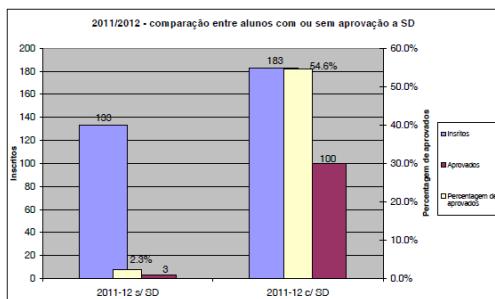
OT: Quarta-Feira 9h30-10h30 Dúvidas das Práticas

Quinta-Feira 14h-15h Dúvidas sobre a matéria teórica

ABF - AC I

10

Pré-requisitos: AC 1 e Sistemas Digitais (2)



ABF - AC I

11

2. Modelo de Von Neumann Evolução da tecnologia de computadores

ABF - AC I

12

O Modelo de Von Neumann

- Von Neumann – programa armazenado em memória - "Stored-Program Digital Computer"

(*Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*,
Burks, Goldstine, von Neumann, 1946)

Nota: ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), terminado em 1946 era programado externamente, com cablagens – vários dias para programar uma tarefa que demorava minutos a executar

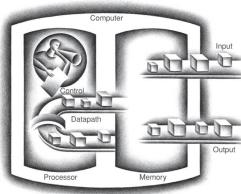
- Solução: armazenar o programa em memória

ABF - AC I

13

Estrutura dos Computadores

- Processador**
 - Opera sobre informação contida em memória sob o controle de um programa
 - Programa: sequência de instruções armazenadas na memória
- Memória**
 - Dados e Instruções (programa)
- Dispositivos de entrada de dados**
 - Fornecem a informação que é armazenada na memória
- Dispositivos de saída de dados**
 - Fornecem informação ao utilizador



ABF - AC I

14

Evolução da tecnologia

| Year | Name | Size (cu. ft.) | Power (watts) | Performance (flops/sec) | Memory (KB) | Price | Price performance vs. UNIVAC | Adjusted price (2007 \$) | Adjusted price performance vs. UNIVAC |
|------|------------------------------|----------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 1951 | UNIVAC I | 1,000 | 125,000 | 2,000 | 48 | \$1,000,000 | 1 | \$7,670,724 | 1 |
| 1964 | IBM S/360 model 50 | 60 | 10,000 | 500,000 | 64 | \$1,000,000 | 263 | \$6,018,798 | 339 |
| 1965 | PDP-8 | 8 | 500 | 330,000 | 4 | \$16,000 | 10,855 | \$94,685 | 13,367 |
| 1976 | Cray-1 | 58 | 80,000 | 166,000,000 | 32,000 | \$4,000,000 | 21,842 | \$13,509,798 | 47,127 |
| 1981 | IBM PC | 1 | 150 | 240,000 | 256 | \$3,000 | 42,105 | \$6,859 | 134,208 |
| 1991 | HP 9000/ model 750 | 2 | 500 | 50,000,000 | 16,384 | \$7,400 | 3,556,188 | \$11,807 | 16,241,889 |
| 1995 | Intel Pro PC (200 MHz) | 2 | 500 | 400,000,000 | 16,384 | \$4,400 | 47,846,890 | \$6,211 | 247,021,234 |
| 2003 | Intel Pentium 4 PC (3.0 GHz) | 2 | 500 | 6,000,000,000 | 262,144 | \$1,600 | 1.875,000,000 | \$2,009 | 11,451,750,000 |
| 2007 | AMD Barcelona PC (2.5 GHz) | 2 | 250 | 20,000,000,000 | 2,097,152 | \$800 | 12,500,000,000 | \$800 | 95,884,031,042 |

1ª geração – Tubos de raios catódicos (válvulas) - UNIVAC

2ª geração – Transistores, Memórias de Ferrite – a partir de 1958 – Philco Transac S-2000

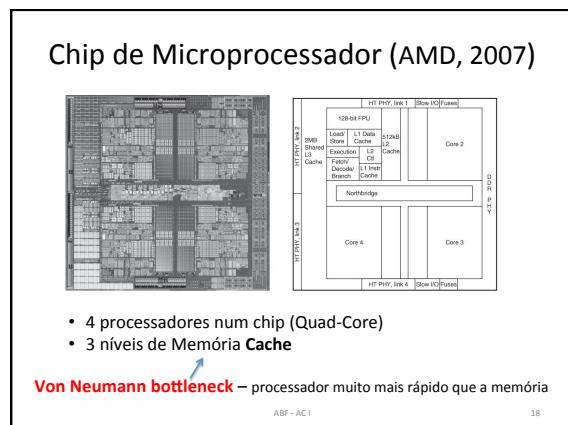
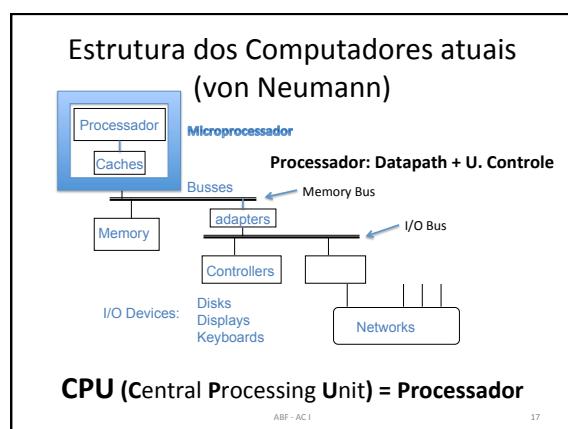
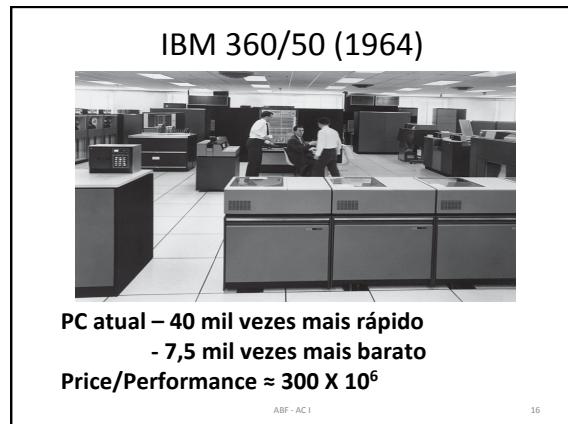
3ª geração – Circuitos Integrados – Minicomputadores – PDP-8 (1965)

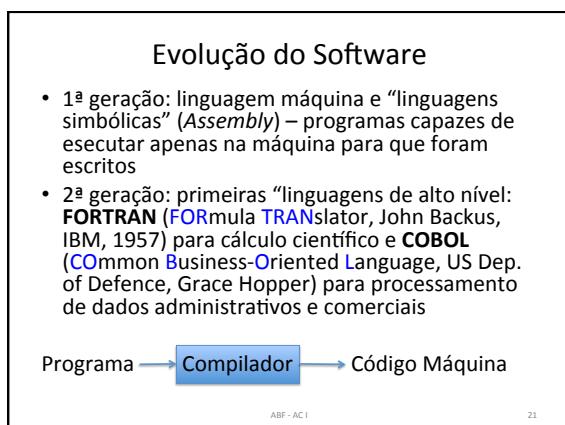
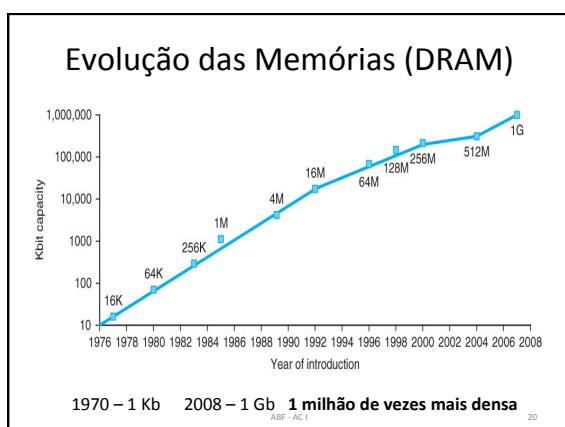
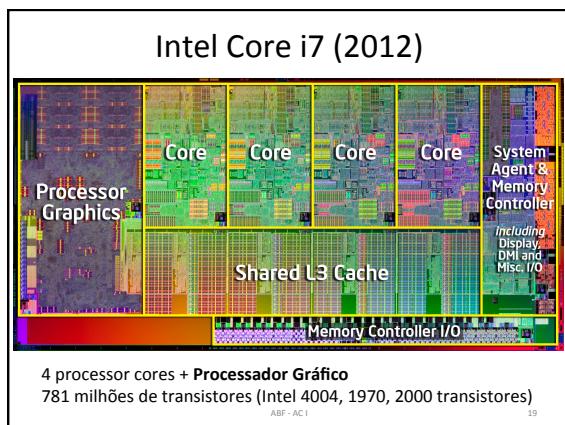
- Supercomputadores vetoriais – Cray-1 (1976)

- VLSI – processador integrado num único chip – Microprocessador (1970)

- Memórias de semicondutores (RAM) – 1Kb DRAM (1970)

15





Evolução do Software (2)

- Linguagens de alto nível:
 - Maior produtividade
 - Portabilidade
 - Conservação do investimento feito no desenvolvimento dos programas
 - Sistemas de Operação – proprietários, escritos em assembly até ao aparecimento do UNIX (escrito em C, 1973, D. Ritchie, K. Thompson, Bell Labs.)
 - PCs – software como indústria – Microsoft torna-se uma das maiores empresas mundiais

ABF - AC E

22

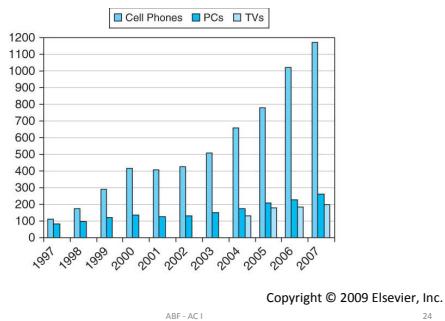
Domínios de Utilização

- Computadores
 - Tablets
 - Computadores Pessoais
 - Servidores
 - Supercomputadores
 - Equipamentos de Comunicação: **Telemóveis, Internet Routers, ...**
 - **Embedded Systems:** automóveis, aviões, set-top boxes, câmaras de vídeo, iPods, máquinas de lavar, ...

ABF - AC E

23

Produção anual de Telemóveis e PCs



, Inc.

Arquiteturas atuais

- **Intel x86**
 - Computadores Pessoais
 - Servidores
- **ARM**
 - Tablets
 - Telemóveis
- **MIPS**
 - Equipamentos de Rede (Routers, ...), Embedded Systems
- **IBM**
 - Mainframes
- **Embedded Systems:** automóveis, aviões, televisores, máquinas de lavar, ...
 - MIPS, x86

ABF - AC I

25

Evolução da indústria e da tecnologia: Bibliografia adicional

Eric G. Sweden, David L. Ferro,
Computers – the life history of technology,
 John Hopkins University Press, 2007

Paul E. Ceruzzi, ***A History of Modern Computing,***
 2nd Ed., The MIT Press, 2003

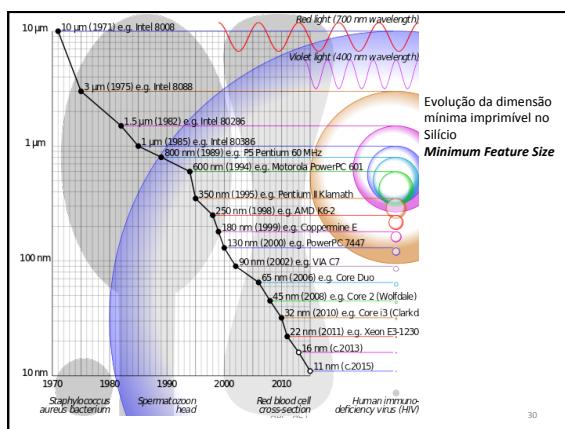
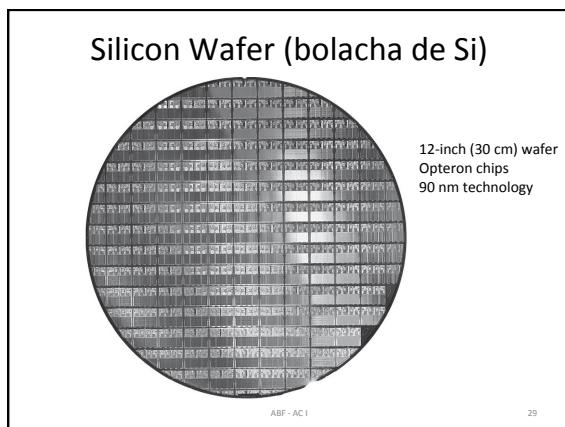
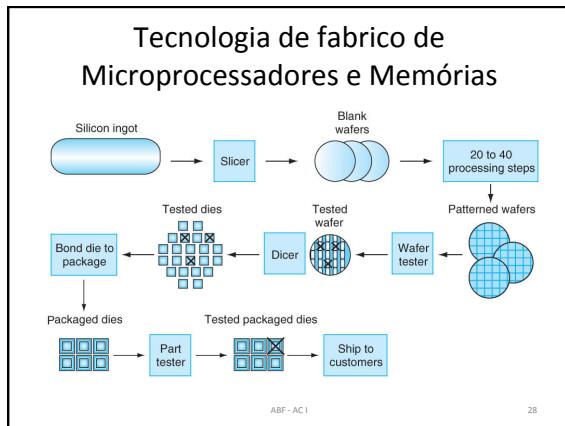
ABF - AC I

26

4. Tecnologia integrada (VLSI, ULSI)

ABF - AC I

27



Lei de Moore: performance duplica cada 18 meses (Gordon Moore, 1965)



The Value of Time-to-Market

Time-to-market is an increasingly large factor in a product's total integrated profit



3. Definição de Arquitetura

Instruction Set Architecture (ISA)

- SOFTWARE**

 - ISA - os atributos de um sistema de computação tal como vistos por um programador:
 - Estrutura conceptual e o comportamento funcional
 - ≠ da organização do fluxo de dados e da unidade de controle (Sistemas Digitais) e da implementação física (Microeletrônica)
 - Andahl, Blaauw, and Brooks, 1964 (IBM S/360)*
 - Organização da memória
 - Tipos e estruturas de dados: codificação e representação
 - Formatos de instrução
 - Códigos de operação
 - Modos de endereçamento e de acesso a dados e instruções
 - Condições de exceção

Amdahl, Blaauw, and Brooks, 1964 (IBM S/360)

- Organização da memória
- Tipos e estruturas de dados: codificação e representação
- Formatos de instrução
- Códigos de operação
- Modos de endereçamento e de acesso a dados e instruções
- Condições de exceção

ABF - AC

34

Organização – visão do projeto de um sistema digital

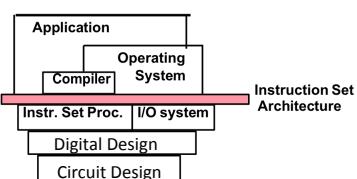
- Capacidade e desempenho das unidades funcionais (Registos, ALU, Shifters, ...)
 - Interligações entre os componentes
 - Fluxos de informação entre os componentes
 - Modo como os fluxos de informação são controlados

HARDWARE

ABF - AC

35

Arquitetura de Computadores



Microarquitetura: a organização do processador, incluindo as principais unidades funcionais e as respetivas ligações e controlo

ABF - AC

36

Uma Arquitetura Múltiplas Microarquiteturas

- Uma mesma arquitetura permite múltiplas implementações:
 - Contemporâneas no tempo com níveis de **desempenho e custos muito diversos**
 - IBM S/360 – modelos com desempenho relativo 1:25 anunciados no mesmo dia
 - Manter o mesmo interface com o software de sistema ao longo do tempo
 - IBM mantém ainda a arquitetura definida em 1964 (embora com extensões)
 - A arquitetura da mais recente geração de processadores Intel é ainda a x86 de 1978

ABF - AC I

37

Fatores que influenciam a definição de uma Arquitetura

- Aplicações
- Linguagens de programação
- Sistemas de Operação
- Tecnologia
- História

ABF - AC I

38

5. Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Computação

ABF - AC I

39

Como medir o desempenho?

- Duas perspetivas:
 - Utilizador: tempo de execução dos programas – ***execution time***
 - Gestor de um *datacenter*: número de tarefas executadas por dia; Sistema do Multibanco: número de transações possíveis de efetuar por minuto – ***throughput***
- Perspetiva em AC 1 – execution time
- Em Sistemas de Operação abordam-se as duas perspetivas

ABF - AC I

40

Desempenho Relativo

Performance = 1 / Tempo de execução

$$\begin{aligned} \text{Performance}_A / \text{Performance}_B &= \\ (1 / \text{Tempo de execução}_A) / (1 / \text{Tempo de execução}_B) &= \\ \text{Tempo de execução}_B / \text{Tempo de execução}_A \end{aligned}$$

ABF - AC I

41

Tempo de Execução

- Tempo de Execução tem vários significados:
 1. Tempo decorrido entre o início e o fim da execução da tarefa – ***response time*** ou ***elapsed time*** – inclui entrada e saída de dados (I/O), acessos ao disco, tempo gasto pelo sistema de operação, ... - **System Performance**
 2. Tempo que o processador gasta a executar o programa do utilizador (excluindo tempo de espera por I/O, etc.) – ***CPU time***

$$\begin{aligned} \text{CPU time} &= \text{user CPU time} + \text{system CPU time} \\ \text{user CPU time} &- \text{CPU Performance} \end{aligned}$$

ABF - AC I

42

CPU Performance

CPU time = Nº de ciclos de relógio do CPU * Tempo de ciclo
 $= \text{Nº de ciclos de relógio} / \text{Frequência do relógio}$

Nº de ciclos de relógio =
 Nº de instruções do programa * Nº médio de ciclos por instrução

CPI – Clocks Per Instruction

CPU time = Nº de instruções * CPI / Frequência de relógio

➤ Melhorar desempenho implica:
Diminuir CPI ou **Aumentar frequência do relógio**

ABF - AC I 43

Medidas de desempenho

CPU time = Nº de instruções * CPI / Frequência de relógio

- Que programa(s) escolher para medir o desempenho?
 - Escolher um conjunto de programas que seja representativo do tipo de utilização dos computadores – **SPEC** program suite **SPEC** program suite: **SPECint** + **SPECfp**
 - Usar um programa em que cada tipo de instrução aparece com a mesma frequência com que aparece no conjunto de programas de representativo **benchmarks sintéticos** – **Dhrystone**, **Whetstone**, ...
- MIPS** = Frequência de relógio (MHz) / CPI
 - só tem significado para comparar processadores com a mesma arquitetura

ABF - AC I 44

SPECint2006 no Opteron X4

| Description | Name | Instruction Count $\times 10^{-3}$ | CPI | Clock cycles (clock nuds $\times 10^{-3}$) | Execution Time (clock nuds) | Reference Time (clock nuds) | SPEC Cint 06 |
|------------------------------------|-----------|------------------------------------|------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| Interpreted string processing | perf | 2,118 | 0.75 | 0.4 | 637 | 9,770 | 15.3 |
| Block-sor ting compression | bzip2 | 2,389 | 0.85 | 0.4 | 817 | 9,650 | 11.8 |
| Graph coloring | pcx | 1,050 | 1.72 | 0.4 | 734 | 8,050 | 11.1 |
| Conditional optimization | mcf | 336 | 1.00 | 0.4 | 1,345 | 9,120 | 6.8 |
| Go game (AI) | go | 1,658 | 1.09 | 0.4 | 731 | 10,490 | 14.6 |
| Search gene sequ ence | hammer | 2,783 | 0.80 | 0.4 | 899 | 9,330 | 10.5 |
| Chess game (AI) | simpg | 2,176 | 0.96 | 0.4 | 837 | 12,100 | 14.5 |
| Quantum computer simulation | lbquantum | 1,623 | 1.61 | 0.4 | 1,047 | 20,720 | 19.8 |
| Video compression | h264vc | 3,102 | 0.80 | 0.4 | 993 | 22,130 | 22.3 |
| Diffusion event simulation library | omnetpp | 587 | 2.94 | 0.4 | 690 | 6,250 | 9.1 |
| Gamepath finding | astar | 1,082 | 1.79 | 0.4 | 773 | 7,020 | 9.1 |
| XML parsing | xalancbmk | 1,058 | 2.70 | 0.4 | 1,143 | 6,900 | 6.0 |
| Geometric Mean | | | | | | | 11.7 |

Nota: CPI altamente variável com o programa executado

ABF - AC I 45

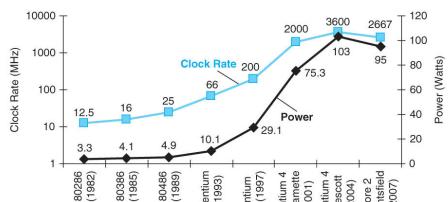
Outro critério: Potência consumida

- Potência consumida:
 - fator crítico em sistemas portáteis – autonomia da bateria
 - Capacidade de dissipação do calor produzido num chip é limitada
 - Depende da frequência de relógio
- Processadores **multi-core** – para idêntico desempenho menor frequência de relógio

ABF - AC I

46

Frequência de relógio e Potência consumida



ABF - AC I

47

Caracterização do Consumo de Potência SPECpower

| Target Load % | Performance (kg_op/s) | Average Power (Watts) |
|---|-----------------------|-----------------------|
| 100% | 231.86 7 | 295 |
| 90% | 211.282 | 286 |
| 80% | 185.80 3 | 275 |
| 70% | 163.42 7 | 265 |
| 60% | 140.16 0 | 256 |
| 50% | 118.32 4 | 246 |
| 40% | 92.03 5 | 233 |
| 30% | 70.50 0 | 222 |
| 20% | 47.12 6 | 206 |
| 10% | 23.06 6 | 180 |
| 0% | 0 | 141 |
| Overall Sum | 1,283. 590 | 2,605 |
| $\sum \text{ssj.ops} / \sum \text{power} =$ | | 493 |

2.3 GHz AMD Opteron X4 with 16 GB of DDR2-667 DRAM and one 500 GB disk

Copyright © 2009 Elsevier, Inc.

ABF - AC I

48

Referências

David Patterson, John Hennessy
Computer Organization and Design – the Hardware / Software Interface, 4th ed.
- Capítulo 1
