

Princípios de Projeto de Computadores

Prof. Gustavo Girão

Plano de Aula

- Discutir sobre os aspectos que devem ser considerados no projeto de sistemas de computação
- Apresentar e discutir as métricas de desempenho
- Apresentar quais os princípios que devem ser seguidos no projeto dos sistemas de computação

Tarefa do Projetista

- Combinar
 - Arquitetura do conjunto de instruções
 - Organização do computador
 - ✧ Componentes funcionais e sua interconexão
 - Implementação de hardware
 - ✧ Circuitos, tecnologias de integração, etc

Desempenho

O que significa dizer que um computador tem um desempenho melhor do que outro?

ANALOGIA

Airplane	Passenger capacity	Cruising range (miles)	Cruising speed (m.p.h.)	Passenger throughput (passengers × m.p.h.)
Boeing 777	375	4630	610	228,750
Boeing 747	470	4150	610	286,700
BAC/Sud Concorde	132	4000	1350	178,200
Douglas DC-8-50	146	8720	544	79,424

PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L. **Organização e Projeto de Computadores:** A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.

Qual avião tem melhor desempenho?

Airplane	Passenger capacity	Cruising range (miles)	Cruising speed (m.p.h.)	Passenger throughput (passengers × m.p.h.)
Boeing 777	375	4630	610	228,750
Boeing 747	470	4150	610	286,700
BAC/Sud Concorde	132	4000	1350	178,200
Douglas DC-8-50	146	8720	544	79,424

PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L. **Organização e Projeto de Computadores:** A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.

Qual avião tem melhor desempenho?

Maior velocidade de cruzeiro?

Airplane	Passenger capacity	Cruising range (miles)	Cruising speed (m.p.h.)	Passenger throughput (passengers × m.p.h.)
Boeing 777	375	4630	610	228,750
Boeing 747	470	4150	610	286,700
BAC/Sud Concorde	132	4000	1350	178,200
Douglas DC-8-50	146	8720	544	79,424

PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L. **Organização e Projeto de Computadores:** A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.

Qual avião tem melhor desempenho?

Maior alcance?

Airplane	Passenger capacity	Cruising range (miles)	Cruising speed (m.p.h.)	Passenger throughput (passengers × m.p.h.)
Boeing 777	375	4630	610	228,750
Boeing 747	470	4150	610	286,700
BAC/Sud Concorde	132	4000	1350	178,200
Douglas DC-8-50	146	8720	544	79,424

PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L. **Organização e Projeto de Computadores:** A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.

Qual avião tem melhor desempenho?

Maior capacidade?

Airplane	Passenger capacity	Cruising range (miles)	Cruising speed (m.p.h.)	Passenger throughput (passengers × m.p.h.)
Boeing 777	375	4630	610	228,750
Boeing 747	470	4150	610	286,700
BAC/Sud Concorde	132	4000	1350	178,200
Douglas DC-8-50	146	8720	544	79,424

PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L. **Organização e Projeto de Computadores:** A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.

Qual avião tem melhor desempenho?

Velocidade:

1. Levar um passageiro de um ponto a outro mais rapidamente?
2. Levar 450 passageiros de um ponto a outro mais rapidamente??

Desempenho

O que significa dizer que um computador tem um desempenho melhor do que outro?

Desempenho

- Na comparação entre dois computadores executando um programa
 - O mais rápido é o que termina primeiro.
- Na comparação entre datacenters com diversas requisições para executar
 - O mais rápido é o que atende mais requisições no final de um dia.

Desempenho

- Como usuário, queremos reduzir o tempo de resposta (tempo de execução) – tempo de início e fim de uma tarefa
- Nos datacenters, estamos mais interessados em vazão (*throughput*) – total de trabalho executado em um determinado tempo
- Por isso, em geral, são necessárias diferentes métricas de desempenho bem como diferentes aplicações para avaliar o desempenho
 - Ex.: desktop, sistemas embarcados ou datacenters

Desempenho

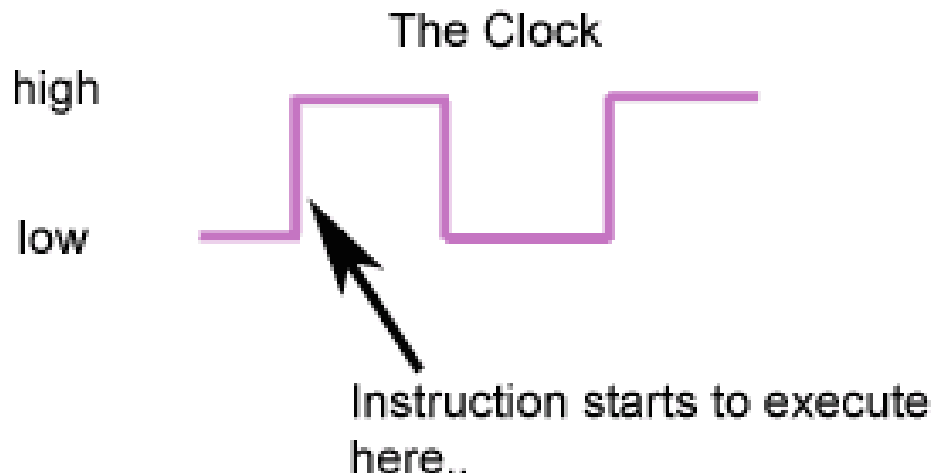
- Tempo de resposta (latência)
 - Quanto tempo leva para meu trabalho ser realizado?
 - Quanto tempo leva para realizar um trabalho específico?
 - Quanto tempo preciso para finalizar minha simulação?
- Vazão (*throughput*)
 - Quantos trabalhos a máquina pode realizar em um intervalo de tempo?
 - Qual a velocidade média de execução?
 - Quanto trabalho está sendo feito?

Tempo de Execução

- Tempo decorrido
 - Contabiliza tudo
 - ✧ Acesso ao disco
 - ✧ Acesso à memória
 - ✧ E/S
 - ✧ Execução
 - Normalmente, não é ideal para fins de comparação
- Tempo de CPU
 - Somente o tempo de executar programas de usuário e sistema
- Tempo de CPU do usuário
 - Tempo gasto executando os programas de usuário desconsiderando chamadas de sistemas e SO

Ciclos de Relógio

- Componentes digitais síncronos precisam de algum referencial temporal
- Sinal distribuído que determina quando se deve fazer alguma coisa



source: www.teach-ict.com

Ciclos de Relógio

- Computar o desempenho em termos do número de ciclos gastos ao invés de tempo
- Ciclos de relógio indicam quando iniciar alguma atividade
- Tempo de ciclo = tempo entre *ticks* = segundos por ciclo
- Taxa de relógio (frequência) = ciclos por segundo
 - (1Hz = 1 ciclo/segundo)
- Exemplo: processador de 2.4 GHz tem um tempo de ciclo de:
 - $1 / 2.4 \times 10^9 \Rightarrow 4.1 \times 10^{-10}$ segundos

Tendo sido entendido Ciclo de Relógio

- Um programa vai exigir
 - Um certo número de instruções
 - Um certo número de ciclos
 - Um certo número de segundos
- Relacionando estas quantidades
 - Período de ciclo (segundos por ciclo. Ex.: ciclo = 1 ns)
 - Frequência de relógio (ciclos por segundo. Ex.: $F = 1$ GHz)
 - CPI (ciclos por instrução)
 - MIPS (milhões de instruções por segundo)

Qual computador tem melhor desempenho (tempo ou menor latência) ao executar o programa A?

Computador A: 100 ciclos?

Computador B: 1000 ciclos?

Qual computador tem melhor desempenho (tempo ou menor latência) ao executar o programa A?

Computador A: 100 ciclos?

Computador B: 1000 ciclos?

Depende:

Se período de A for 20 ns

$$\Rightarrow 100 * 20 = 2000 \text{ ns}$$

Se período de B for 1 ns

$$\Rightarrow 1000 * 1 = 1000 \text{ ns}$$

Qual computador tem melhor desempenho ao executar o programa A?

Computador A: $\text{CPI} = 5?$

Computador B: $\text{CPI} = 1?$

Qual computador tem melhor desempenho ao executar o programa A?

Computador A: $\text{CPI} = 5?$

Computador B: $\text{CPI} = 1?$

Depende:

Se período de A for 1 ns, para 1 instrução $\Rightarrow 5 \text{ ns}$

Se período de B for 10 ns, para 1 instrução $\Rightarrow 10 \text{ ns}$

Qual programa vai executar mais rápido?

Programa A: 2000 instruções

Programa B: 100 instruções

Qual programa vai executar mais rápido ?

Programa A: 2000 instruções

Programa B: 100 instruções

Depende:

Precisamos saber

- **Frequência de execução**
- **CPI**

Melhorias no desempenho

- Técnicas de hardware ou software para aumentar o desempenho
 - Tempo de resposta ou Vazão
- É preciso considerar no que investir
 - Velocidade de processamento
 - ✧ Frequência de operação
 - ✧ Quantidade de instruções por ciclo de relógio
 - Acesso à memória
 - Etc
- Existem alguns princípios que regem os projetos de computadores que são usados para poder determinar onde é melhor investir

Princípios de projeto

1) Tornar rápido o caso comum

- Investir mais tempo e recurso otimizando as partes do sistema que são usadas com mais frequência

Hot spots: em 90% do tempo é executado 10% do código

2) Lei de Amdahl

Se um processador conseguir executar operações de soma 10x mais rápido, qual vai ser a aceleração final desse processador?

2) Lei de Amdahl

O ganho de desempenho possível de um dado melhoramento é **limitado** pela fração de tempo que a característica melhorada é usada.

Lei de Amdahl

$$\text{TempoExec}_{\text{Final}} = \frac{\text{TempoExec}_{\text{FraçãoMelhorada}}}{\text{Melhora}_{\text{Fração}}} + \text{TempoExec}_{\text{FraçãoNãoAfetada}}$$

Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **4 vezes** mais rápido?

Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **4 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{4} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **4 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{4} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$25 - 20 = \frac{80}{n}$$

Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **4 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{4} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$25 - 20 = \frac{80}{n}$$

$$5n = 80$$

$$n = 16$$

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{5} = \left(\frac{80}{n} \right) + 20$$

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{5} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$20 - 20 = \frac{80}{n}$$

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{5} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$20 - 20 = \frac{80}{n}$$

$$0 = \frac{80}{n}$$

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{5} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$20 - 20 = \frac{80}{n}$$

$$0 = \frac{80}{n}$$

$$n = \frac{80}{0}$$

Outro Exemplo

- Suponha que um programa seja executado em **100 segundos** em uma máquina, com multiplicação responsável por **80 segundos** desse tempo. O quanto precisamos melhorar a velocidade da multiplicação se queremos que o programa seja executado **5 vezes** mais rápido?

$$\frac{100}{5} = \left(\frac{80}{n}\right) + 20$$

$$20 - 20 = \frac{80}{n}$$

$$0 = \frac{80}{n}$$

$$n = \frac{80}{0}$$

n precisa ser INFINITO!!

3) Melhorar a equação de desempenho da CPU

$$\text{Tempo de CPU} = \frac{\text{Instruções}}{\text{Programa}} \times \frac{\text{Ciclos de Clock}}{\text{Instrução}} \times \frac{\text{Segundos}}{\text{Ciclos de Clock}}$$

(Segundos/Programa)

- Dependências

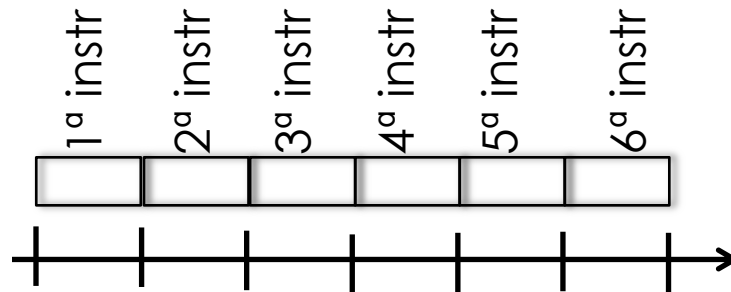
- ✧ **Contagem de instruções** (por programa): arquitetura do conjunto de instruções e tecnologia de compiladores
- ✧ **CPI (ciclos por instrução)**: organização e arquitetura do conjunto de instruções
- ✧ **Tempo de ciclo de relógio**: tecnologia de hardware e organização

Formas de Melhorar a Eficiência

- Reduzir o número de ciclos por programa
 - Otimizações em tempo de compilação
 - Conjunto de instruções otimizado
- Reduzir a duração do ciclo do relógio (aumentar frequência)
 - Tecnologia de hardware
 - Organização da máquina

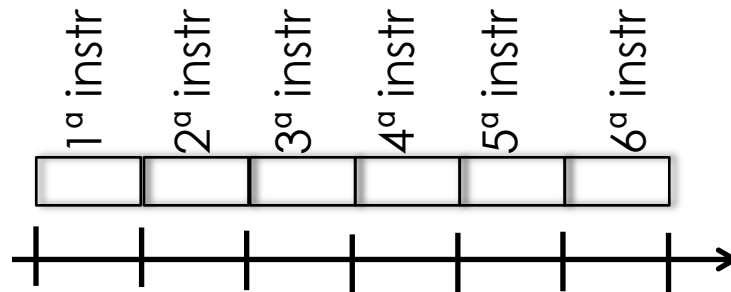
Número de ciclos gastos em um programa

- Poderia-se assumir que o número de ciclos é igual ao número de instruções



Número de ciclos gastos em um programa

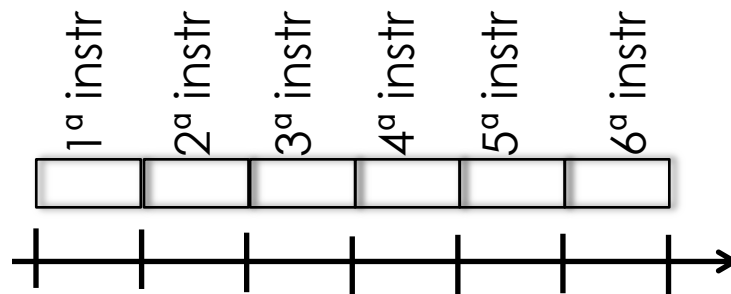
- Poderia-se assumir que o número de ciclos é igual ao número de instruções



Por que não dá certo?

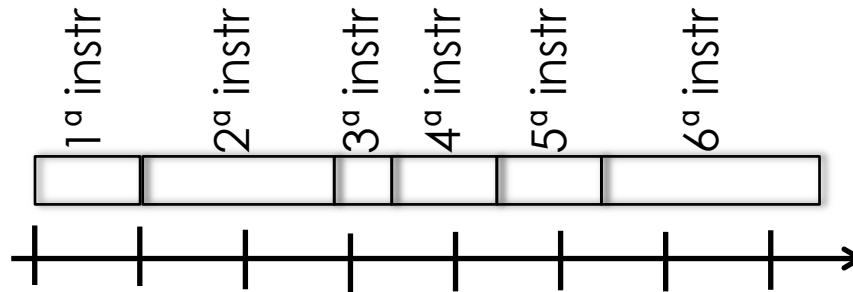
Número de ciclos gastos em um programa

- Poderia-se assumir que o número de ciclos é igual ao número de instruções



- Por que não dá certo?
 - Algumas instruções são mais complexas do que outras, gastando mais tempo
 - Instruções diferentes gastam tempos diferentes em máquinas diferentes

Diferentes números de ciclos para diferentes instruções



- Multiplicação gasta mais tempo do que adição
- Operações de ponto flutuante gastam mais tempo que operações de inteiros
- Acesso à memória toma mais tempo do que acesso a registradores

Discussão

- Dobrar a frequência de relógio dobra o desempenho?
- Pode uma máquina com relógio mais lento ter um desempenho melhor?

Discussão

- Considere duas máquinas implementando o mesmo conjunto de instruções
- Para um certo programa com 5 instruções:
 - A máquina A tem um período de relógio de 10ns e CPI = 2,0
 - A máquina B tem um período de relógio de 15ns e CPI = 1,2

Qual das duas máquinas é mais rápida para este programa?

Discussão

- Considere duas máquinas implementando o mesmo conjunto de instruções
- Para um certo programa com 5 instruções:
 - A máquina A tem um período de relógio de 10ns e CPI = 2,0
 - A máquina B tem um período de relógio de 15ns e CPI = 1,2

Qual das duas máquinas é mais rápida para este programa?

Cálculo

- Precisamos saber quanto tempo leva. Logo, precisamos multiplicar o número de ciclos para completar **uma instrução** pelo número de instruções. Assim saberemos quantos ciclos levou. Por fim, multiplicamos o número de ciclos pelo tempo cada ciclo (período):

Máquina A

10ns

CPI = 2

2 ciclos por instrução: $2 * 5 * 10 = 100\text{ns}$

Máquina B

15ns

CPI = 1,2

1,2 ciclos por instrução: $1,2 * 5 * 15 = 90\text{ns}$

Discussão

- Considere duas máquinas implementando o mesmo conjunto de instruções
- Para um certo programa com 5 instruções:
 - A máquina A tem um período de relógio de 10ns e CPI = 2,0
 - A máquina B tem um período de relógio de 15ns e CPI = 1,2

Qual das duas máquinas é mais rápida para este programa?

Máquina B!!

Discussão

- Considere o seguinte cenário
 - Uma máquina executa um programa de 2 bilhões de instruções
 - O processador executa as instruções em 12 segundos
 - O processador opera a uma frequência de 1 Ghz
 - Qual o CPI (ciclos por instrução) desta máquina neste caso?

Cálculo

- Para saber o CPI, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de instruções.
- Já temos o número de instruções: **2 bilhões (ou 2×10^9)**

Cálculo

- Para saber o CPI, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de instruções.
- Já temos o número de instruções: **2 bilhões (ou 2×10^9)**
- Os ciclos:

1Ghz equivale a $1/1.000.000.000$ que é **1×10^{-9}**

Logo, o processador faz alguma coisa (ou seja, **1 ciclo**) a cada **1×10^{-9}** segundos (que é o mesmo que 1 **nanosegundo**)

Cálculo

- Para saber o CPI, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de instruções.
- Já temos o número de instruções: **2 bilhões (ou 2×10^9)**
- Os ciclos:

1Ghz equivale a $1/1.000.000.000$ que é **1×10^{-9}**

Logo, o processador faz alguma coisa (ou seja, **1 ciclo**) a cada **1×10^{-9}** segundos (que é o mesmo que 1 **nanosegundo**)

Se ele executa por 12 segundos, temos:

$$\frac{12}{1 \times 10^{-9}} = \mathbf{12 \times 10^9 \text{ ciclos}}$$

$$\text{Então: CPI} = \frac{12 \times 10^9}{2 \times 10^9} = 6$$

Resumindo

- Desempenho é específico para cada programa
 - **O tempo de execução é a medida de desempenho consistente**
- Melhorias de desempenho resultam de:
 - Melhoria na frequência de relógio
 - Melhorias na arquitetura e na organização do processador para reduzir CPI
 - Melhoria nos compiladores para reduzir CPI e contagem de instruções/programa

É uma armadilha!

**IT'S
A
TRAP!**



Esperar que melhorias no desempenho de um aspecto da máquina vão afetar seu desempenho global na mesma proporção.

Exemplo Prático

- Comparar o desempenho das máquina MA e MB.

Programa	Tempo de MA	Tempo de MB
1	10 segundos	5 segundos
2	3 segundos	4 segundos

- Qual máquina é mais rápida para cada programa?
- Quão mais rápida?

Exemplo Prático

- Comparar o desempenho das máquina MA e MB.

Programa	Tempo de MA	Tempo de MB
1	10 segundos	5 segundos
2	3 segundos	4 segundos

- Qual máquina é mais rápida para cada programa?
Máquina B é mais rápida para o programa 1
Máquina A é mais rápida para o programa 2
- Quanto mais rápida?

Exemplo Prático

- Comparar o desempenho das máquina MA e MB.

Programa	Tempo de MA	Tempo de MB
1	10 segundos	5 segundos
2	3 segundos	4 segundos

- Qual máquina é mais rápida para cada programa?

Máquina B é mais rápida para o programa 1

Máquina A é mais rápida para o programa 2

- Quão mais rápida?

Programa 1 -> A/B -> 10/5 -> 2 vezes ou 100%

Programa 2 -> B/A -> 4/3 -> 1,33 vezes ou 33%

Exemplo Prático

- Comparar o desempenho das máquina MA e MB.

Programa	Tempo de MA	Tempo de MB
1	10 segundos	5 segundos
2	3 segundos	4 segundos

Programa	#instruções executadas por MA	#instruções executadas por MB
1	200×10^6	160×10^6

- Encontrar MIPS (milhões de instruções por segundo) para cada uma das máquinas.

Cálculo

- **Para a Máquina 1:**

10 segundos ----- 200×10^6 instruções
1 segundo ----- X

$$X = 20 \times 10^6 \text{ instruções/segundo}$$

- **Para a Máquina 2:**

5 segundos ----- 160×10^6 instruções
1 segundo ----- X

$$X = 32 \times 10^6 \text{ instruções/segundo}$$

Exemplo Prático

- Comparar o desempenho das máquina MA e MB.

Programa	Tempo de MA	Tempo de MB
1	10 segundos	5 segundos
2	3 segundos	4 segundos

Programa	#instruções executadas por MA	#instruções executadas por MB
1	200×10^6	160×10^6

- Frequência (f) de MA é 200 MHz. Encontre a quantidade de ciclos gastos por instrução (CPI), para o programa 1.

Cálculo

- Mais uma vez, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de Instruções (já temos! São **200×10^6** inst.)

Cálculo

- Mais uma vez, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de Instruções (já temos! São **200×10^6** inst.)
- Frequencia = 200 MHz
- Período = $1/200 = 0,005 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-9}$ seg (ou 5 ns)

Cálculo

- Mais uma vez, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de Instruções (já temos! São **200×10^6** inst.)
- Frequencia = 200 MHz
- Período = $1/200 = 0,005 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-9}$ seg (ou 5 ns)

Se a máquina MA executa o programa 1 por 10 segundos, então:

$$10s / 5 \times 10^{-9}s = \mathbf{2 \times 10^9 \text{ ciclos}}$$

Cálculo

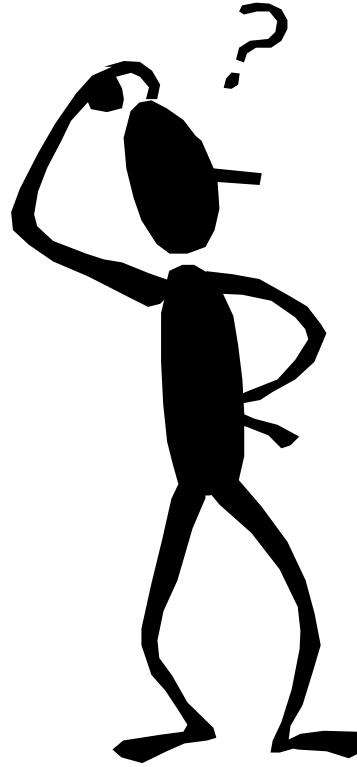
- Mais uma vez, precisamos de duas coisas:
 - O número de ciclos e;
 - O número de Instruções (já temos! São **200×10^6** inst.)
- Frequencia = 200 MHz
- Período = $1/200 = 0,005 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-9}$ seg (ou 5 ns)

Se a máquina MA executa o programa 1 por 10 segundos, então:

$$10s / 5 \times 10^{-9}s = \mathbf{2 \times 10^9 \text{ ciclos}}$$

Logo:

$$CPI = 2 \times 10^9 / 200 \times 10^6 = 10$$



Bibliografia

- PATTERSON, D.A. & HENNESSY, J. L.
Organização e Projeto de Computadores -
A Interface Hardware/Software. 3ª ed. Campus, 2005.
Capítulo 4 – Avaliando e Compreendendo o
Desempenho
- Arquitetura de Computadores – Fundamentos
Prof. Eduardo Simões de Albuquerque
<http://www.inf.ufg.br/~eduardo/arq/Fundamentos2-Eduardo.pdf>

Princípios de Projeto de Computadores

Prof. Gustavo Girão