

“Diga-me como me mede e te direi como me comporto [te engano]”
(Goldratt, E.).

Medidas de Desempenho

Paulo Lisboa de Almeida



Medidas de desempenho

Temos dois computadores.

O computador X e o computador Y .

Como definir qual é melhor?

Medidas de desempenho

Temos dois computadores.

O computador X e o computador Y .

Como definir qual é melhor?

Podemos medir o tempo que X e Y demoram para completar uma tarefa. **Problemas?**

Medidas de desempenho

Temos dois computadores.

O computador X e o computador Y .

Como definir qual é melhor?

Podemos medir o tempo que X e Y demoram para completar uma tarefa. **Problemas?**

- Uma tarefa não representa todos os programas possíveis.
- Computadores diferentes são especialistas (e mais rápidos) em diferentes tarefas.
- Tempo não é a única métrica possível.
 - Quanta energia foi gasta?
 - Quantas tarefas conseguimos completar em um período de tempo (*throughput*)?
 - ...

Wall-clock time



Considere que vamos medir o tempo de execução de um conjunto de tarefas em X .

O tempo que podemos acompanhar com um cronômetro (ou relógio de parede) para completar a tarefa é chamado de *wall-clock time*.

- O tempo que nós humanos vamos precisar esperar para completar a tarefa.
- Se um programa demorou um minuto para ser executado, ele ficou realmente passou um minuto na CPU?

Wall-clock time



Considere que vamos medir o tempo de execução de um conjunto de tarefas em X .

O tempo que podemos acompanhar com um cronômetro (ou relógio de parede) para completar a tarefa é chamado de *wall-clock time*.

- O tempo que nós humanos vamos precisar esperar para completar a tarefa.
- Mas os programas “param” esperando:
 - Entradas e Saídas.
 - O Sistema Operacional.
 - Outros programas que também competem por recursos.
 - ...

O *CPU time* (tempo de CPU) considera apenas o tempo em que o programa ficou efetivamente sendo processado.

Wall-clock time versus CPU time

Então, como medir o tempo? *Wall-clock time* ou *CPU time*?

- Depende do problema.
- *CPU time* parece mais justo;
- Mas *Wall-clock time* é o que nós humanos efetivamente experienciamos.

Exemplo

O comando `time` no Linux mostra o tempo de execução de um programa.

Sintaxe: `time nomeProgramaMensurar`

O comando devolve:

`Real` → O *Wall-clock time* do programa.

`User` → O *CPU time* do programa usado em espaço do usuário.

`Sys` → O *CPU time* do programa usado em espaço do sistema operacional.

Para obter o CPU time completo, some `User+Sys`.

Faça você mesmo

Abra um terminal e execute os comandos.

Mostrar quanto tempo o comando (programa) `ls` demora para executar.

```
time ls
```

Mostrar quanto tempo o comando (programa) `top` vai ficar em execução.

```
time top
```

Medindo o tempo de resposta

Após medir o tempo de execução para X e Y , podemos definir então que X é n vezes mais rápido que Y através de:

$$n = \frac{\text{Tempo Exec}_Y}{\text{Tempo Exec}_X}$$

Throughput

Podemos aplicar o mesmo raciocínio para o *throughput* (vazão).

Exemplo: o *throughput* de X é $2\times$ maior do que o de Y se X completa $2\times$ mais tarefas do que Y em determinado período de tempo.

Quando a vazão pode ser mais importante do que o tempo de execução?

Throughput

Podemos aplicar o mesmo raciocínio para o *throughput* (vazão).

Exemplo: o *throughput* de X é $2\times$ maior do que o de Y se X completa $2\times$ mais tarefas do que Y em determinado período de tempo.

Quando a vazão pode ser mais importante do que o tempo de execução?

- Em servidores, por exemplo.
 - Desejamos completar o maior número de requisições em um determinado período.
 - Não nos importamos se, por exemplo, uma requisição individual para a carga de uma página Web vai demorar 0,1 ou 0,2 segundos.

Energia

Qual a importância da eficiência energética?

Menos energia consumida = menor poluição.

Pense nas tartarugas!



Energia

Qual a importância da eficiência energética?

Menos energia consumida = menor poluição.
Pense nas tartarugas!

Em um celular/Notebook.

Duração da bateria, preço da bateria, custo energético, peso, refrigeração.

Em um servidor.

Custo energético, refrigeração.

Em um Desktop.

Refrigeração, custo energético.

...

Exemplo

Cada 1.000 imagens geradas em modelos de IA Generativa custam em média 2,907 kWh.

Considerando, por exemplo, o ChatGPT, com 70 milhões de imagens diárias.

O consumo de energia é o mesmo de uma cidade com 31.400 habitantes.

Obs.: esse é o custo de inferência. O custo de treinamento pode ser ordens de magnitude maior.

Energia

O que é um Watt?

Energia

Potência (Watts) = 1 Joule por segundo.

Faz sentido medir a potência para o design do sistema de refrigeração.

Comumente os fabricantes chamam de TDP (*Thermal Design Power*).

Acesse em ark.intel.com e veja o TDP de alguns de seus processadores.

TDP é o “consumo sustentado de potência”.

Geralmente é maior do que a potência consumida média.

Geralmente é 1,5x menor do que a potência máxima que pode ser consumida.

Energia

Potência (Watts) = 1 Joule por segundo.

Faz sentido medir a potência para o design do sistema de refrigeração.

Comumente os fabricantes chamam de TDP (*Thermal Design Power*).

Acesse em ark.intel.com e veja o TDP de alguns de seus processadores.

TDP é o “consumo sustentado de potência”.

Geralmente é maior do que a potência consumida média.

Geralmente é 1,5x menor do que a potência máxima que pode ser consumida.

No final das contas, o TDP é uma carga de trabalho definida pelo fabricante, que obviamente não deixa claro que carga é essa.

TDP

A potência de design térmico (TDP) representa o consumo médio de energia, em watts, dissipada pelo processador quando o mesmo funciona em uma Frequência de base com todos os núcleos ativos de acordo com uma carga de trabalho de alta complexidade definida pela Intel. Consulte a Ficha técnica para obter requisitos da solução termal.

Energia

Potência (Watts) = 1 Joule por segundo.

Potência não é uma boa medida para eficiência energética.

Por quê?

Exemplo

Se X consome 20% mais potência (W) que Y , mas completa a tarefa em 70% do tempo que Y , temos que:

$$\text{Consumo} = 1,2 * 0,7 = 0,84$$

Exemplo

Se X consome 20% mais potência (W) que Y , mas completa a tarefa em 70% do tempo que Y , temos que:

$$\text{Consumo} = 1,2 * 0,7 = 0,84$$

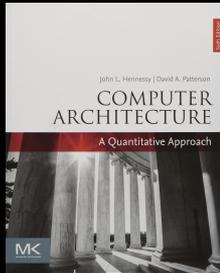
Lembrando que 1 Watt = 1 Joule por Segundo.

X consome mais Joules por Segundo, mas precisa de menos segundos para completar a tarefa.

Devemos comparar então a energia (Joules) gasta para as tarefas, e não a potência (Watts).

A potência pode nos levar a resultados incorretos ou contra intuitivos.

Veja detalhes em: HENNESSY, J; PATTERSON, D. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Elsevier, 2019.

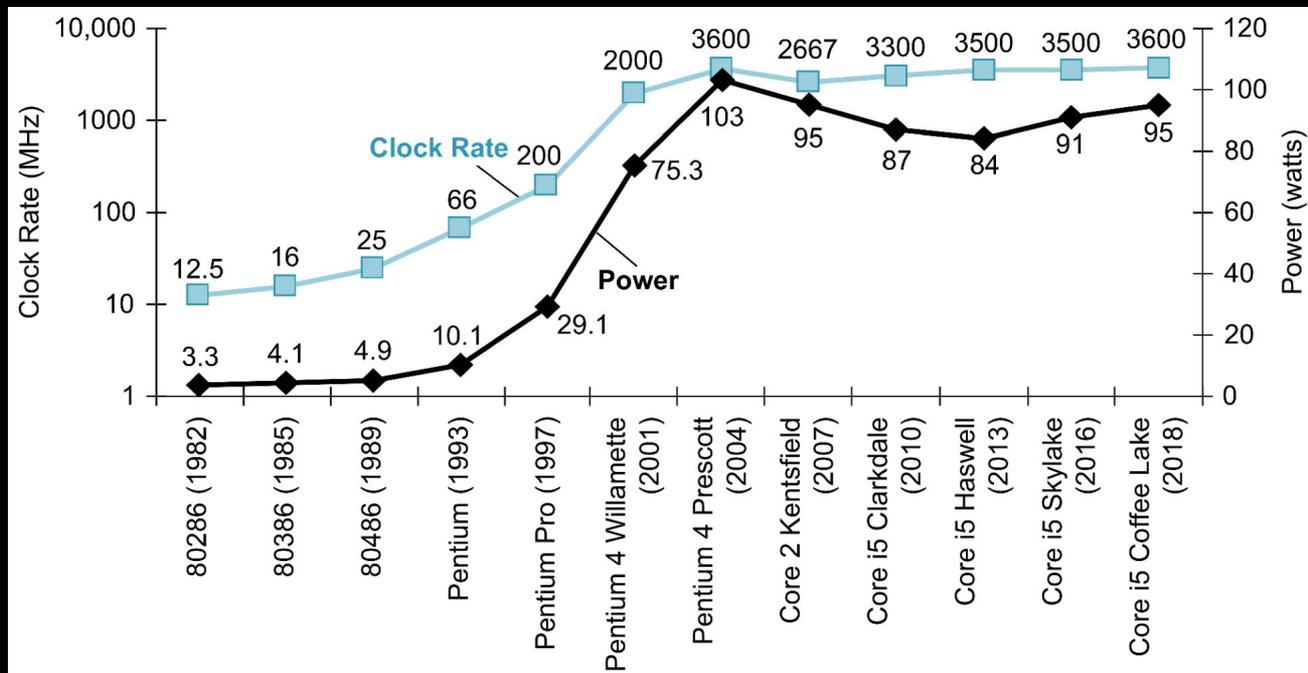


Mais Sobre Energia

Nossas CPUs ficaram sedentas por energia com o tempo.

Sedentas a ponto da energia ser um fator limitante do desempenho.

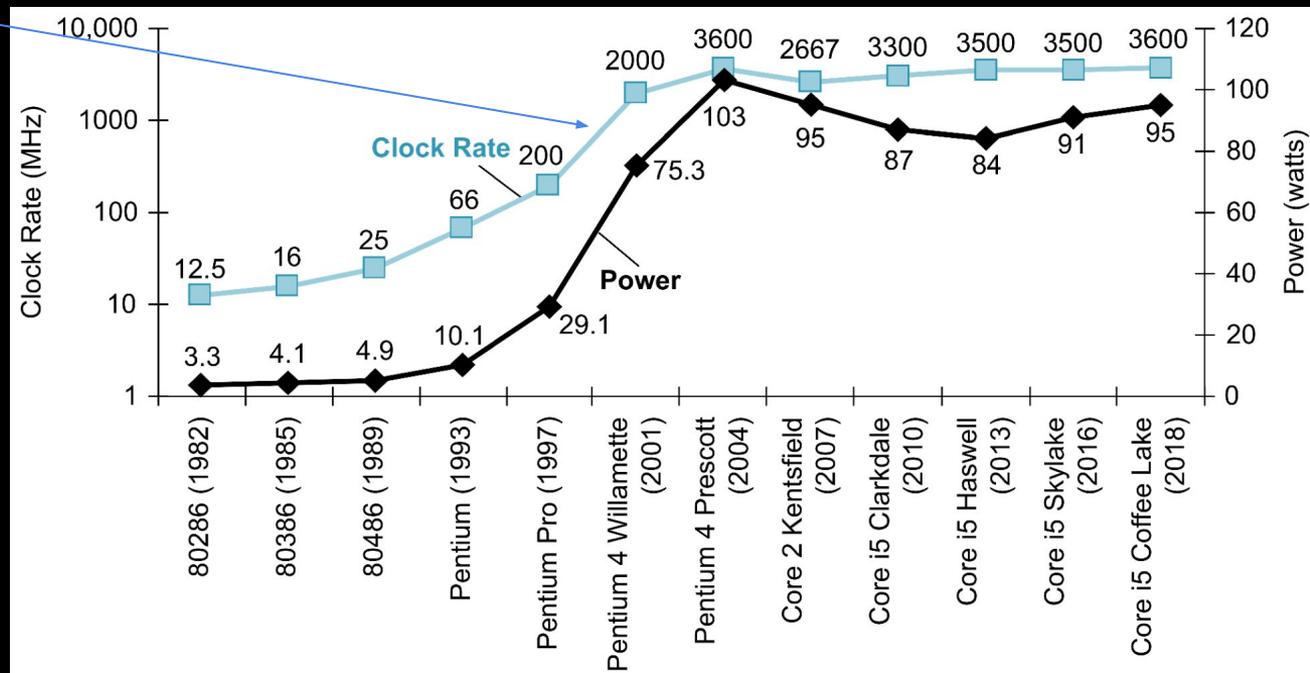
O problema é tão sério que ganhou um nome: **Power Wall**.



Patterson, Hennessy (2020).

Mais Sobre Energia

O aumento do consumo aumenta com a frequência!



Patterson, Hennessy (2020).

Mais Sobre Energia

A maioria dos processadores são feitos com portas lógicas CMOS e suas variantes.

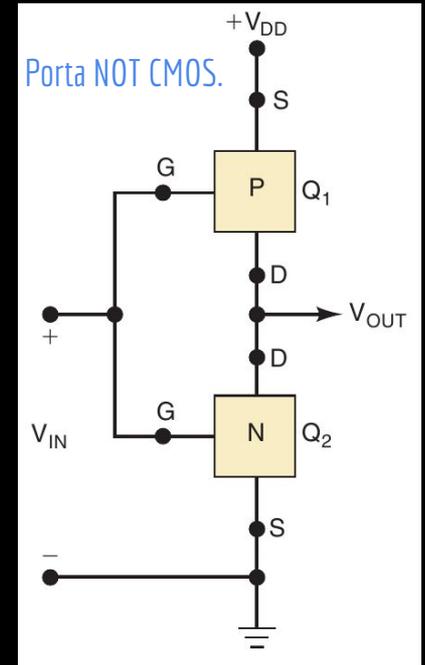
Uma porta CMOS *vaza* (*leaks*) uma quantidade muito pequena de energia quando estática (mantida em 0 ou 1).

Quando **trocamos de estado**, temos dois problemas principais.

Troca de Estados

Durante uma troca de estados, ambos os transistores (P e N) podem ficar semi abertos por um curto período de tempo.

Caminho quase direto entre Vdd e o Terra.



Capacitância Parasita

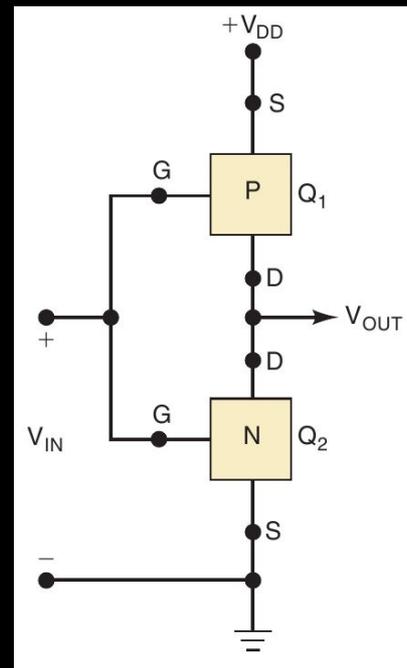
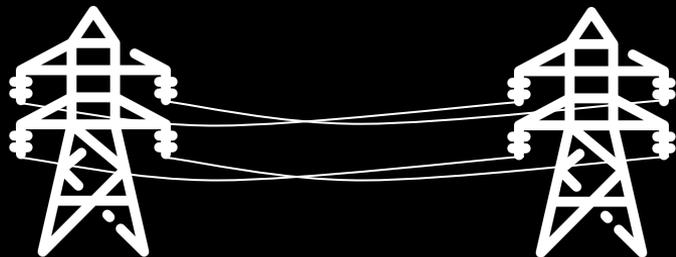
Todo circuito elétrico acumula carga como um capacitor.

Capacitância parasita.

Quando a porta lógica troca de estado, precisamos dissipar a energia desse capacitor.

Custa tempo e energia.

Gera calor.

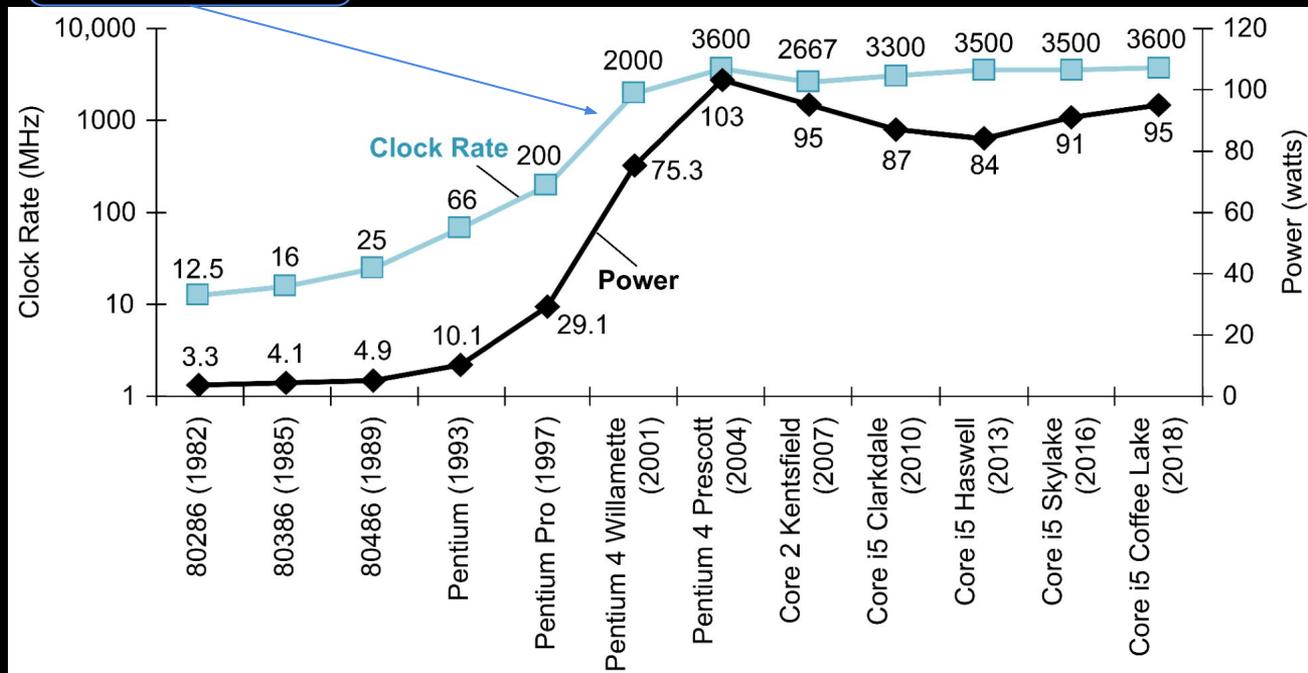


Mais Sobre Energia

Energia \propto Carga Capacitiva \times Tensão² \times Frequência de Trocas

Mais Sobre Energia

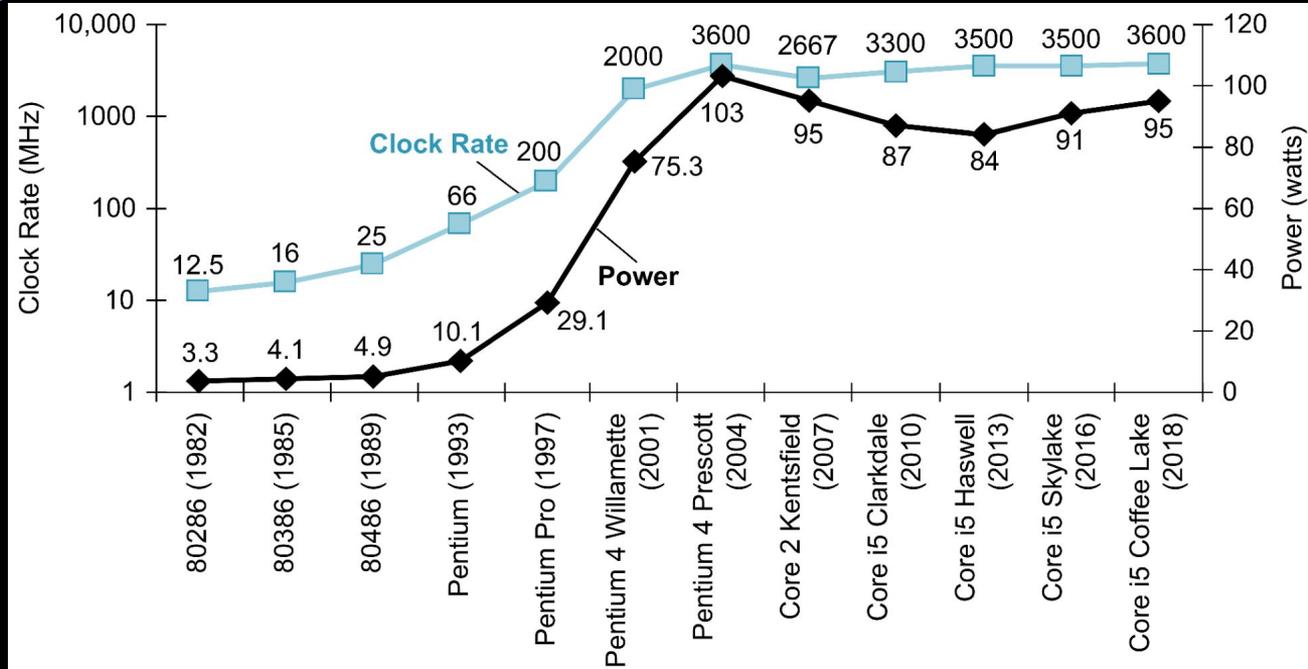
Energia \propto Carga Capacitiva \times Tensão² \times Frequência de Trocas



Mais Sobre Energia

Energia \propto Carga Capacitiva \times Tensão² \times Frequência de Trocas

Cada nova geração tenta diminuir a carga capacitiva e a tensão para compensar pela frequência.



Mais Sobre Energia

Leia mais sobre Power Wall e capacitâncias parasitas em:

Ronald J. Tocci, Gregory L. Moss, Neal S. Widmer. Sistemas digitais. 10a ed. 2017.



Hennessy, Patterson. Arquitetura de Computadores: uma abordagem quantitativa. 2019.



Patterson, Hennessy. Computer Organization and Design RISC-V Edition: The Hardware Software Interface. 2020.



Faça você mesmo

Instale o stress-ng na sua máquina.

```
sudo apt-get install stress-ng
```

Execute em um terminal o comando `watch -n 1 lscpu` para verificar a frequência corrente da sua CPU.

Em outro terminal, execute o seguinte comando para “estressar” uma única CPU do seu sistema por 1 minuto.

```
stress-ng --cpu 1 -t 1m
```

Depois faça o mesmo teste, mas estressando todas as CPUs.

```
stress-ng --cpu 0 -t 1m
```

Faça você mesmo

Instale o stress-ng na sua máquina.

```
sudo apt-get install stress-ng
```

Execute em um terminal o comando `watch -n 1 lscpu` para verificar a frequência corrente da sua CPU.

Em outro terminal, execute o seguinte comando para “estressar” uma única CPU do seu sistema por 1 minuto.

```
stress-ng --cpu 1 -t 1m
```

Depois faça o mesmo teste, mas estressando todas as CPUs.

```
stress-ng --cpu 0 -t 1m
```

O clock pode ter diminuído quando você acionou todas as CPUs por questões de **Energia**.

O sistema não consegue **arrefecer** todas as CPUs ao mesmo tempo.

O sistema não consegue **alimentar** todas as CPUs ao mesmo tempo.

Faça você mesmo

Execute um programa qualquer com o Likwid, e meça a energia gasta para executar o programa na CPU.

No Likwid, os medidores de energia geralmente estão em um grupo ENERGY. Para listar os medidores, use `likwid-perfctr -a`

Exemplo:

```
likwid-perfctr -C 0 -g ENERGY NOME_PROGRAMA
```

Carga de trabalho

Para medir o desempenho do computador (utilizando alguma métrica) precisamos de uma carga de trabalho.

Programas para testar.

Carga de trabalho

Mas qual(is) programa(s) executar?

Encontrar esses programas pode ser simples se temos:

- Usuários bem comportados que usam sempre o mesmo conjunto de programas.
- Computadores criados para tarefas específicas.

Mas se desejamos um conjunto representativo “universal” de tarefas para medir o desempenho, as coisas se complicam.

Carga de trabalho

Benchmarks são conjuntos de programas que possuem uma carga de trabalho considerada “típica”.

São comumente utilizados para dizer se o computador X é melhor do que Y.

Alguns exemplos de benchmarks.

- Desempenho de processadores utilizando um Benchmark proprietário: www.cpubenchmark.net
- Benchmarks SPEC: www.spec.org
- Benchmarks TPC: www.tpc.org

Benchmarks

Problemas de um benchmark?

Benchmarks

Problemas de um benchmark:

- O que é uma carga de trabalho “típica”.
 - Pior, o que é “típico” para um usuário, não é para outro.
- Engenheiros/Cientistas podem criar sistemas que são otimizados para os benchmarks, mas não necessariamente otimizados para o uso real do sistema.
 - Diga-me como me mede e eu te direi como te engano.

Clock

Processadores utilizam sinais de clock para sincronismo.

O sinal pode ser definido pelo seu:

Período -> Ex.: 1 ns

Frequência (F) -> Ex.: 1 GHz

Lembrando que $F = 1/T$.

Então temos duas novas formas de obter o CPU time:

CPU time = Número de ciclos utilizados pelo programa * período.

CPU time = Número de ciclos utilizados pelo programa / frequência.

Faça você mesmo

Considere um processador que utiliza um clock de 4GHz.

1. Qual o período do clock?
2. Considere que um programa utilizou 12×10^9 ciclos para ser executado na CPU. Qual o CPU time?

Contando instruções

Podemos contar quantas instruções foram executadas.

Instruction Count – IC.

Se também sabemos quantos ciclos de clock foram necessários, podemos facilmente obter o número médio de ciclos de clock necessários para cada instrução.

CPI: Clock Cycles per Instruction.

$CPI = \text{número total de ciclos de clock} / \text{total de instruções}.$

Faça você mesmo

Execute um programa qualquer com o Likwid, e meça o CPI.

No Likwid, os medidores de CPI geralmente estão em um grupo CLOCK.

Exemplo:

```
likwid-perfctr -C 0 -g CLOCK NOME_PROGRAMA
```

Contando instruções

Com o CPI, podemos calcular o CPU time como:

$\text{CPU time} = \text{total instruções} * \text{CPI} * \text{Período de clock.}$

Contando instruções

Com o CPI, podemos calcular o CPU time como:

$$\text{CPU time} = \text{total instruções} * \text{CPI} * \text{Período de clock.}$$

O CPU time de um programa pode ser melhorado por vários fatores distintos e diretamente dependentes da arquitetura da CPU. **Quais?**

Contando instruções

Com o CPI, podemos calcular o CPU time como:

$$\text{CPU time} = \text{total instruções} * \text{CPI} * \text{Período de clock.}$$

O CPU time de um programa pode ser melhorado por vários fatores distintos e diretamente dependentes da arquitetura da CPU. **Quais?**

A frequência de clock;

O formato das instruções.

Formatos diferentes podem requerer mais ou menos instruções para executar uma tarefa.

O número médio de ciclos de clock necessários para se executar uma instrução.

Uma CPU que sofre com muitos stalls vai aumentar o CPU time.

Exercício

1. Considere que você vai comparar duas CPUs, onde as informações das CPUs são dadas na tabela a seguir. Considere ainda que o CPI, e o número médio de instruções (quando o programa é compilado para a arquitetura da CPU A ou B) foram extraídos utilizando um benchmark. Baseado nessas informações, calcule o CPU time e indique qual CPU é melhor.

	CPU A	CPU B
Frequência (GHz)	4	5
CPI	2	3
Número médio de instruções em um programa.	26×10^8	22×10^8

Exercício

2. Considere o mesmo exercício anterior. Mas agora considere que o Fabricante da CPU A reportou que sua CPU consome 105 Watts quando usada em plena capacidade, enquanto a CPU B consome 97 Watts. Qual CPU é mais energeticamente eficiente considerando a carga de trabalho da tabela?

	CPU A	CPU B
Frequência (GHz)	4	5
CPI	2	3
Número médio de instruções em um programa.	26×10^8	22×10^8

Licença

Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).