

# Engenharia de Computadores



**Prof. Alberto Cunha**

[alberto.cunha@tecnico.ulisboa.pt](mailto:alberto.cunha@tecnico.ulisboa.pt)



**Prof. Nuno Roma**

[nuno.roma@inesc-id.pt](mailto:nuno.roma@inesc-id.pt)



# Enquadramento de Engenharia de Computadores

A Engenharia de Computadores é um dos 5 grandes perfis definidos nas recomendações curriculares do ACM<sup>1</sup> e do IEEE<sup>2</sup>:

- *Computer Science*
- ***Computer Engineering***
- *Information Systems*
- *Information Technology*
- *Software Engineering*

“A Engenharia de Computadores é a disciplina que incorpora a ciência e tecnologia de concepção, construção, implementação e manutenção de software e componentes de hardware de sistemas de computação modernos e equipamentos controlados por computador.”



<sup>1</sup>Association for Computing Machinery

<sup>2</sup>Institute for Electrical and Electronics Engineers



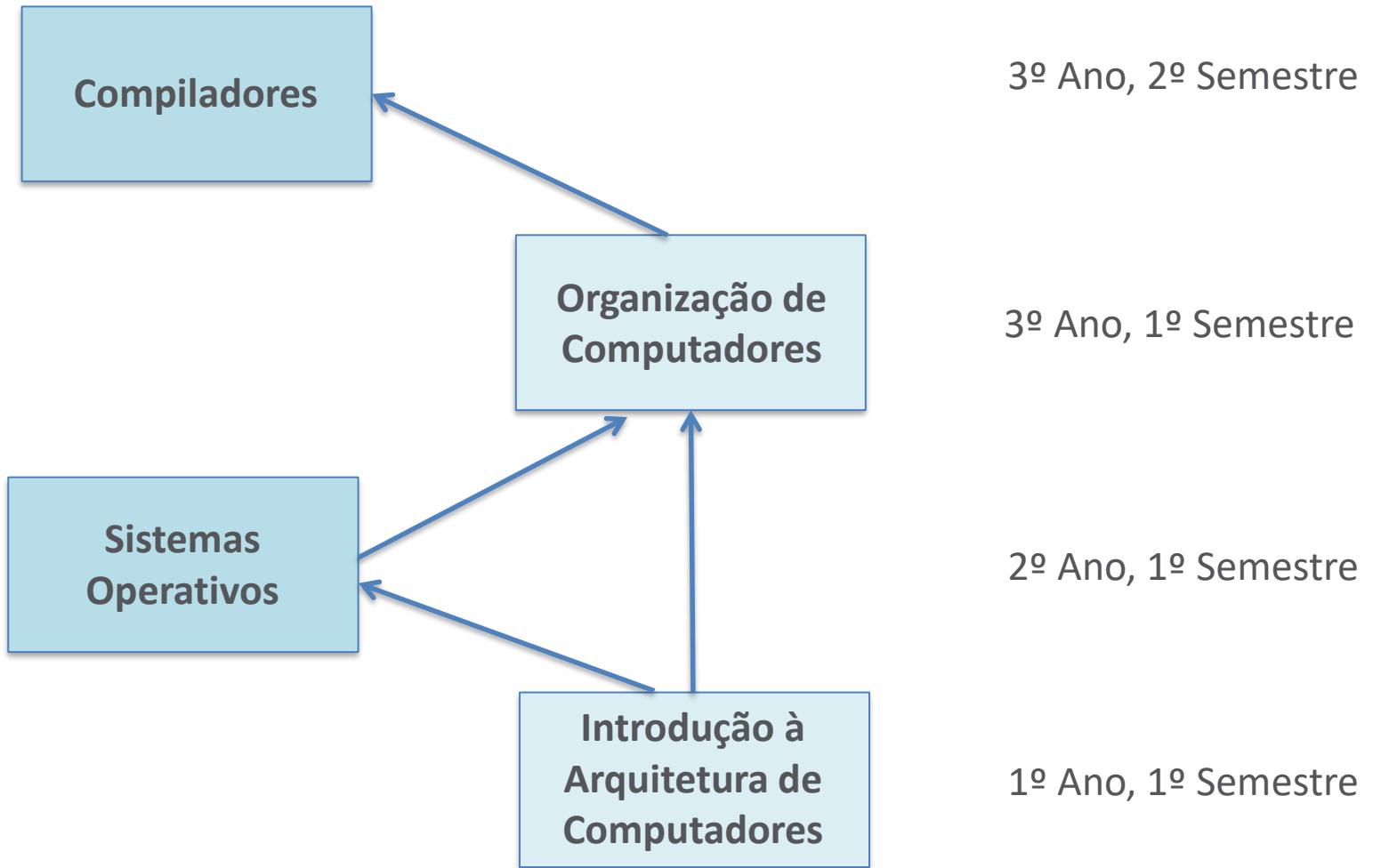


# Responsabilidade Científica

- Departamento de Engenharia Informática (DEI)
  - Arquitetura e Sistemas Operativos
- Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (DEEC)
  - Computadores



# Engenharia de Computadores na LEIC





# Engenharia de Computadores no MEIC

Especialização do MEIC em

## Sistemas Computacionais

- Aplicações para Sistemas Embebidos
- Ambientes Inteligentes
- Computação Paralela e Distribuída
- Arquiteturas de Alto Desempenho
- Processamento Digital de Sinais
- Projeto de Sistemas Digitais
- Co-projeto Hardware/Software
- Redes de Sensores



# Sumário

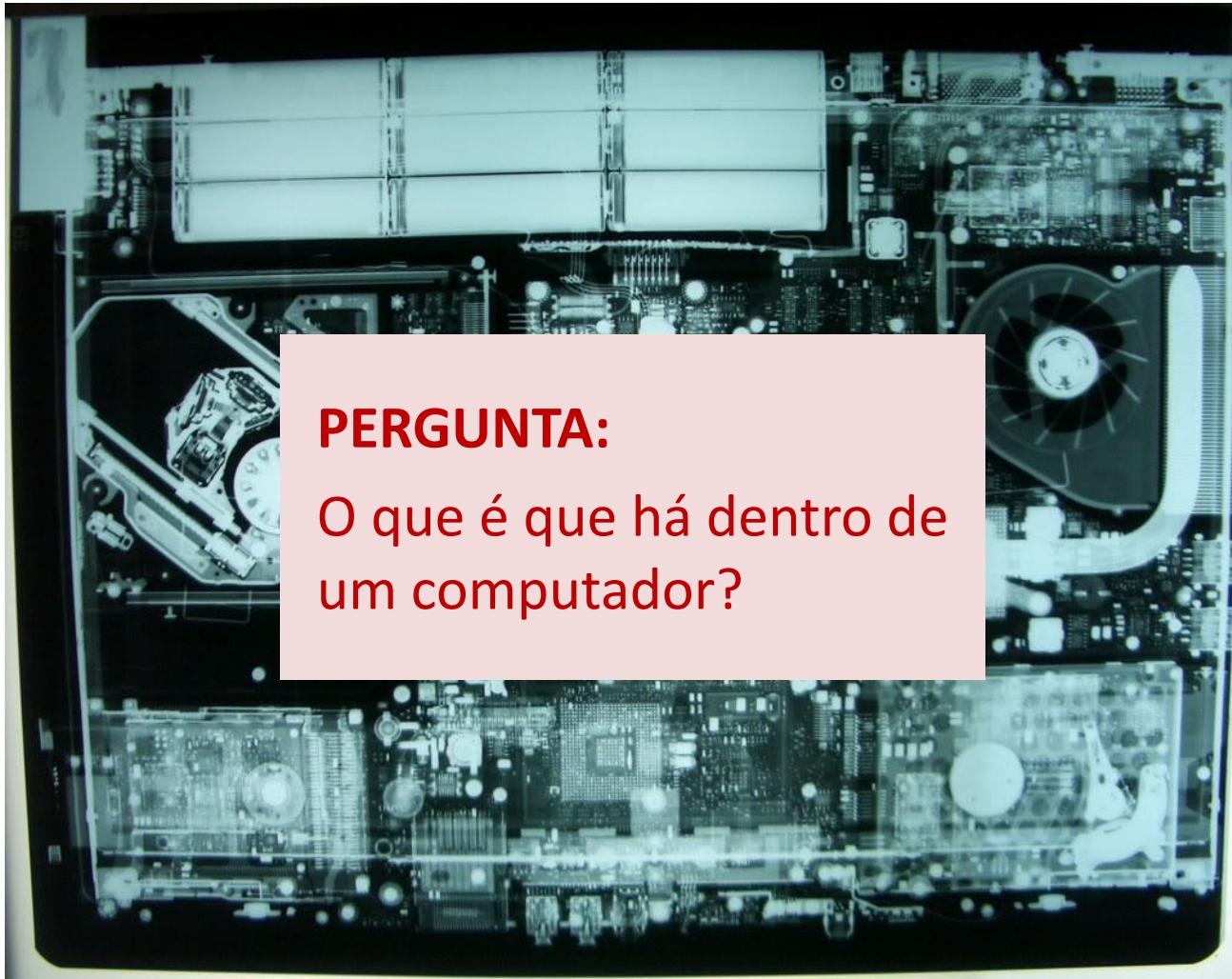
- I. Arquitetura de um computador
- II. Computação de elevado desempenho
- III. Sistemas embebidos
- IV. “Internet das coisas” / Sistemas Ciber-Físicos



# ARQUITETURA DE UM COMPUTADOR

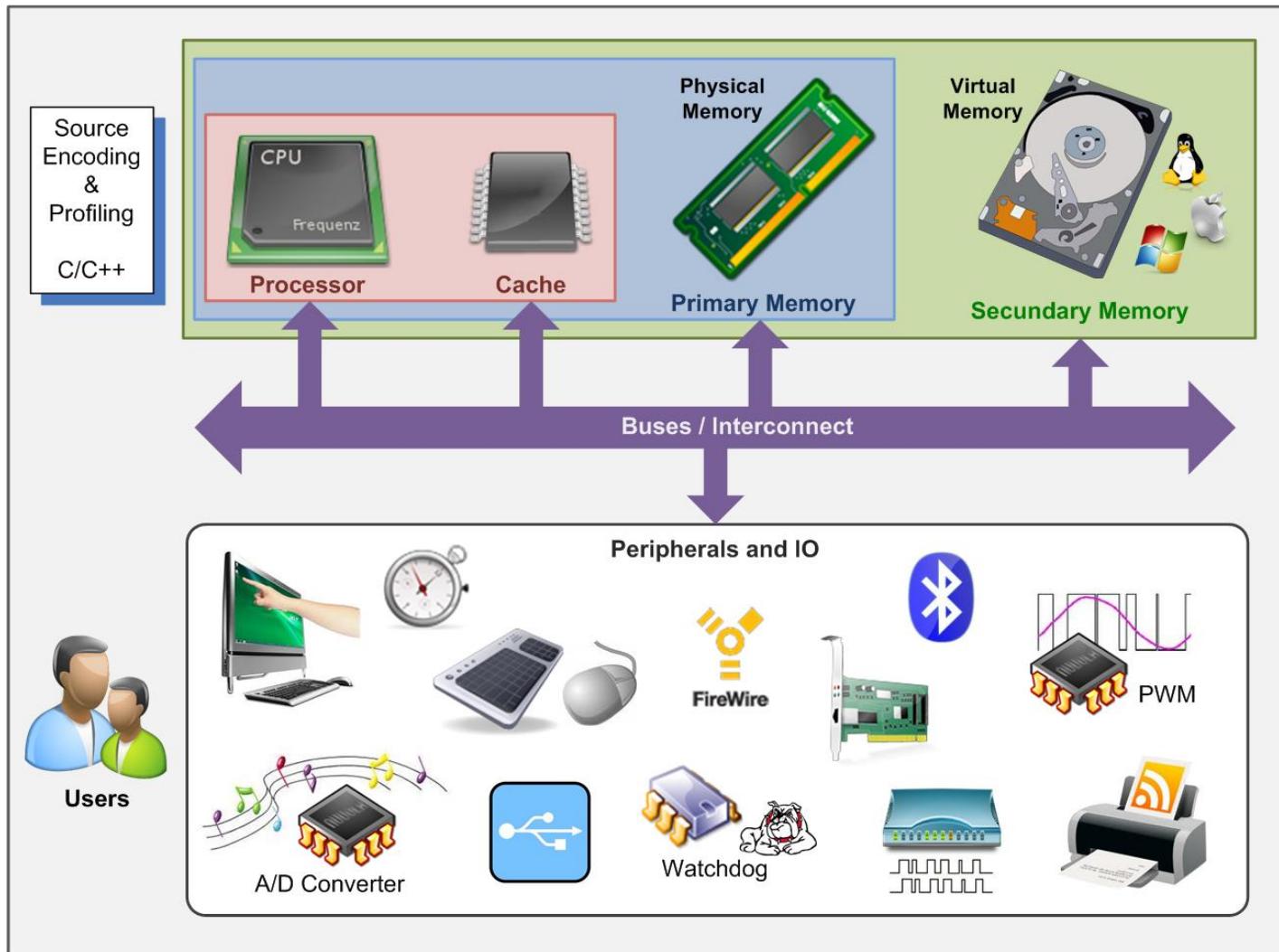


# De que é feito um computador ?



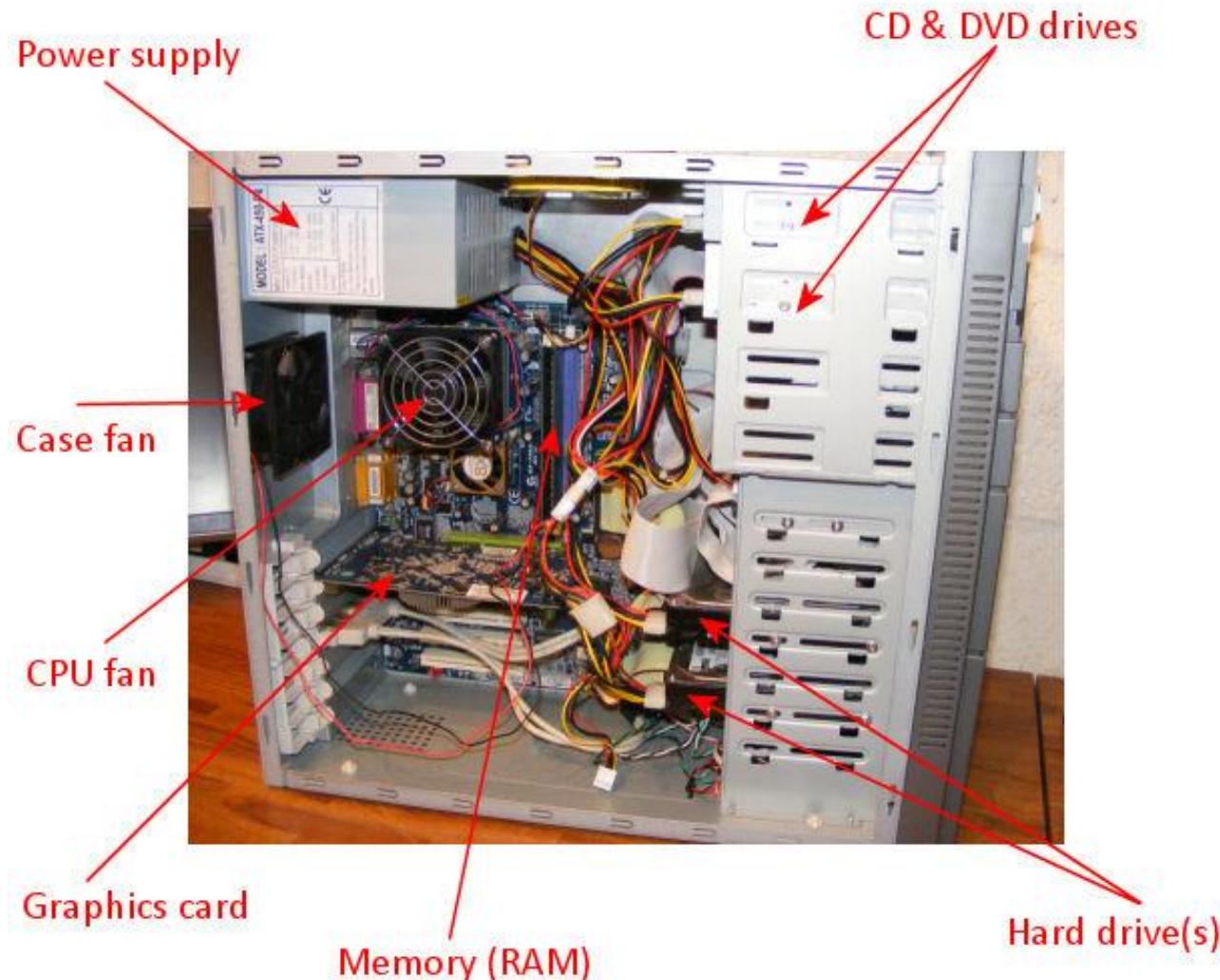


# Arquitetura de um Computador





# Arquitetura de um Computador





# Níveis de Código de Programa

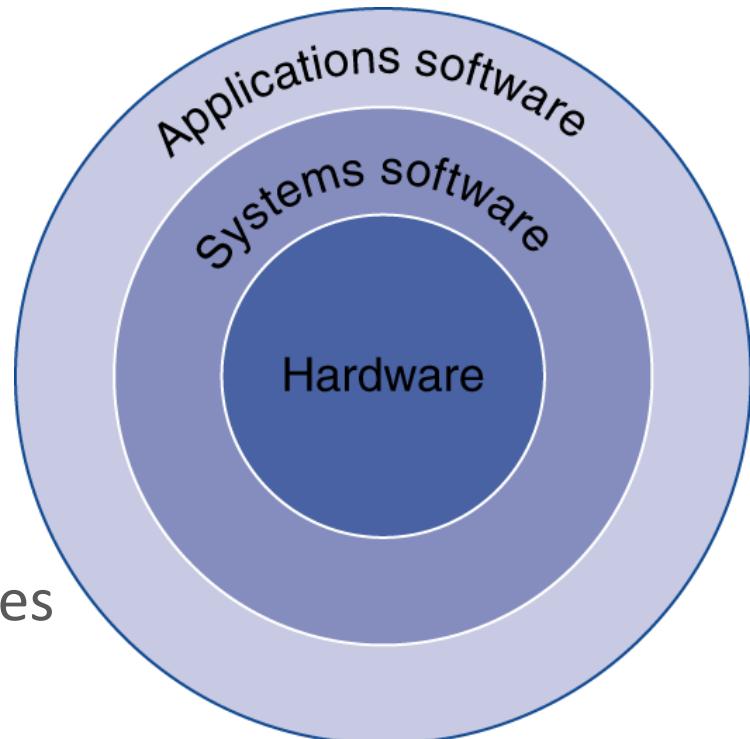
- Linguagem de Alto Nível
  - Nível de abstração próximo do domínio do problema
  - Permite portabilidade e aumenta produtividade
- Linguagem Assembly
  - Representação textual das instruções
- Linguagem Máquina
  - Código binário
  - Codificação de instruções e dados

High-level  
language  
program  
(in C)

```
swap(int v[], int k)
{int temp;
 temp = v[k];
 v[k] = v[k+1];
 v[k+1] = temp;
}
```

# Debaixo de um Programa

- Aplicações
  - Escritas em linguagem de alto-nível
- Software de Sistema
  - Compilador: traduz código para linguagem máquina
  - Sistema Operativo:
    - Faz interface com entradas/saídas
    - Gere memória e disco
    - Agenda tarefas e partilha recursos
- Hardware
  - Processador, memória, controladores entrada/saída





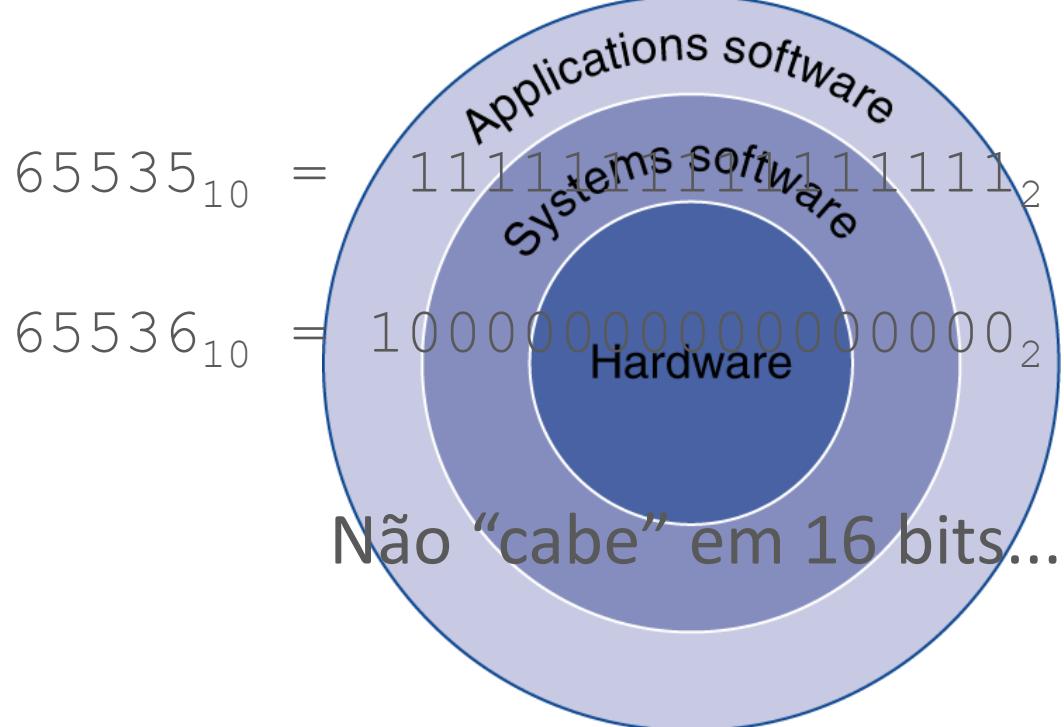
# Debaixo do Teu Programa

- Aplicações
  - Escritas em linguagem de alto-nível

No entanto:

```
var = 65535  
var = var + 1  
print var
```

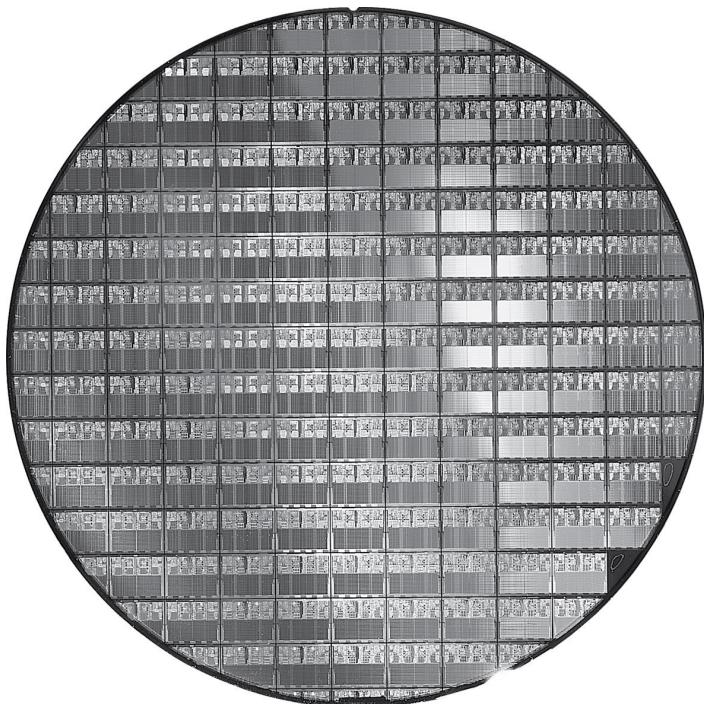
Qual é o resultado?  
Em alguns casos, **0!**





# Evolução Tecnológica

- A densidade de transístores aumenta ~35% por ano.
- A área dos circuitos aumenta de 10% a 20% por ano.
  - Transístores por circuito aumentam ~55% por ano.



## Lei de Moore (1965):

“O número de transístores por  $\text{cm}^2$  de um circuito integrado duplica a cada 18 meses.”

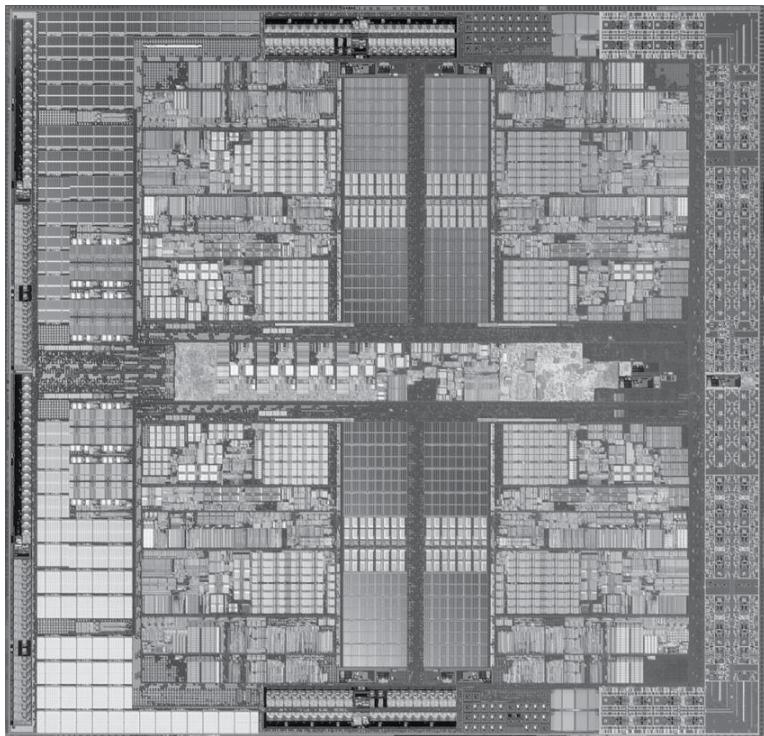
- Na prática, a densidade aumentou cerca de 100.000x nos últimos 50 anos!



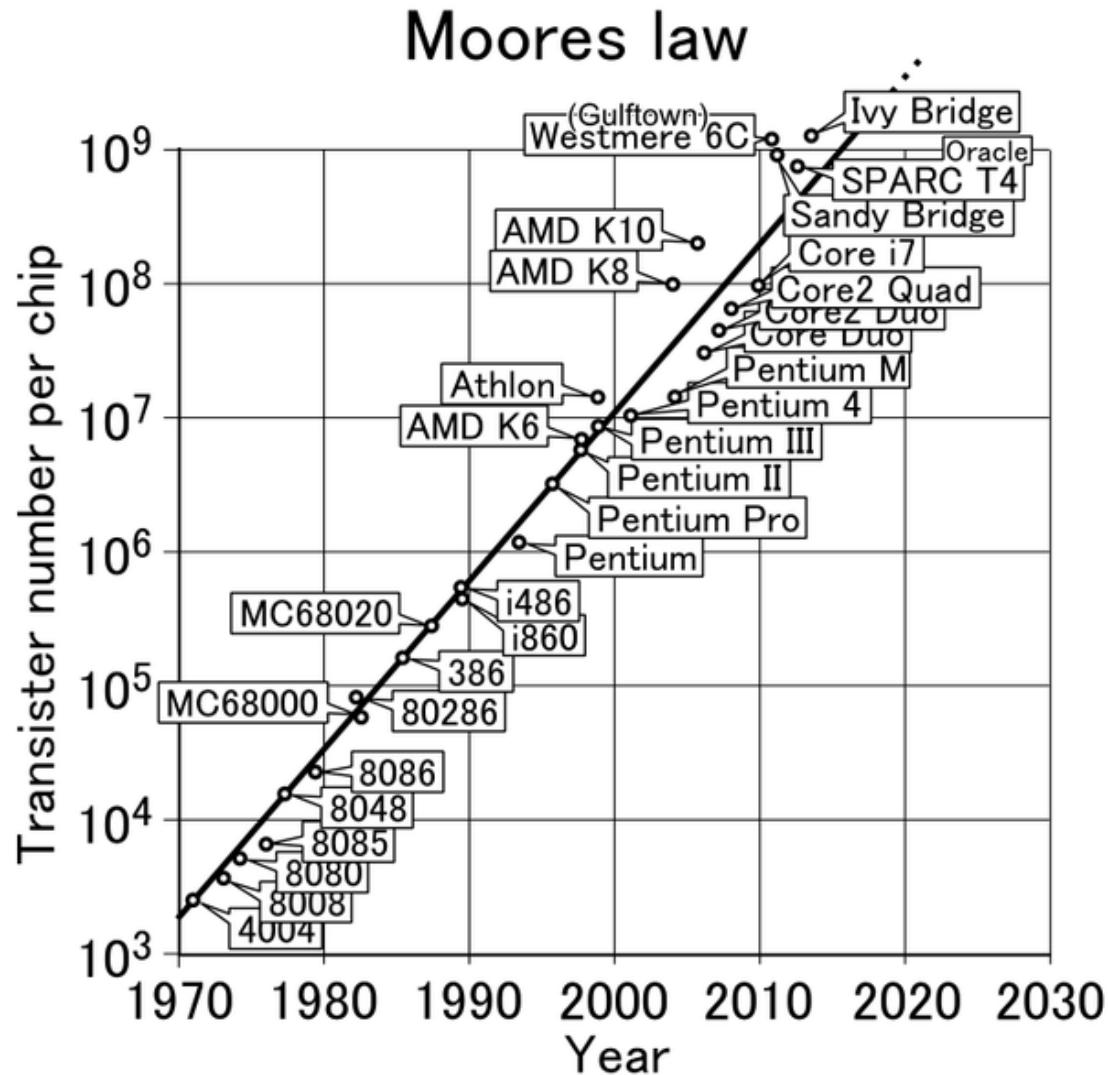
# Dentro do Processador

AMD Opteron:

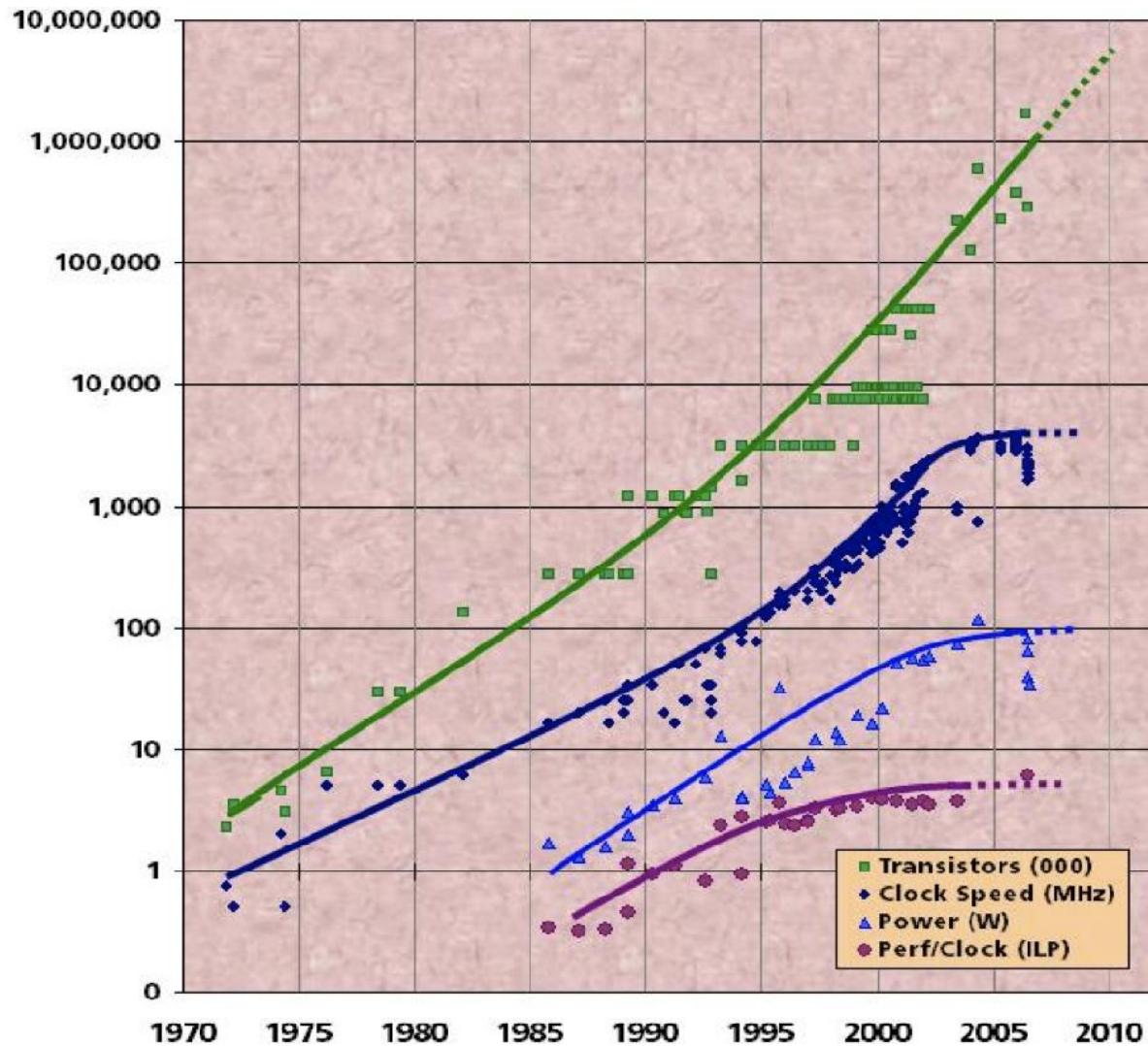
4 cores,  $0.5 \times 10^9$  transístores



# A Lei de Moore em Prática



# Tendências Tecnológicas





# Densidade de Potência





# Analogia Vendedor de Carros

“Vejam! O carro!”, diz o vendedor de carros.  
“Alcança 30 km/h!”

“Oh,”, diz o consumidor, “isso é fantástico! Posso transportar mercadoria muito mais depressa que antes, e não tenho que andar a limpar bosta de cavalo. Quero um!”

O tempo passa.

“Vejam!”, diz de novo o vendedor de carros. “Um carro de 60 km/h!”

“Boa!”, diz o consumidor. “Dá muito jeito. A 30 km/h demoro o dia inteiro para chegar à cidade. Isto vai simplificar muito a minha vida. Venha de lá esse carro!”

O tempo passa outra vez.

“Vejam!”, diz quem-vocês-sabem. “Um carro de 120 km/h!”

“Preciso de um desses! Assim posso ir visitar a minha Tia Anita à terra dela, e não tenho que lá dormir com os seus 42 gatos. Muito útil. Eu compro!”

Mais algum tempo.

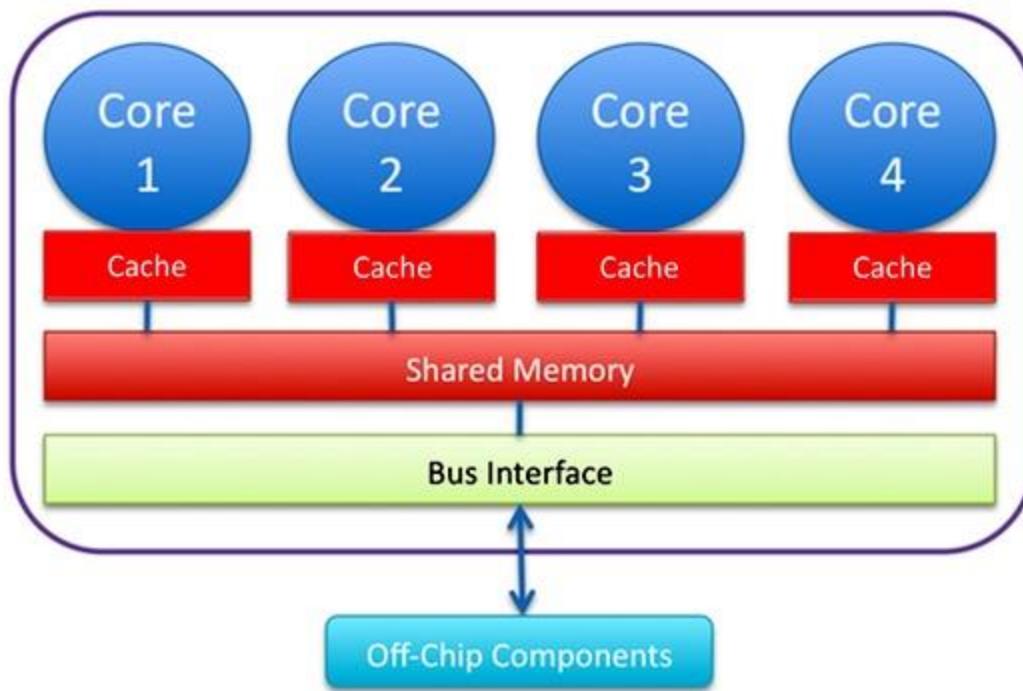
“Vejam!”, diz ele, “Dois carros de 100 km/h!”

“Como?!”



(adaptado de <http://perilsofparallel.blogspot.com>)

- Arquitetura deixa de estar escondida nos novos processadores multicore:
  - Programas paralelos
  - Programação eficiente requer conhecimento destas arquiteturas





# COMPUTAÇÃO DE ELEVADO DESEMPENHO



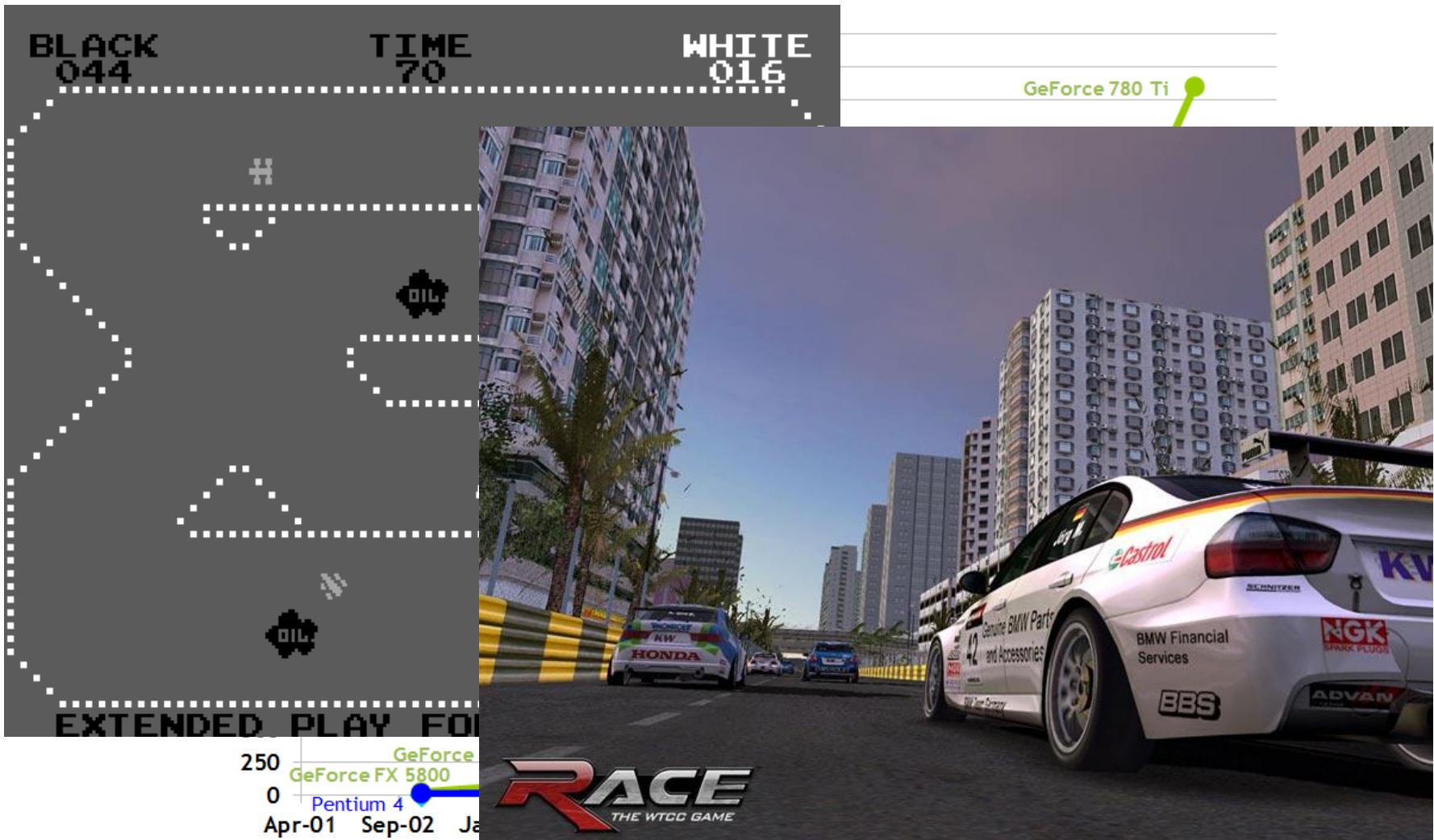
# Programação de Arquiteturas Especializadas

- Por vezes (ex., sistemas móveis) o desempenho em termos do consumo de energia é mais importante do que a rapidez de processamento
- Novas/futuras arquiteturas *exóticas*
  - Processadores reconfiguráveis
  - Programação de GPUs para aplicações gerais



# Qual é o processador mais rápido no teu computador?

Theoretical GFLOP/s





# Graphics Processing Unit (GPU)



# Qual é o processador mais rápido no teu computador?





# Super-Computadores

Formados por grandes agregados de computadores:





# Super-Computadores

Servidores:





# Super-Computadores

Formados por grandes agregados de computadores:





# Super-Computadores



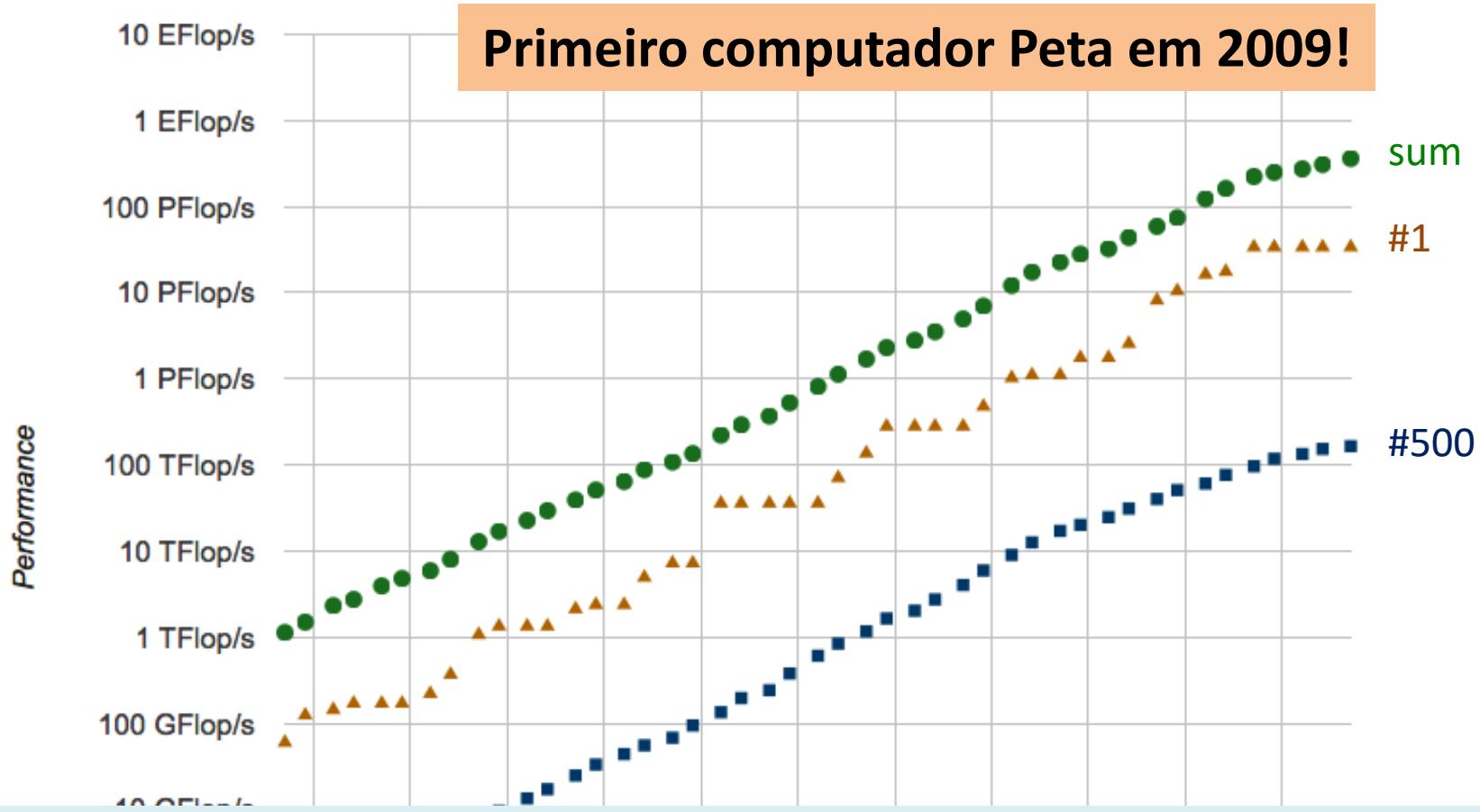
Sunway TaihuLight

National Supercomputer Center in Wuxi, China

Atualmente o computador mais potente do mundo ([top500.org](http://top500.org))  
(11,000,000 cores, 93 petaflop/s).



# Lei de Moore nos Supercomputadores



Estimativa do poder computacional do cérebro:  
 $10^{14}$  ligações neurais 200 cálculos por segundo  
⇒ 20 PFLOPS



# TOP 10 – Supercomputadores (Junho de 2017)

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
2	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P NUDT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
3	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100 Cray Inc.	361,760	19,590.0	25,326.3	2,272
4	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
5	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
6	DOE/SC/LBNL/NERSC United States	Cori - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939
7	Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	Oakforest-PACS - PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Intel Omni-Path Fujitsu	556,104	13,554.6	24,913.5	2,719
8	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 Vllfx 2.0GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660
9	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
10	DOE/NNSA/LANL/SNL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Aries interconnect Cray Inc.	301,056	8,100.9	11,078.9	4,233



# SISTEMAS EMBEBIDOS



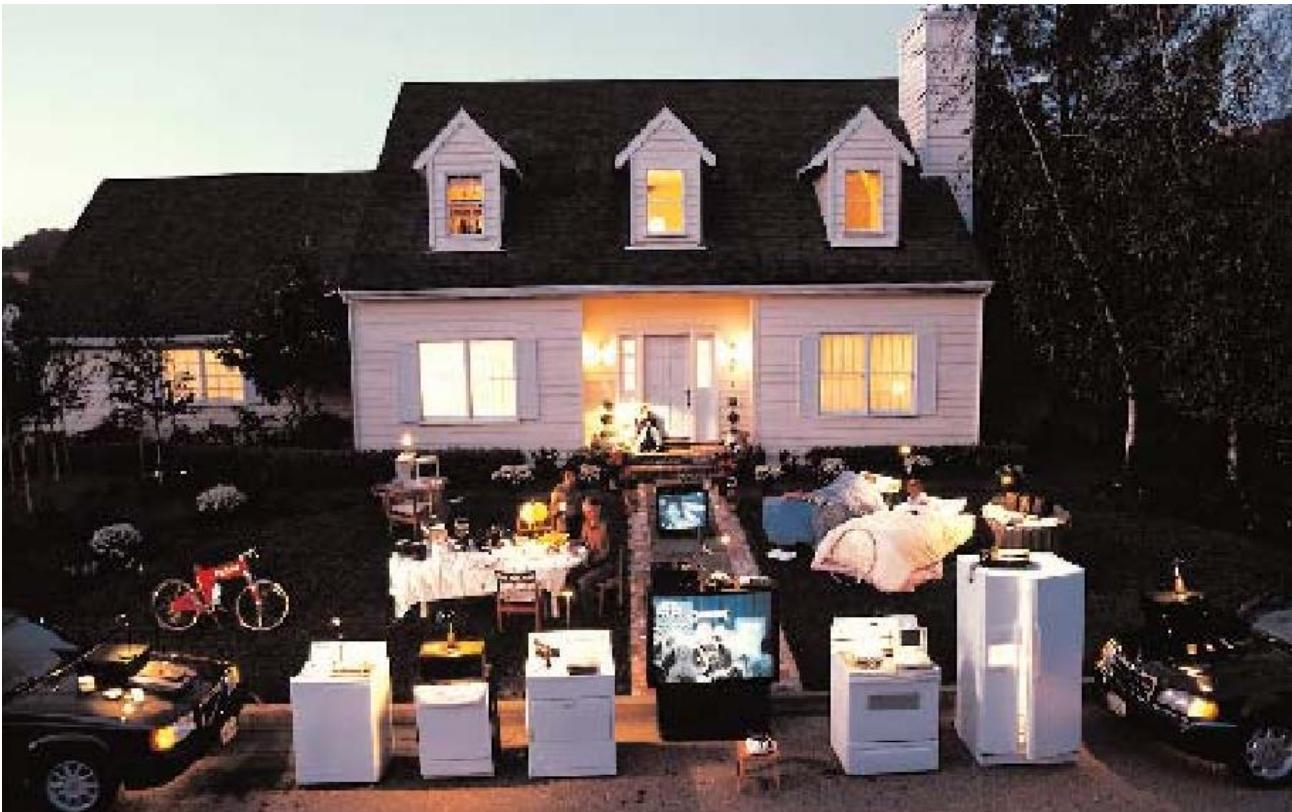
# Sistema Embebido

**Sistema Embebido:**  
Computador dentro  
de um produto

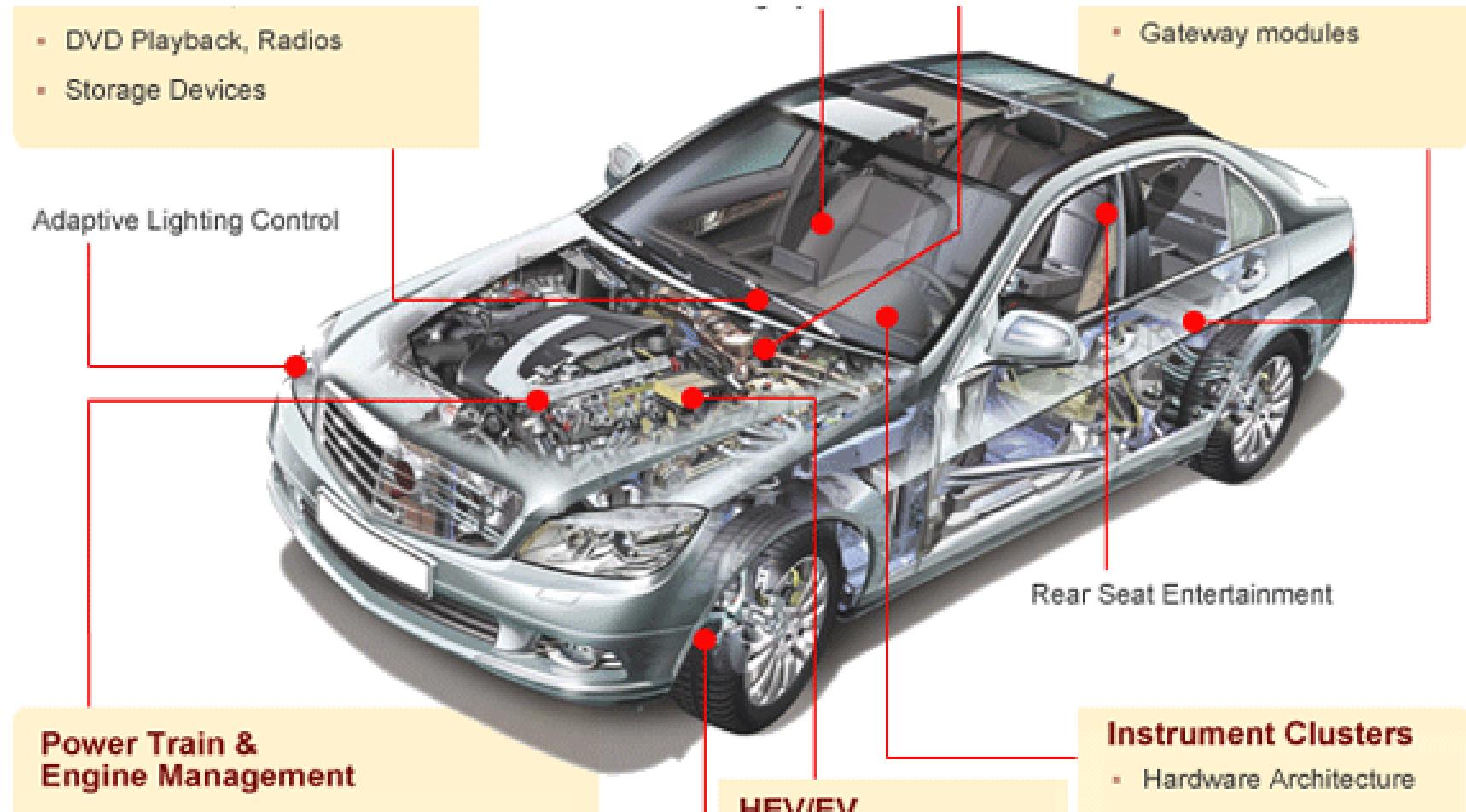


# Os “pequenos” computadores dominam o mercado

- Todos estes aparelhos tem um computador!!!  
Mas... onde estão os Intel Core i7's?



# Exemplo: Indústria Automóvel





# Dentro dos seus bolsos



**Em media, cada pessoa na Terra tem mais do que 3 dispositivos embebidos!!!**





# Domínios de Aplicação

- Eletrónica de consumo
- Periféricos de computador
- Equipamento de rede
- Sistemas sem fios
- PCs embebidos
- Computadores móveis

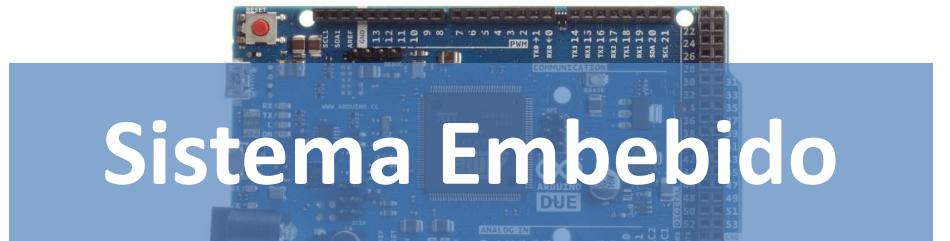


- Pequenos computadores embebidos
- Sistemas de controlo
- Robótica
- Processamento de sinais





# Restrições de Aplicação



Restrições

O desenvolvimento tem de ter em conta as especificidades particulares do produto

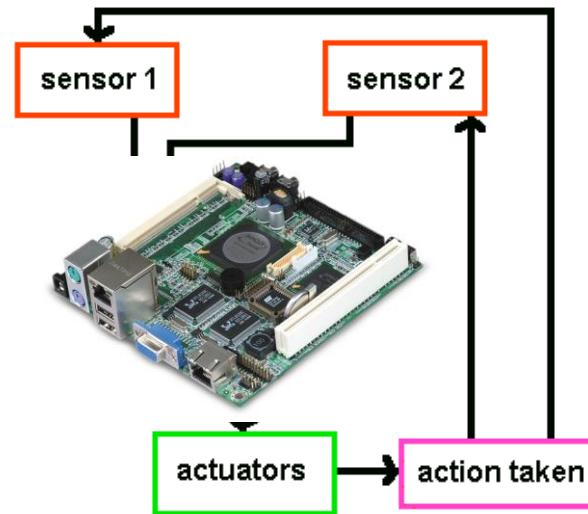
# Restrições de Aplicação

- Interface variado com o meio
  - Sensores, atuadores, interface com o utilizador
- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos
- Funcionamento remoto
  - Manutenção dispendiosa, difícil ou impossível
- Seguro
  - Tem de funcionar sempre bem
- Ambiente hostil
  - Calor, vibrações, choques
- Pequeno & leve
  - Eletrónica portátil
- Baixo consumo
  - Alimentado a baterias
- Baixo custo
  - Requisito mais importante!!!



# Restrições de Aplicação

- Interface variado com o meio
  - Vários sensores (entradas) e atuadores (saídas)



- O processador implementa uma malha de controlo fechada para garantir o funcionamento correto

- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos





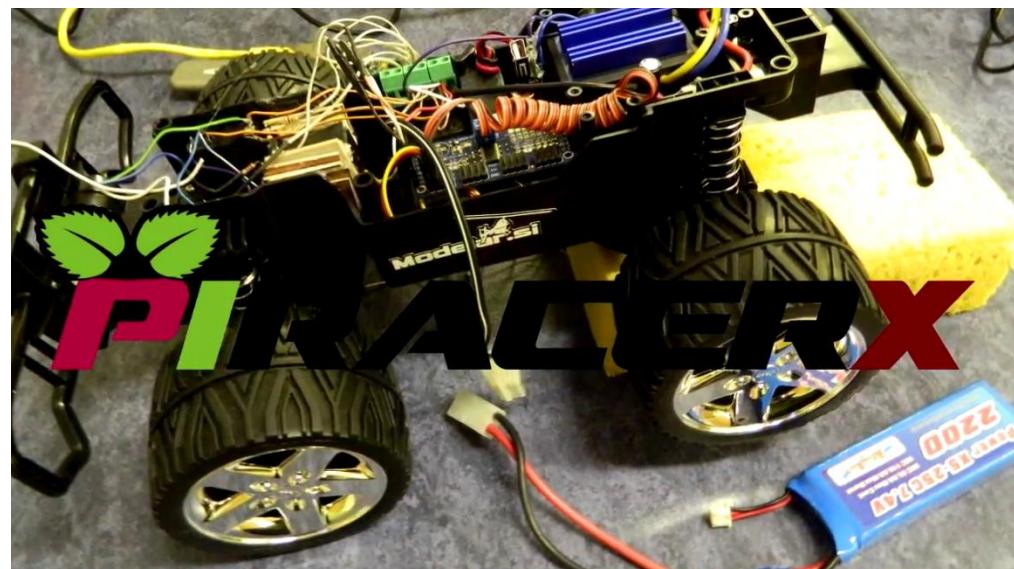
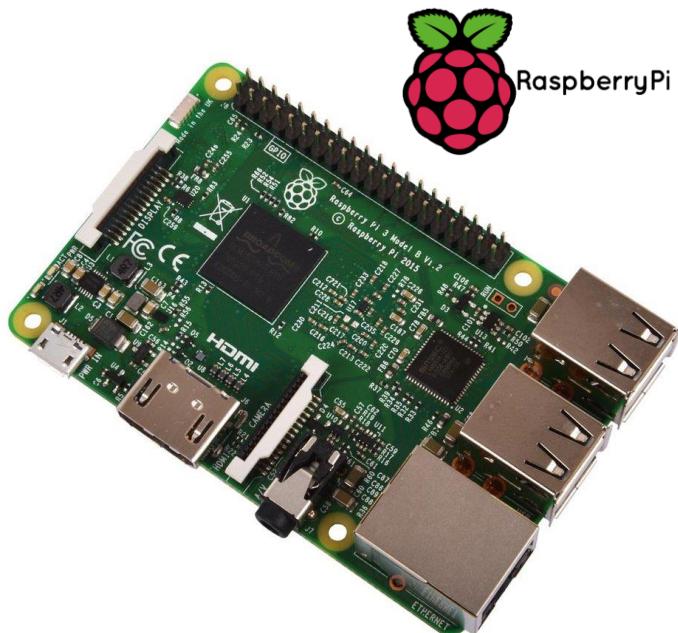
# Restrições de Aplicação

- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos



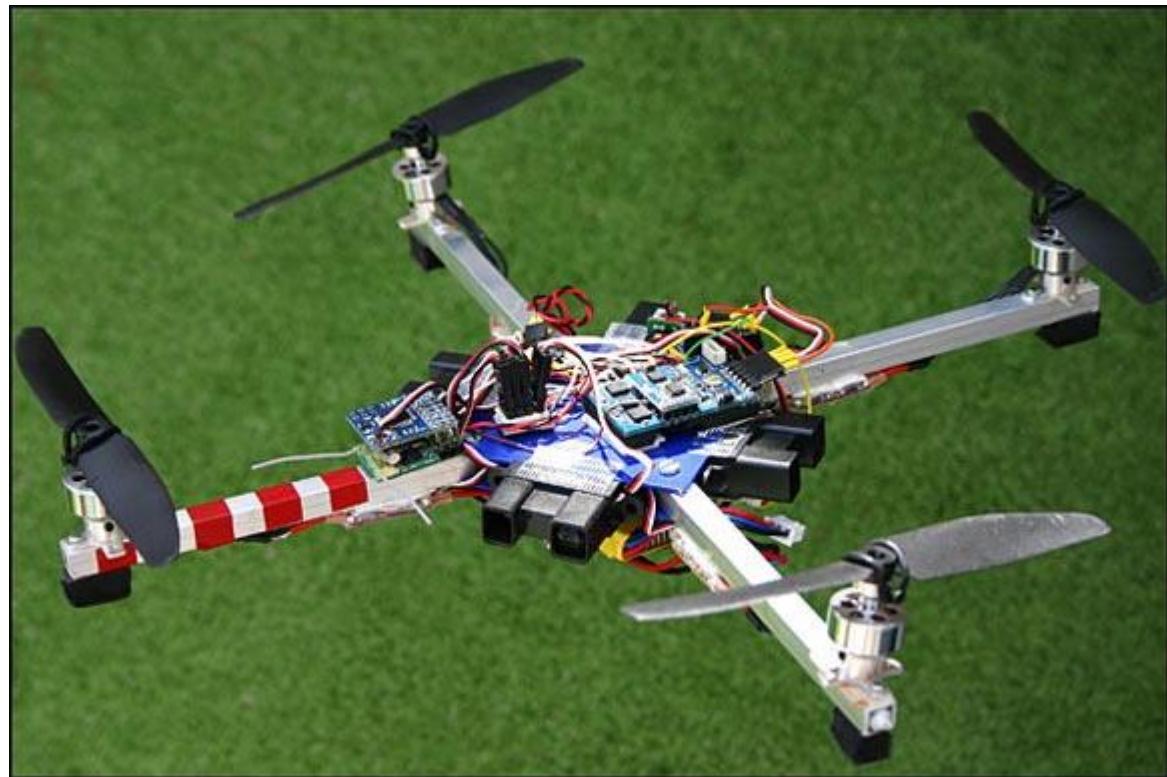
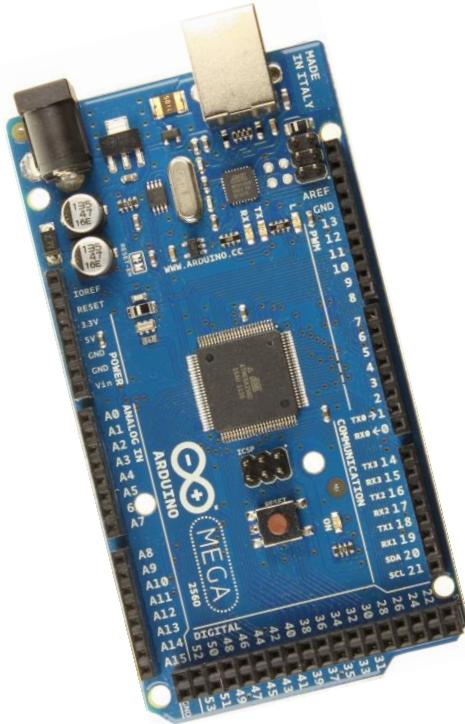
# Restrições de Aplicação

- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos



# Restrições de Aplicação

- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos



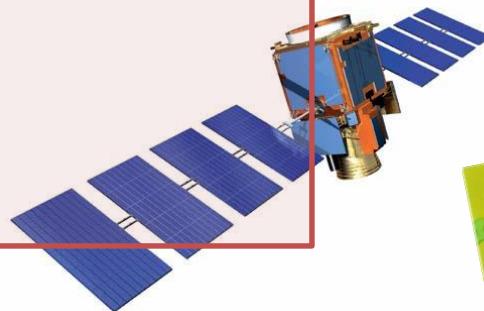
# Restrições de Aplicação

- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos



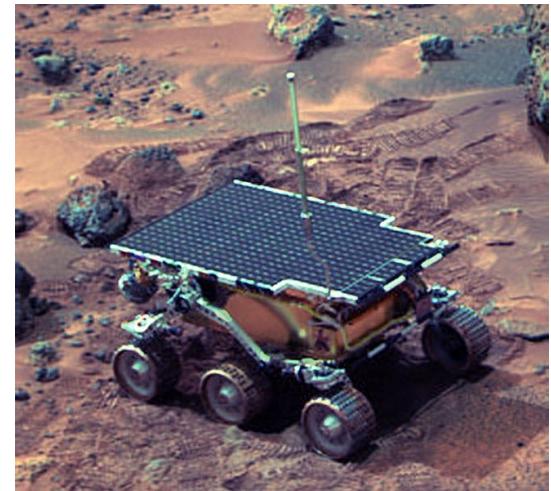
# Restrições de Aplicação

- Interface variado com o meio
  - Sensores, atuadores, interface com o utilizador
- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos
- Funcionamento remoto
  - Manutenção dispendiosa, difícil ou impossível
- Seguro
  - Tem de funcionar sempre bem
- Ambiente hostil
  - Calor, vibrações, choques
- Pequeno & leve
  - Eletrónica portátil
- Baixo consumo
  - Alimentado a baterias
- Baixo custo
  - Requisito mais importante!!!



# Restrições de Aplicação

- Funcionamento remoto
  - Manutenção difícil ou impossível
  - Custos de manutenção elevados





# Restrições de Aplicação

- Seguro
  - Tem de funcionar corretamente sempre!!!



# Restrições de Aplicação

- Interface variado com o meio
  - Sensores, atuadores, interface com o utilizador
- Operação em tempo real
  - Tem de satisfazer requisitos temporais bem definidos
- Funcionamento remoto
  - Manutenção dispendiosa, difícil ou impossível
- Seguro
  - Tem de funcionar sempre bem
- Ambiente hostil
  - Calor, vibrações, choques
- Pequeno & leve
  - Eletrónica portátil
- Baixo consumo
  - Alimentado a baterias
- Baixo custo
  - Requisito mais importante!!!





# Restrições de Aplicação

- Pequeno, Leve, Baixo Consumo, BARATO, ...





# Desenvolvimento

- Programação de um Sistema Embestado:
  - Será que se programa da mesma forma que um computador desktop/servidor convencional?



- Programação de um Sistema Embebido:
  - Programadores têm de ter em consideração as restrições subjacentes ao hardware que irá executar o programa:
    - Processador
    - Memória disponível
    - Consumo energético, etc.
  - Os programas têm de ser adaptados ao dispositivo a que se destinam:
    - Sistema operativo
    - Device Drivers
    - Interface com o utilizador
    - Periféricos & IO (sensores, atuadores,etc.)





# O que faz um engenheiro de computadores?



Plataformas?



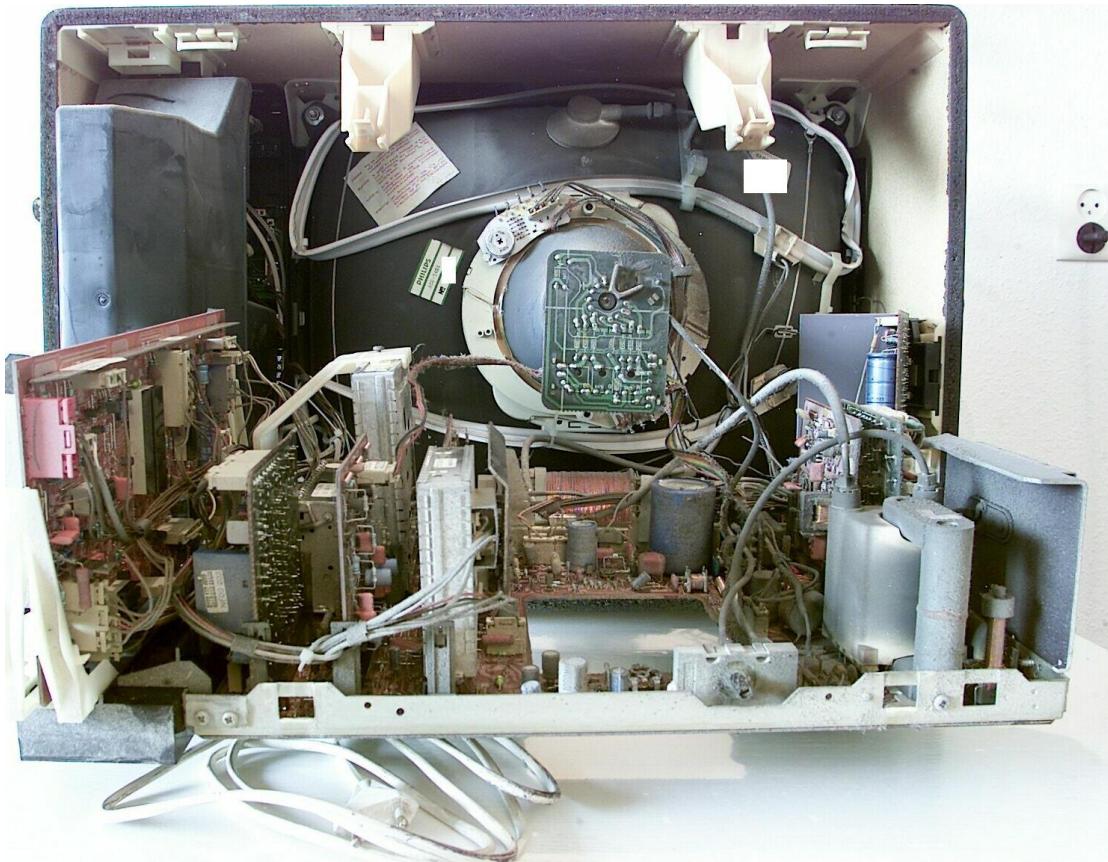
Linguagens de  
Programação?





# Última revolução tecnológica

- Cerca de 20 anos atrás...





# Última revolução tecnológica

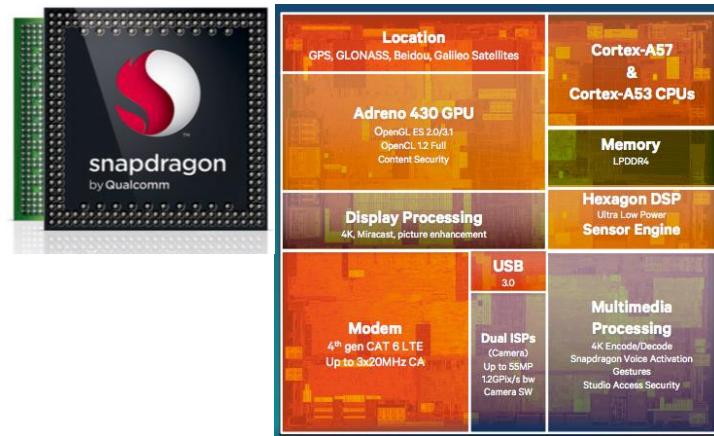
- Hoje:  
... "ver filmes" é somente apenas mais uma das várias formas de utilizar um televisor!!!



TV = Computador?



# Qual processador?

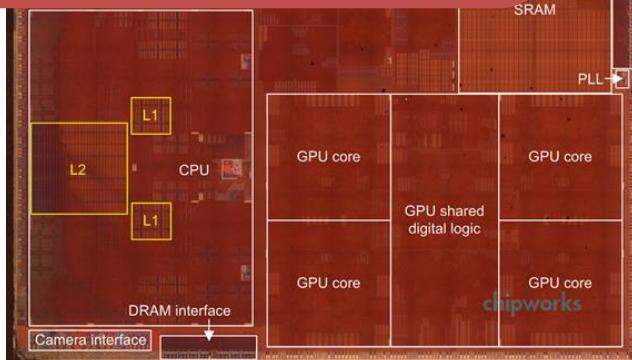


Muitos dispositivos embebidos dispõem de um processador com vários núcleos e já incluem uma GPU!!!

Leading MRQ Suppliers (2012)						
2012 Rank	Company	2011	2012	Percent Change	Percent Marketshare	Main Product Lines
1	Intel	37,435	36,892	-1%	65.3%	x86 PC, server MPUs
2	Qualcomm	4,152	5,322	28%	9.4%	ARM mobile app processors
3	Samsung (+Apple)*	2,614	4,664	78%	8.2%	ARM mobile app processors
4	AMD	4,552	3,605	-21%	6.4%	x86 PC, server MPUs
5	Freescale	1,210	1,070	-12%	1.9%	ARM and embedded MPUs
6	Nvidia	591	764	29%	1.4%	ARM mobile app processors
7	TI	510	565	11%	1.0%	ARM mobile app processors
8	ST-Ericsson**	660	540	-18%	1.0%	ARM mobile app processors
9	Broadcom	295	345	17%	0.6%	ARM mobile app processors
10	MediaTek	280	325	16%	0.6%	ARM mobile app processors

Source: IC Insights

\*Includes Apple's custom processors made by Samsung's foundry business.  
\*\*Cellphone IC joint venture to be dissolved by STMicroelectronics and Ericsson by 3Q13.

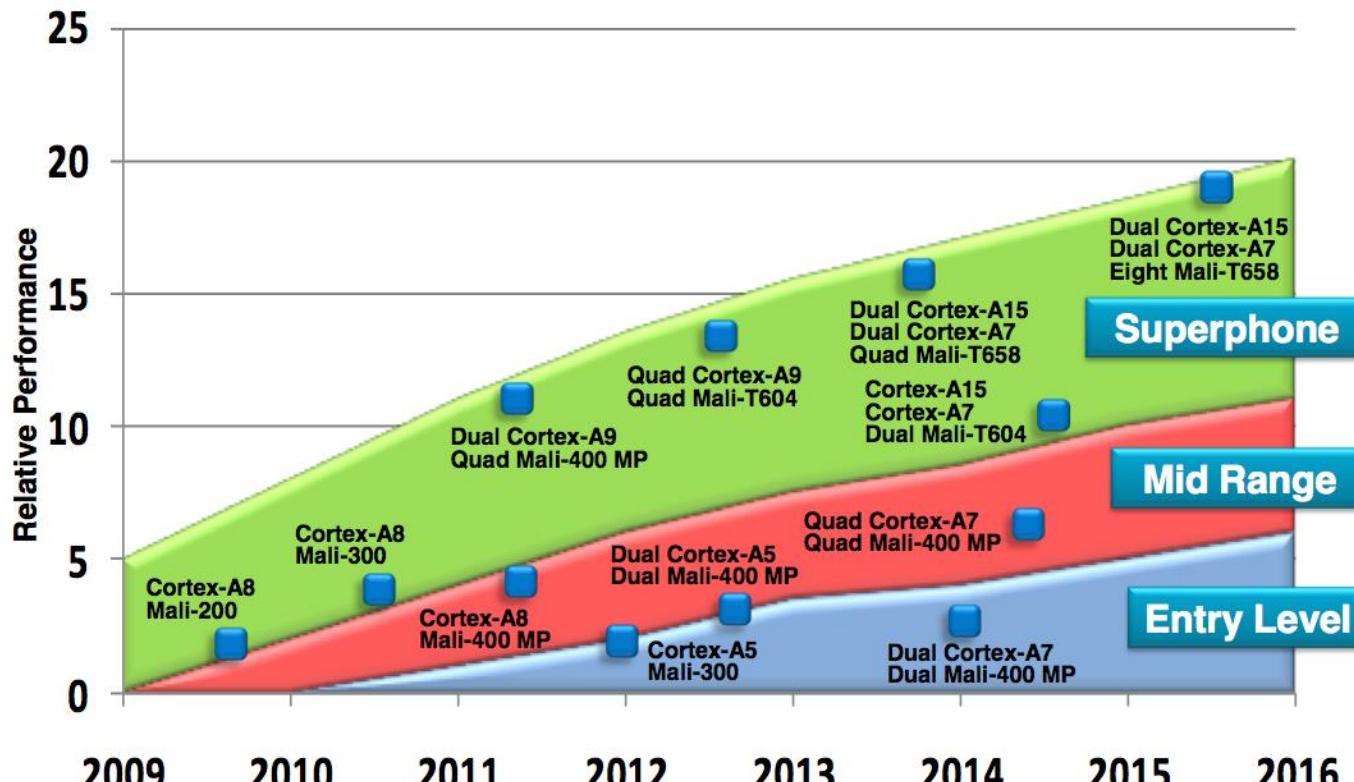


Apple A7: ARMv8-A (with custom Apple extensions) by Samsung on 28nm process (as featured in iPhone 5S)



# Qual processador?

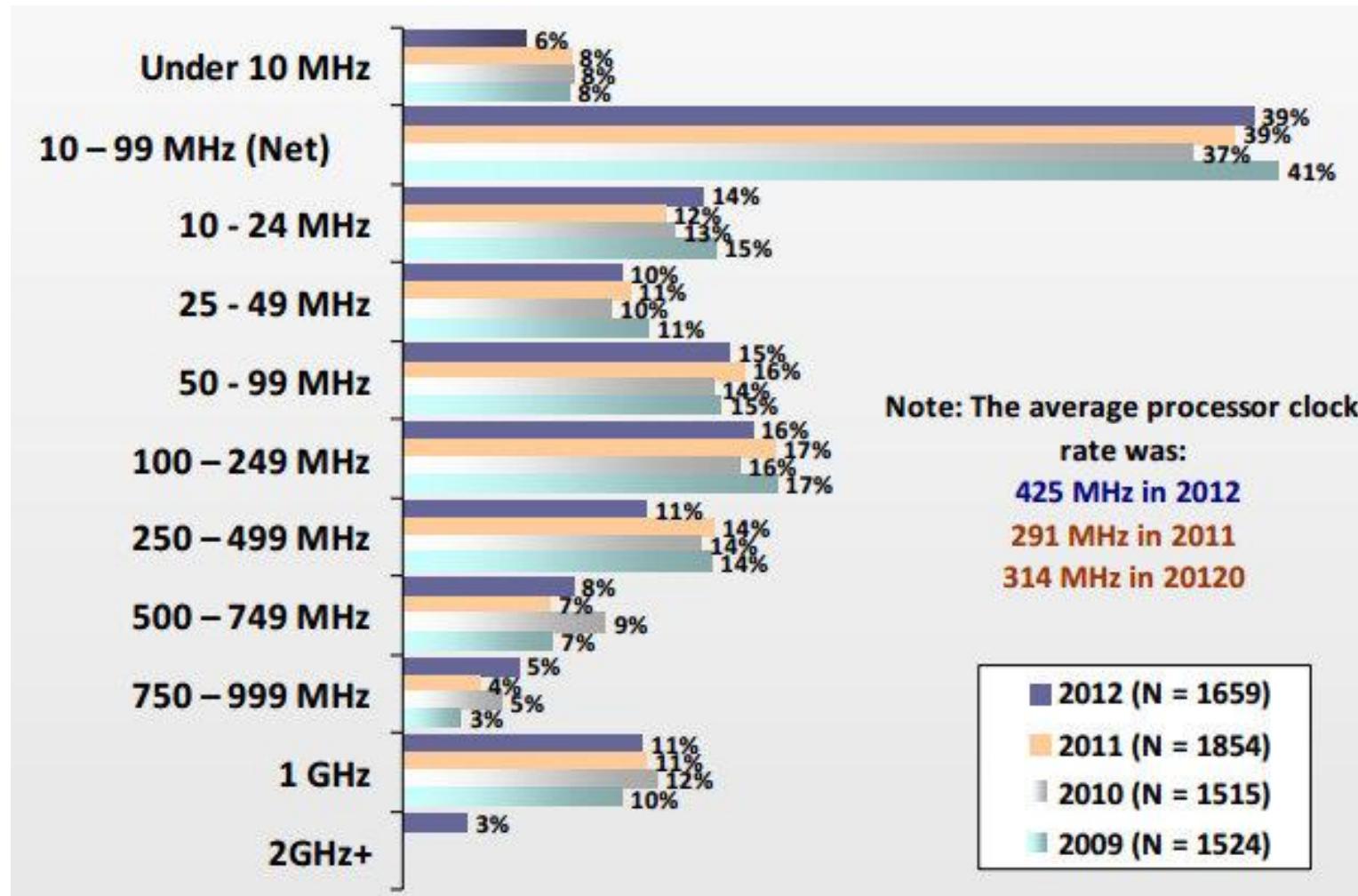
## Scalable Mobile Processor Evolution



Bringing Visual Computing to Life

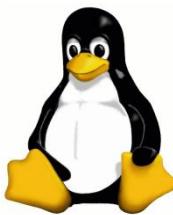


# Frequência de Funcionamento



# Sistemas operativos embebidos?

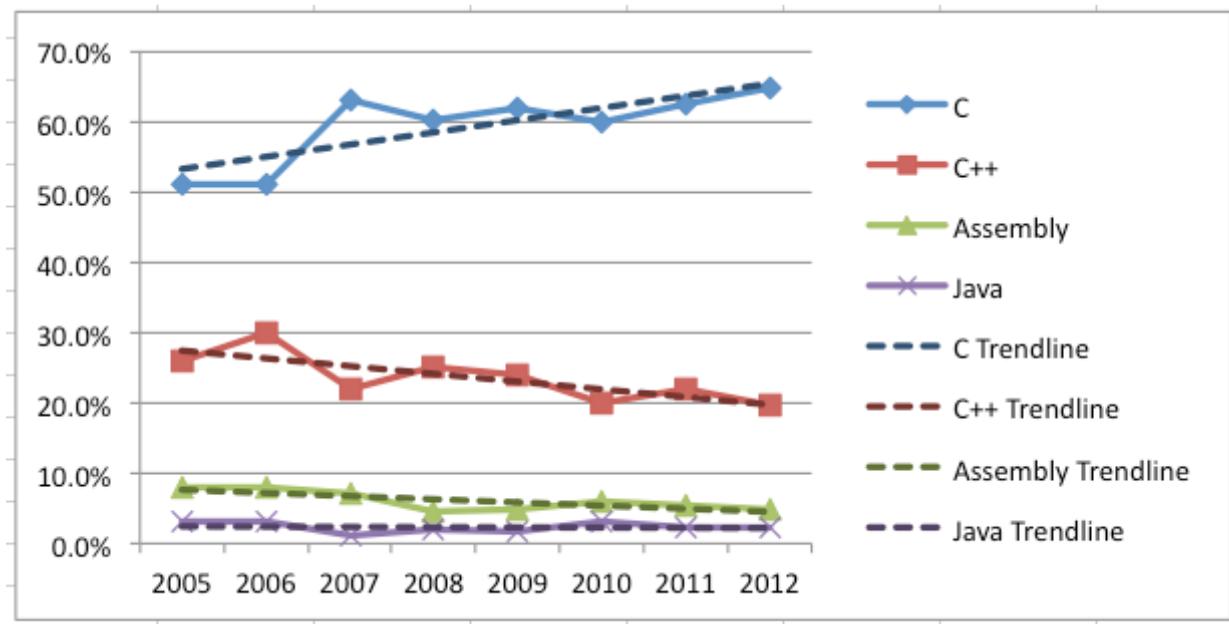
- Sistema operativo
  - Adoção generalizada de um Sistema Operativo completo e totalmente estruturado nos sistemas embebidos correntes



Gradualmente, os programadores passaram a ocupar uma posição preponderante no desenvolvimento de sistemas embebidos

- Programação de sistemas embebidos

The four languages most often reported as the primary language for embedded projects for the years 2005 to 2012, along with linear trendlines.





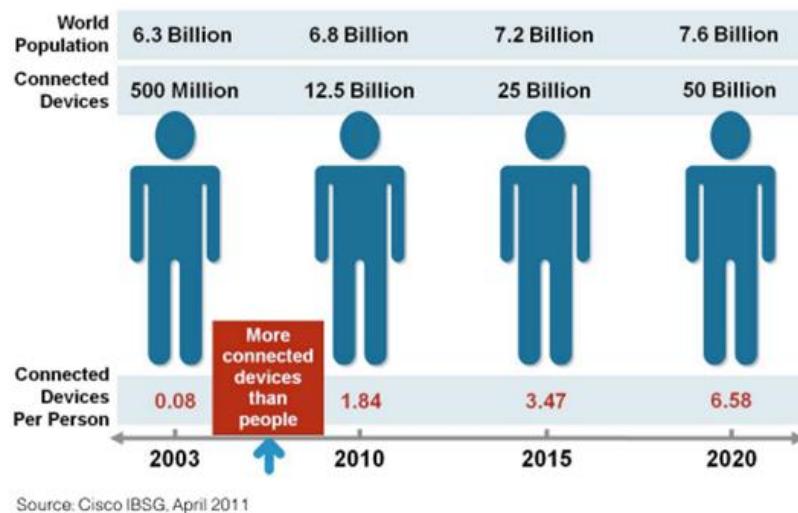
# “INTERNET DAS COISAS”



# Dentro dos bolsos

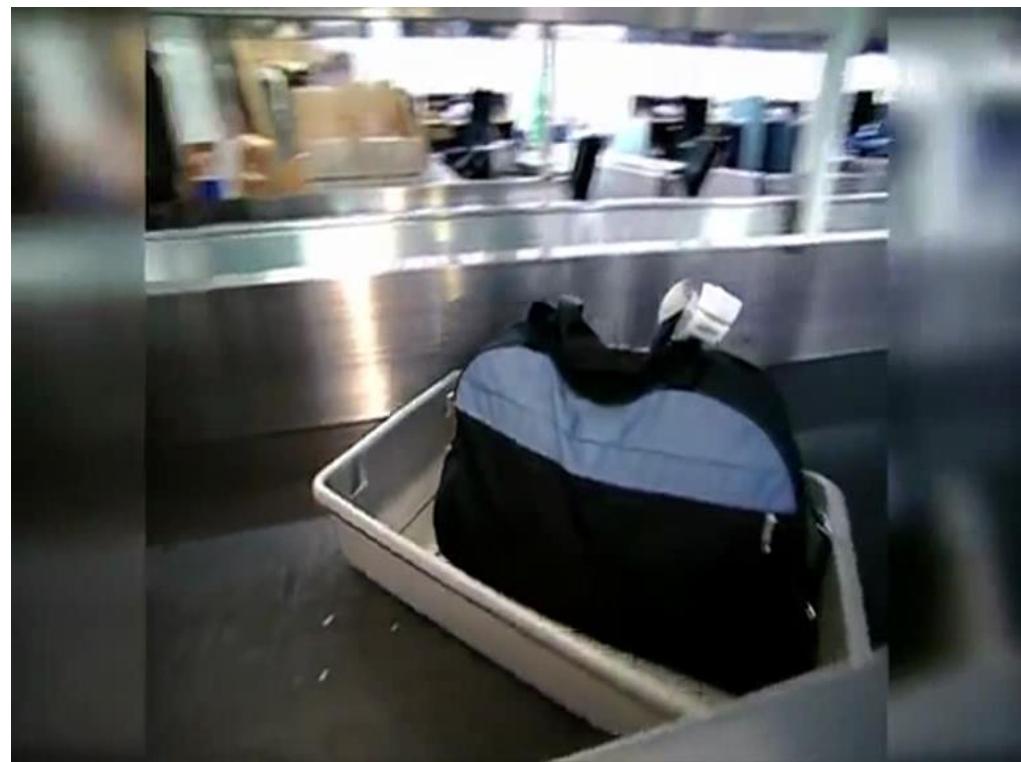


- Atualmente, o número de dispositivos ligados em rede é muito superior ao número de pessoas no mundo



- A sociedade caminha gradualmente para uma enorme rede de seres e objetos “endereçáveis”
- Grandes redes de sensores têm vindo a ser implementadas

- Exemplo: RFID





# Internet das coisas

- Exemplo: RFID



- Exemplo: RFID



- Exemplo: RFID





# Sistemas Embebidos em Portugal



SYNOPSYS®





# Sistemas Embebidos em Portugal

- Alguns produtos *embebidos* “made-in” Portugal:
  - Aviónica e sistemas espaciais
  - Sistemas de transporte inteligentes
  - Bilhética eletrónica
  - Cartões inteligentes
  - Monitorização ambiental
  - Equipamentos *self-service*





- Vídeos:
  - Parallel processing on GPU's:
    - <http://www.youtube.com/watch?v=ZrJeYFxpUyQ>
  - Vacuum Cleaner:
    - <http://www.youtube.com/watch?v=UeS69Z8jyuY>
  - Google Self-Driving Car:
    - <http://www.sciencechannel.com/video-topics/gadgets-and-tech/brave-new-world-driverless-car.htm>
  - Nano Quadrotors:
    - <https://www.youtube.com/watch?v=YQIMGV5vtd4>
  - Raspberry Pi Racer:
    - <http://www.youtube.com/watch?v=-uXj0U7lv5c>
  - RFID for animal identification:
    - <http://www.youtube.com/watch?v=OXgwhUpvvsk>
  - RFID Future Market:
    - <http://www.youtube.com/watch?v=zwfNLMJilaE>