

Sistemas Paralelos y Distribuidos

Félix García Carballeira

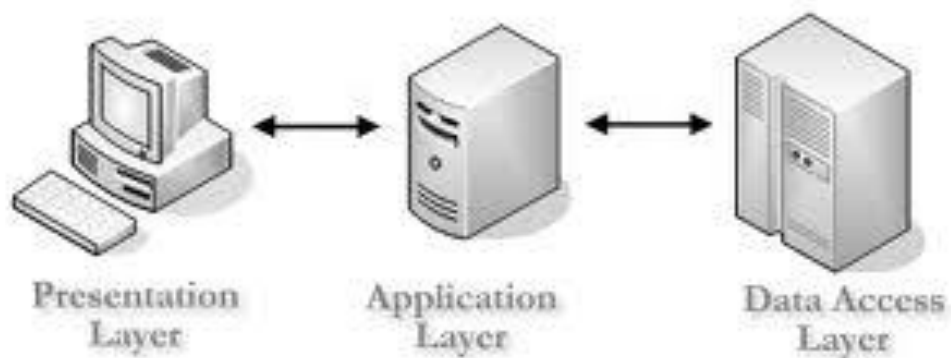
Alejandro Calderón Mateos

Sistemas de altas prestaciones en entornos distribuidos



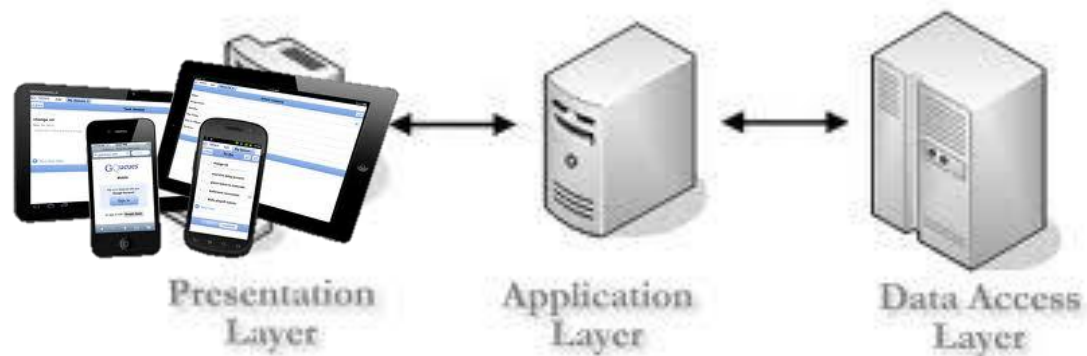
3-Tier Architecture

Internet / Intranet



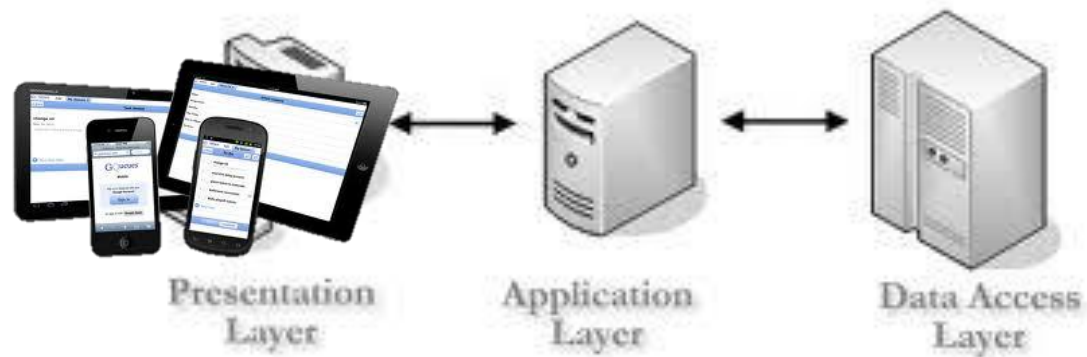
3-Tier Architecture

Internet / Intranet



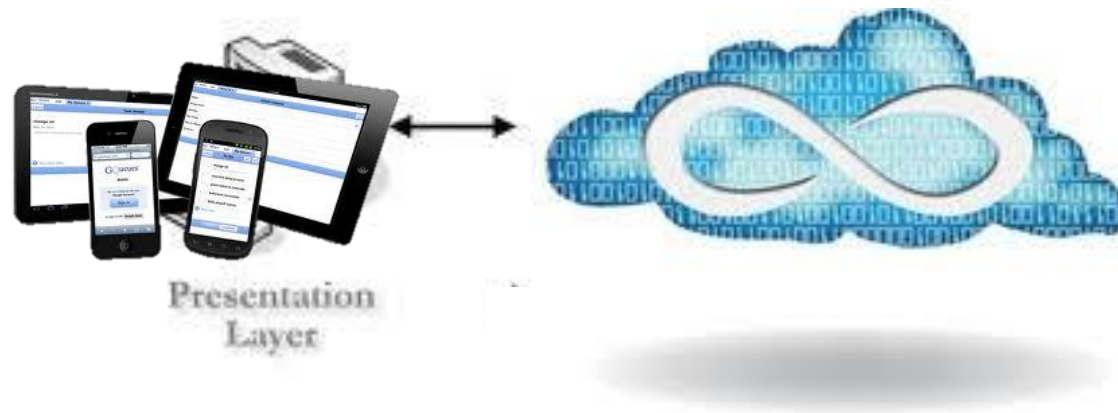
3-Tier Architecture

Internet / Intranet



3-Tier Architecture

Internet / Intranet



3-Tier Architecture

Internet / Intranet



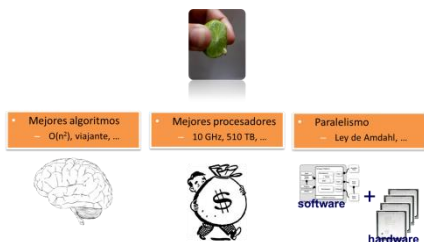
Ideas

Computación de altas prestaciones

Sistemas Distribuidos

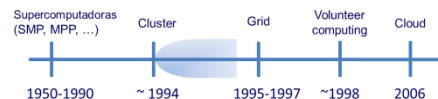
Ideas

Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software

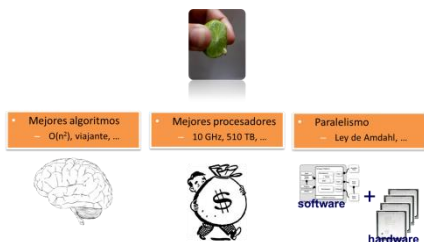


Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias

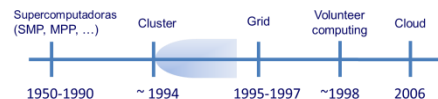


Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software



Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias

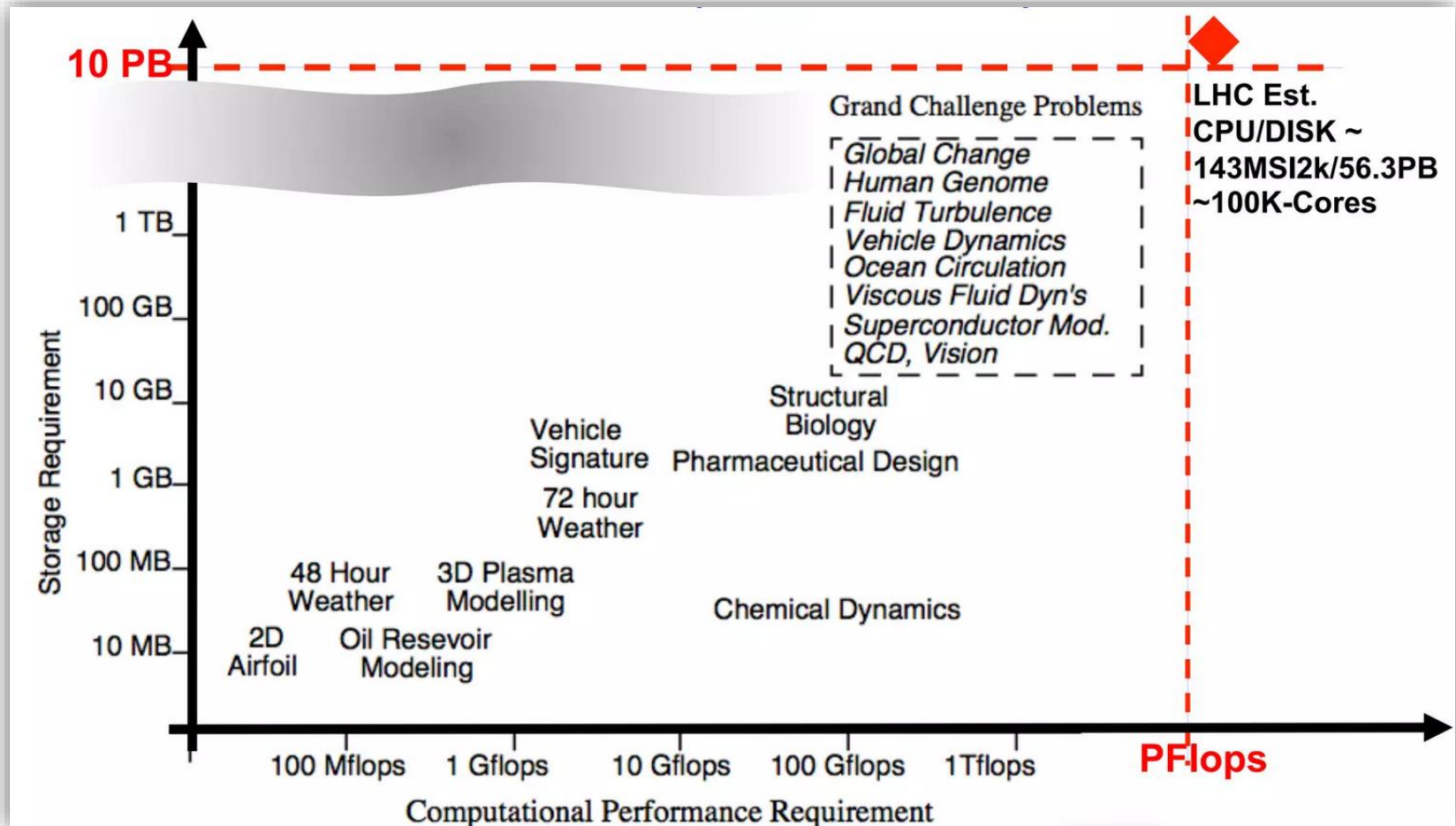
Computación de altas prestaciones



- La computación de altas prestaciones o HPC (*High Performance Computing*) se centra principalmente en **la velocidad**.
- El objetivo es conseguir la **máxima cantidad de cómputo** posible en la **mínima cantidad de tiempo**.

¿Dónde se necesita?

[Culler99]



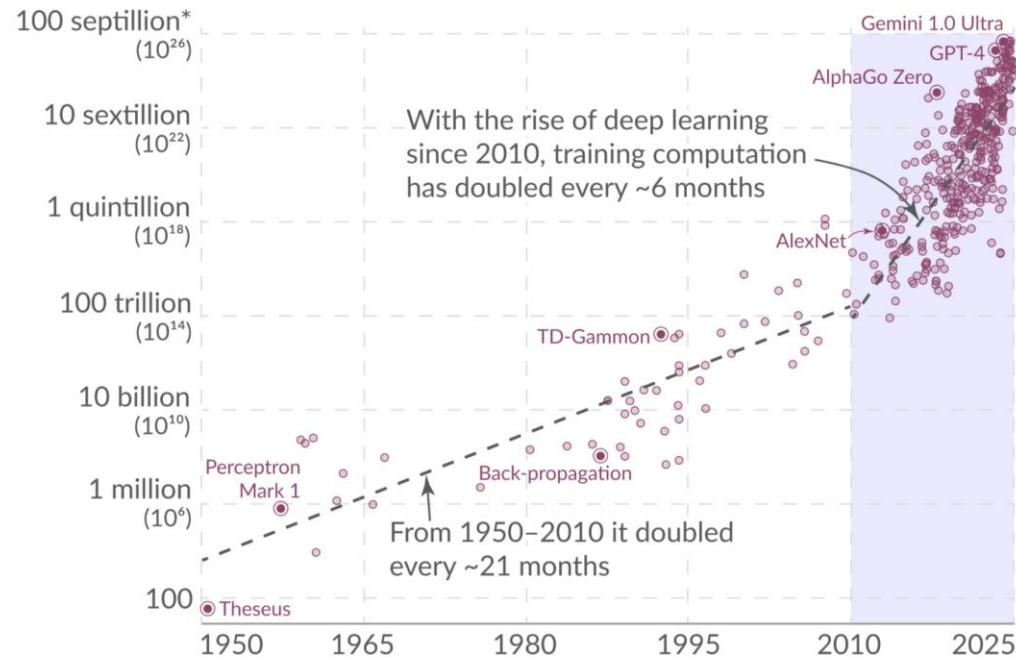
Ejemplo: entrenar modelos (2026)...

(<https://ourworldindata.org/data-insights/since-2010-the-training-computation-of-notable-ai-systems-has-doubled-every-six-months>)

The computation used to train notable AI systems has doubled every ~6 months since 2010

Our World
in Data

Training computation is measured in total floating-point operations (FLOP). Each FLOP represents a single arithmetic calculation, such as multiplication. Shown on a logarithmic scale.



*For comparison, 1 septillion (1,000,000,000,000,000,000,000,000) is the estimated number of stars in the universe.

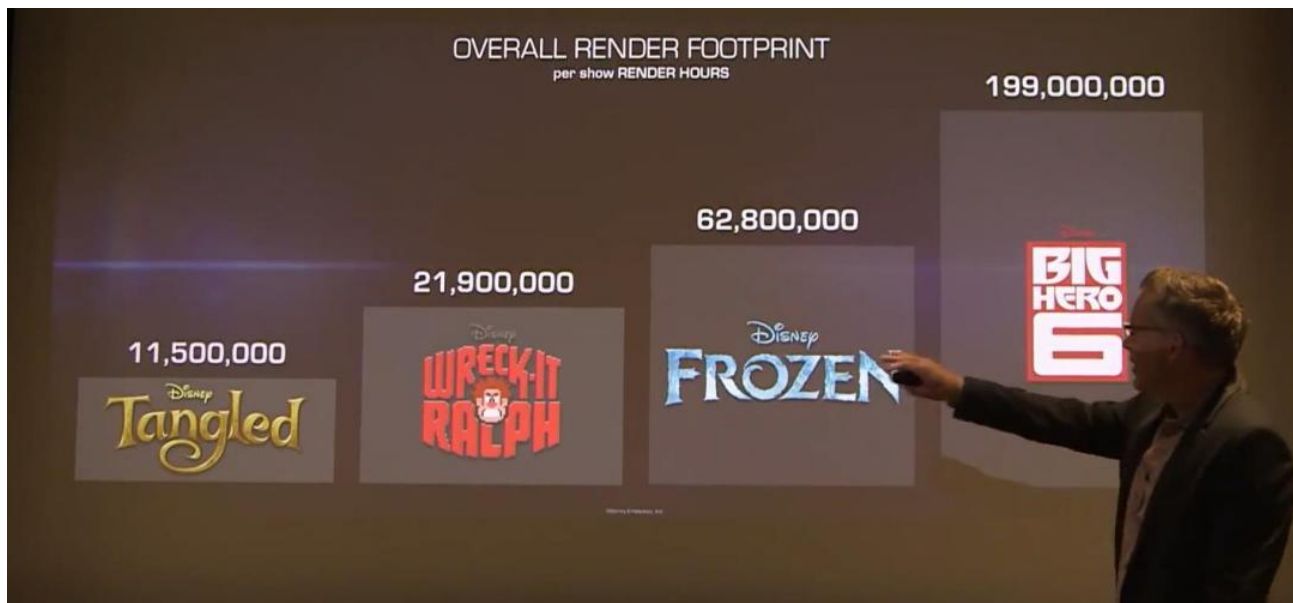
Data source: Epoch (2024)

CC BY

Ejemplo: Big Hero 6 (2014)...

(<http://www.engadget.com/2014/10/18/disney-big-hero-6/>)

- To manage that cluster and the 400,000-plus computations it processes per day (about 1.1 million computational hours/day), his team created software called Coda, which treats the four render farms like a single supercomputer.
- **The film takes 199 million core-hours (181 days) of rendering.**
To put the enormity of this computational effort into perspective, Hendrickson says that **Hyperion "could render *Tangled* (2010) from scratch every 10 days."**



¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

¿Cómo se consigue más velocidad?

- Mejores algoritmos
 - $O(n^2)$, viajante, ...



¿Cómo se consigue más velocidad?

- Mejores algoritmos

- $O(n^2)$, viajante, ...



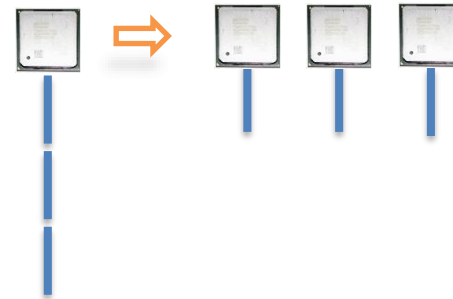
- Mejores procesadores (mejoras en la tecnología)

- CPU a 10 GHz, 510 TB de RAM, ...

¿Cómo se consigue más velocidad?

- Mejores algoritmos

- $O(n^2)$, viajante, ...



- Mejores procesadores (mejoras en la tecnología)

- CPU a 10 GHz, 510 TB de RAM, ...

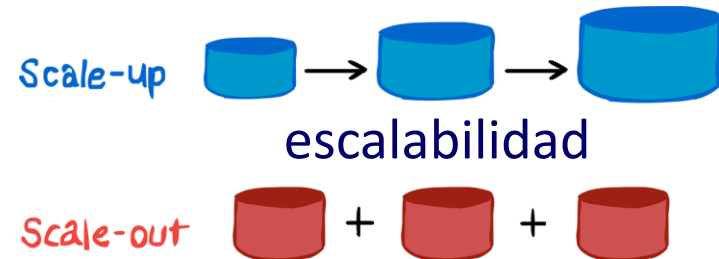
- Paralelismo (mejoras en el uso de la tecnología actual)

- Speedup, Ley de Amdahl, ...

¿Eso del paralelismo qué implica?

– Mejores algoritmos

- $O(n^2)$, viajante, ...



– Mejores procesadores (mejoras en la tecnología)

- CPU a 10 GHz, 510 TB de RAM, ...

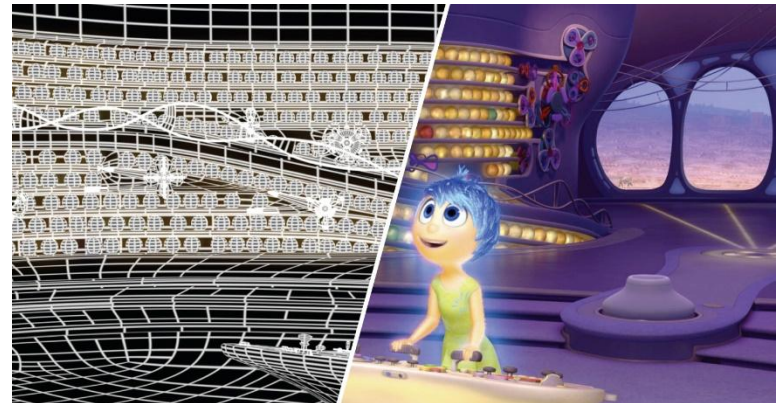
Paralelismo (mejoras en el uso de la tecnología actual)

- Speedup, Ley de Amdahl, ...

Ejemplo: Monster's University (2022)...

(<https://sciencebehindpixar.org/pipeline/rendering>)

- I'm a little confused on the whole rendering process. **They said it takes at least around 24 hours to render 1 frame**, and that there are **24 frames in a second**. If you take a **100 minute movie**, then it would take around **400 years to render** that many frames.....
— Jay.
- **Pixar has a huge "render farm," which is basically a supercomputer composed of 2000 machines, and 24,000 cores. This makes it one of the 25 largest supercomputers in the world. That said, with all that computing power, it still took two years to render Monster's University.**
— Peter Collingridge



Tipos de paralelismo

- Tareas independientes:



Tipos de paralelismo

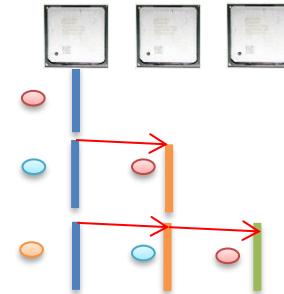
- Tareas independientes:



- Tareas cooperativas:

- *Pipeline*

- Coordinación (*mutex y conditions*)



Tipos de paralelismo

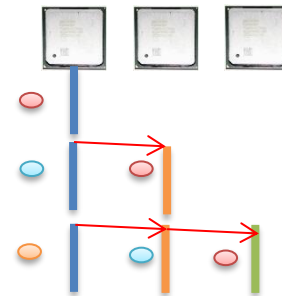
- Tareas independientes:



- Tareas cooperativas:

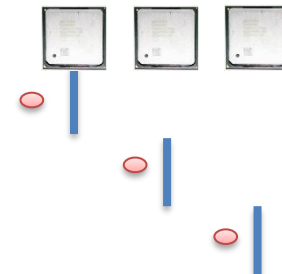
- *Pipeline*

- Coordinación (*mutex y conditions*)



- Tareas competitivas:

- Código secuencial ☹️



Speedup

- La mejora (o *speedup*) en la ejecución paralela con n elementos de cómputo será:

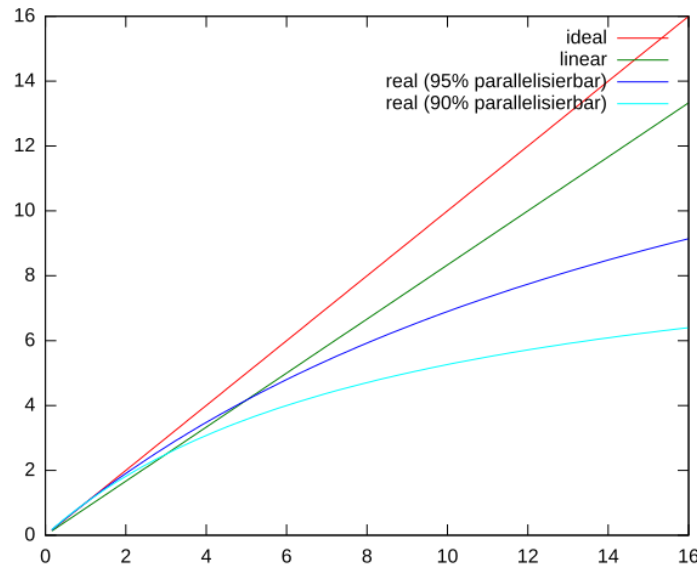
$$\text{speedup} = \text{tiempo_de_ejecución (1)} / \text{tiempo_de_ejecución (n)}$$

Speedup

- La mejora (o *speedup*) en la ejecución paralela con n elementos de cómputo será:

$$\text{speedup} = \text{tiempo_de_ejecución (1)} / \text{tiempo_de_ejecución (n)}$$

- No siempre se obtiene un *speedup* ideal:



Ley de Amdahl

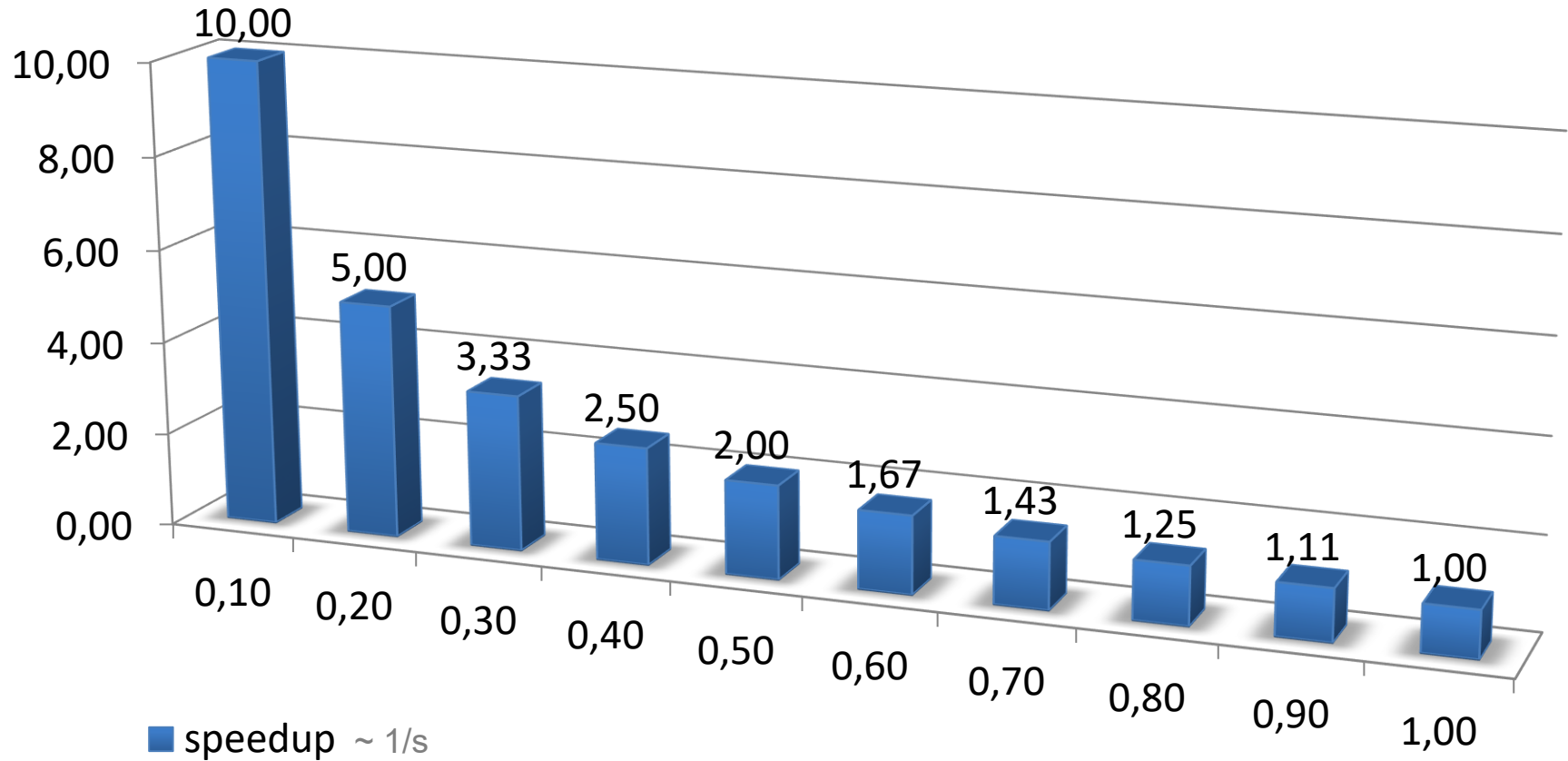
- Ley de Amdahl:

“el *speedup* teórico está limitado por la fracción secuencial s del programa”

$$speedup \leq \frac{1}{s + \frac{(1-s)}{n}}$$

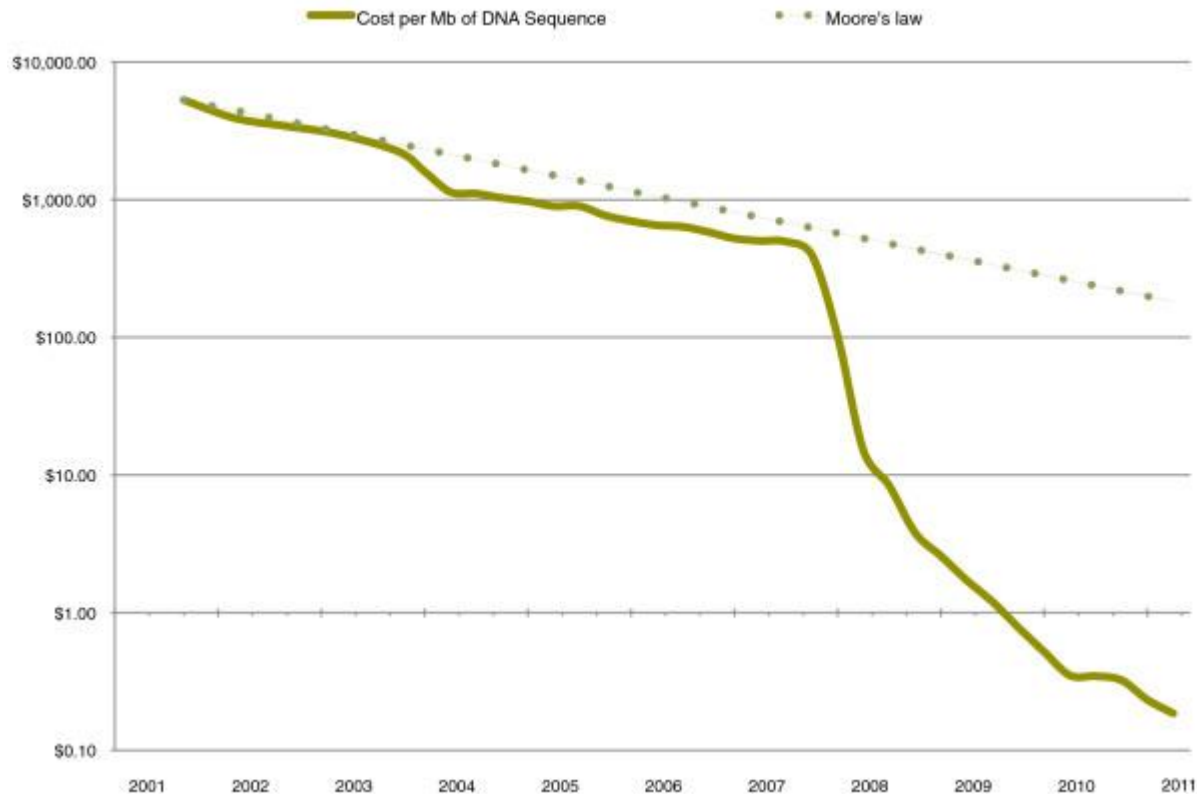
SI $n \uparrow$ ENTONCES $speedup \sim 1 / s$

Ley de Amdahl



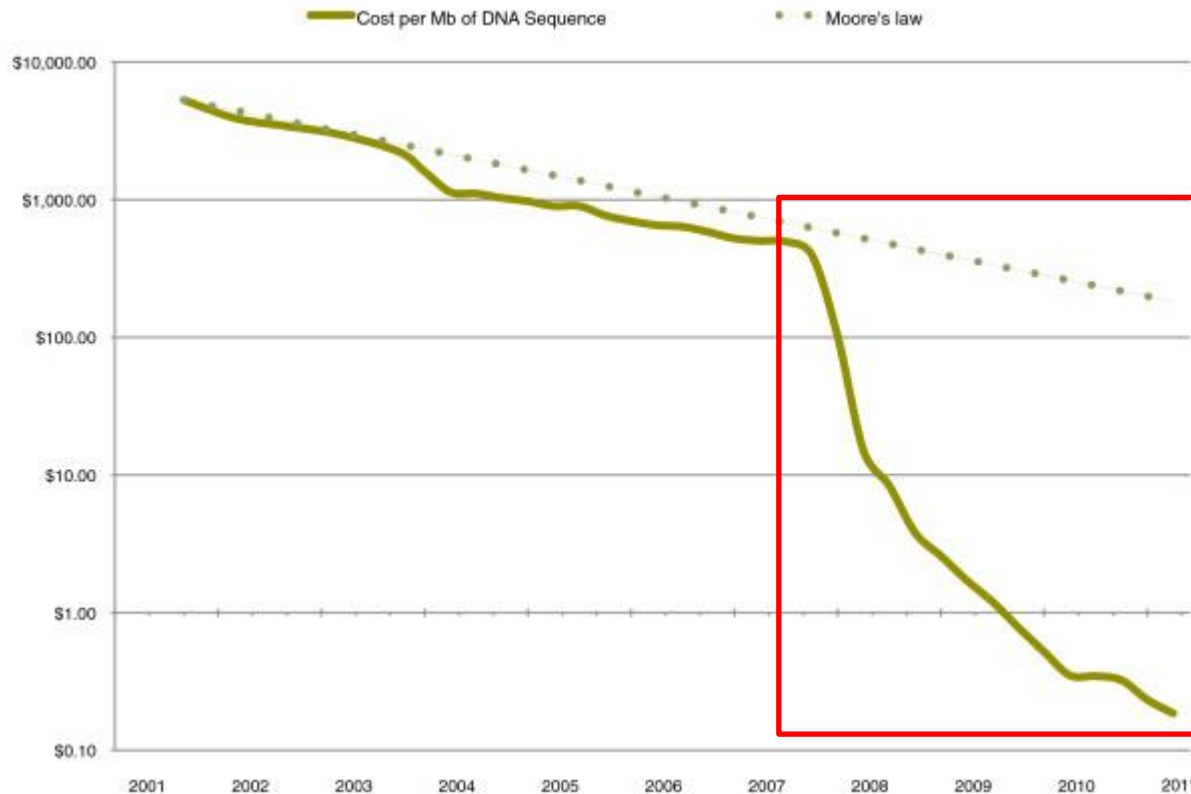
¿Eso del paralelismo ayuda?

caso de estudio: genoma humano



¿Eso del paralelismo ayuda?

caso de estudio: genoma humano



¡Sí!

Computación de altas prestaciones



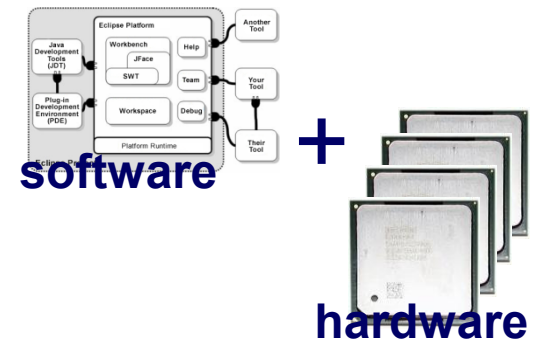
- Mejores algoritmos
 - $O(n^2)$, viajante, ...



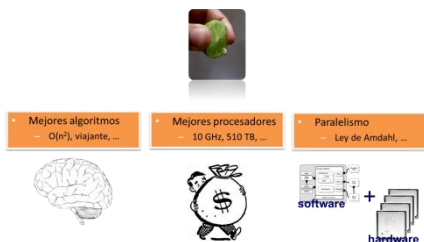
- Mejores procesadores
 - 10 GHz, 510 TB, ...



- Paralelismo
 - Ley de Amdahl, ...

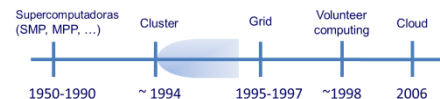


Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software

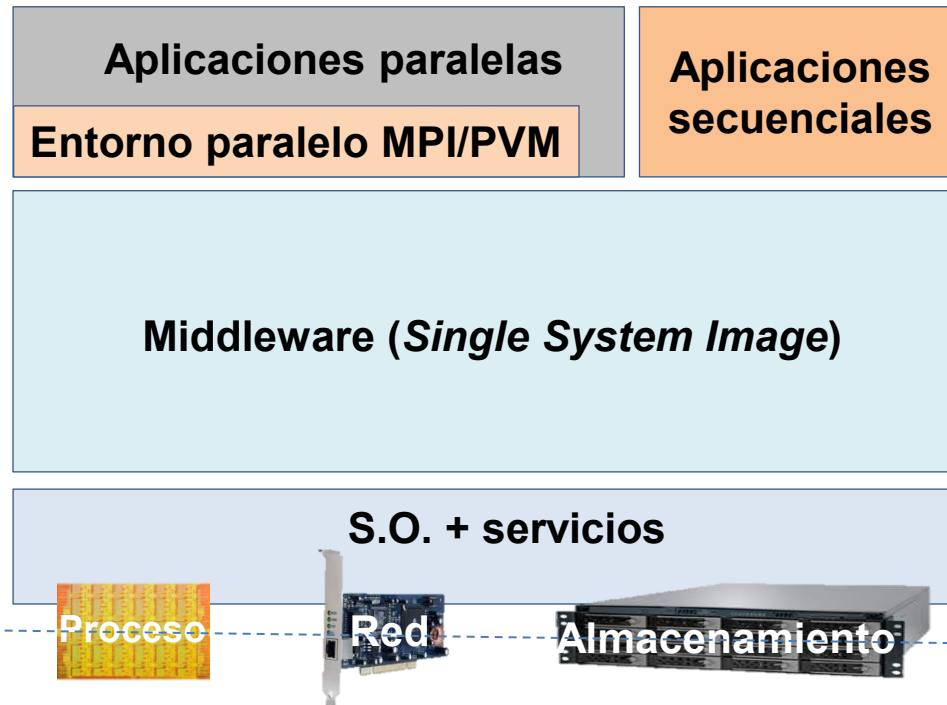


Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias

Plataforma hardware y software

SW

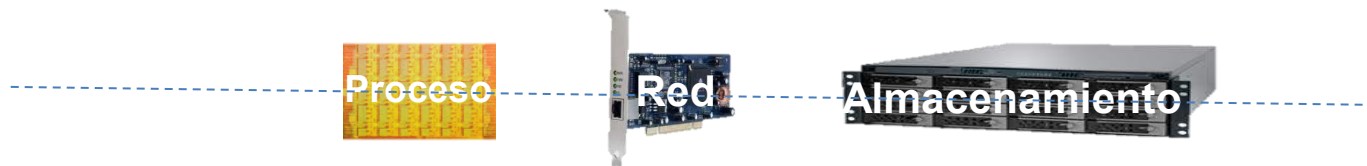


HW



Computador de altas prestaciones

Plataforma hardware

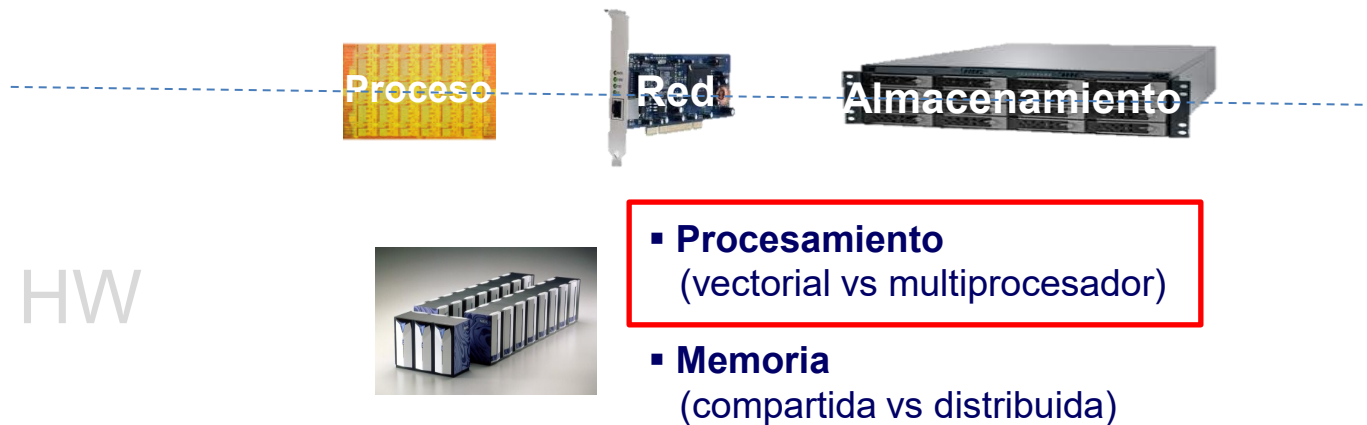


HW



- **Procesamiento**
(vectorial vs multiprocesador)
- **Memoria**
(compartida vs distribuida)

Plataforma hardware



HW

Taxonomía de Flynn

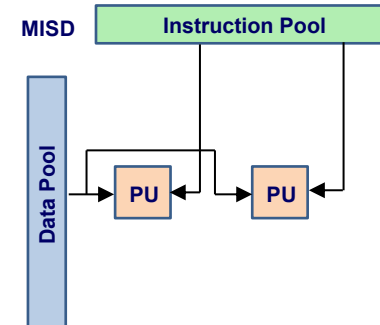
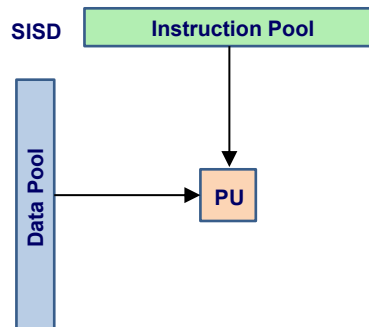
<http://www.buyya.com/microkernel/chap1.pdf>



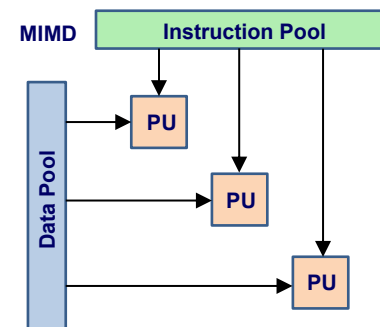
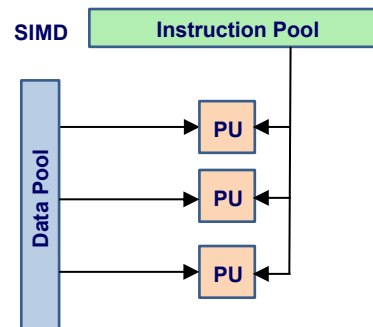
Single Instruction

Multiple Instruction

Single Data



Multiple Data



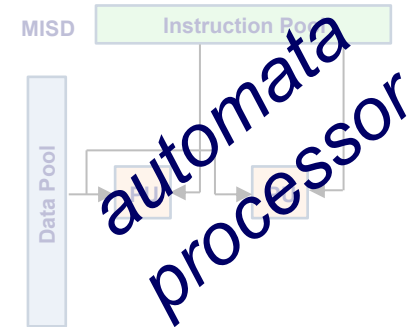
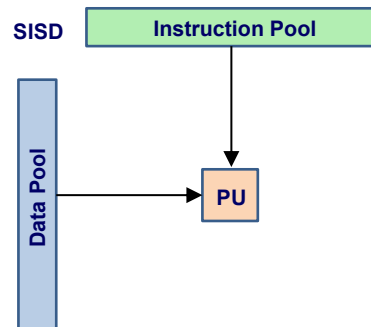
Taxonomía de Flynn



Single Instruction

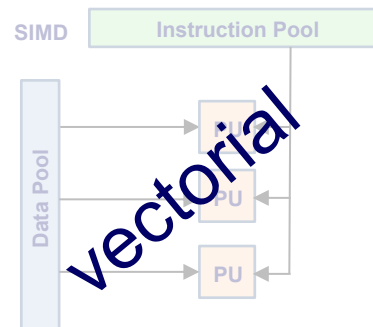
Multiple Instruction

Single Data

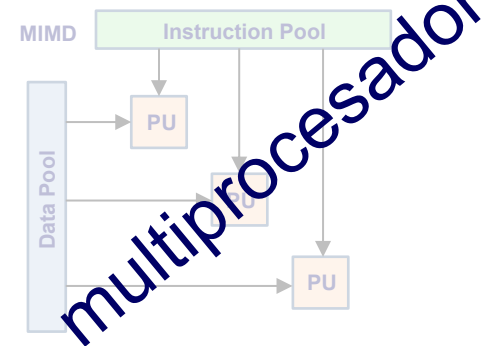


automata
processor

Multiple Data



vectorial



multiprocesador

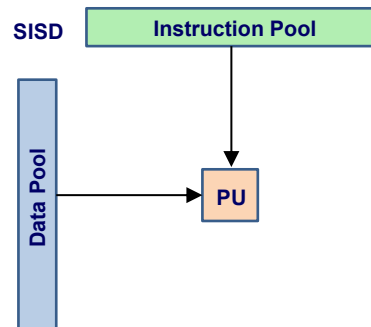
Taxonomía de Flynn



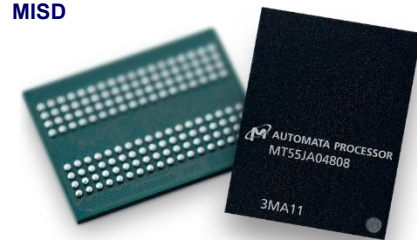
Single Instruction

Multiple Instruction

Single Data



MISD



automata processor

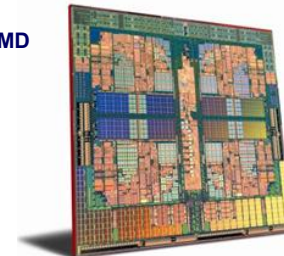
Multiple Data

SIMD



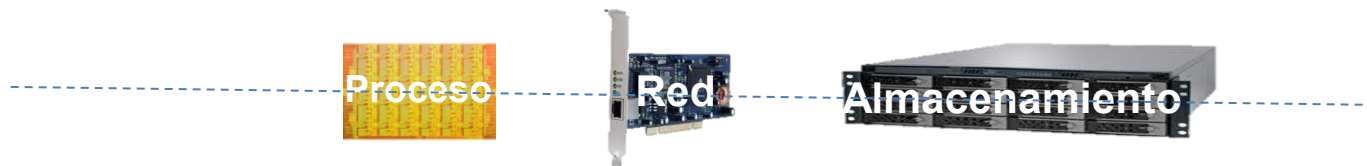
vectorial

MIMD



multiprocesador

Plataforma hardware

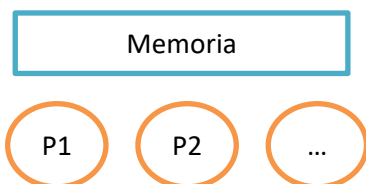


HW

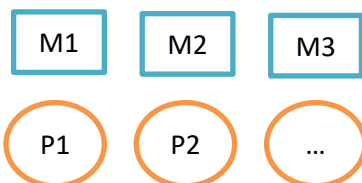


- **Procesamiento**
(vectorial vs multiprocesador)
- **Memoria**
(compartida vs distribuida)

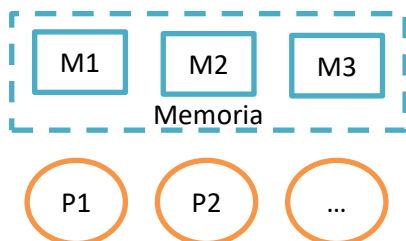
Acceso a memoria



- Memoria compartida (UMA)



- Memoria distribuida (MD)



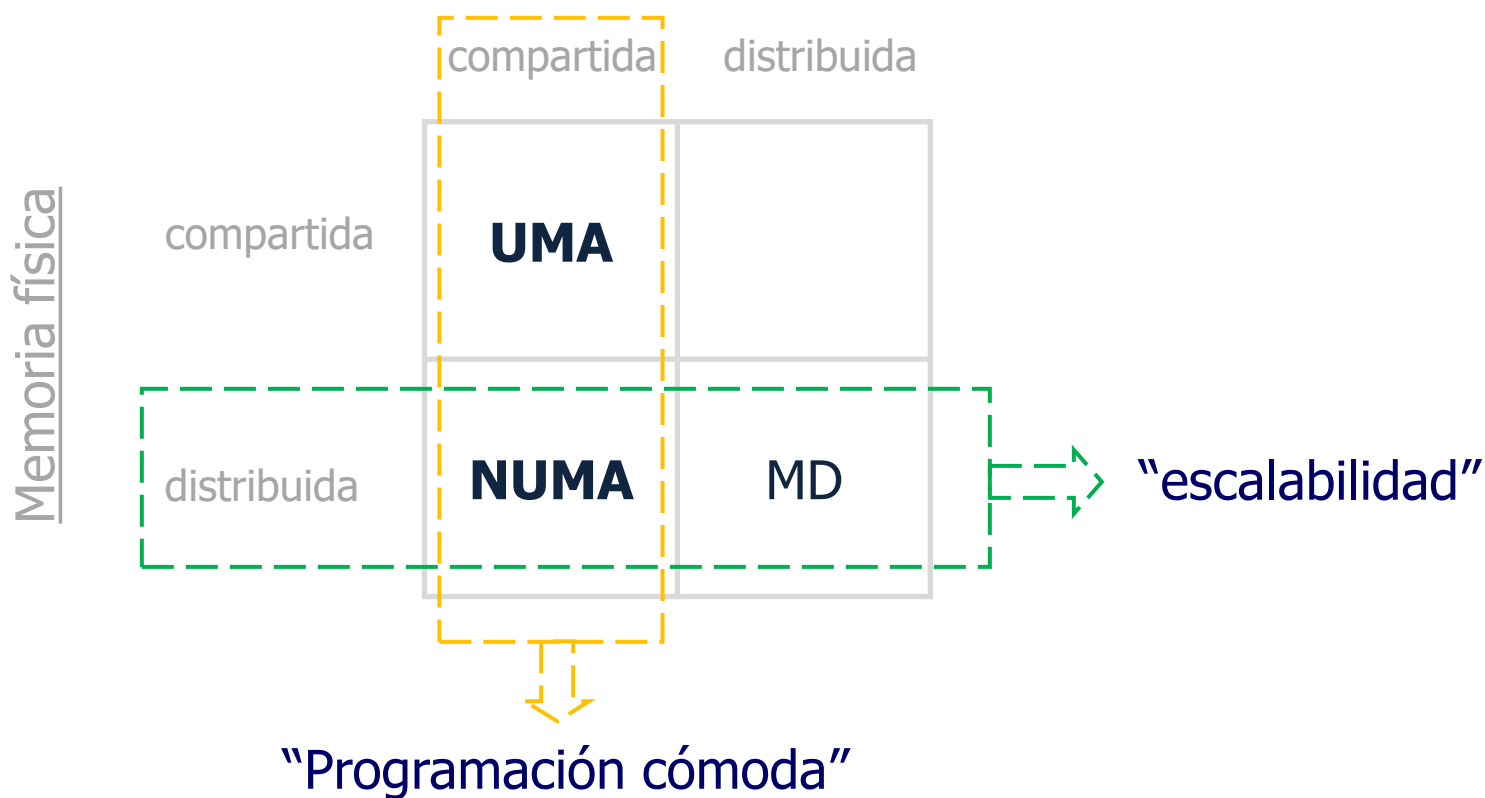
- Memoria lógicamente compartida (NUMA)

Acceso a memoria



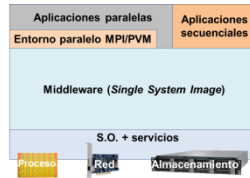
Visión lógica de la memoria

(comunicación/sincronización)



Plataforma software

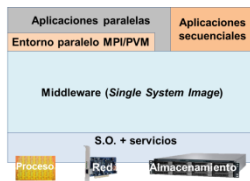
SW



- Vectoriales
 - Uso de instrucciones especiales
- Multiprocesador
 - UMA, NUMA
 - OpenMP, ...
 - M. Distribuida
 - MPI, ...

Plataforma software

SW



- Vectoriales
 - Uso de instrucciones especiales
- Multiprocesador
 - UMA, NUMA
 - OpenMP, ...
 - M. Distribuida
 - MPI, ...

Cómo es OpenMP

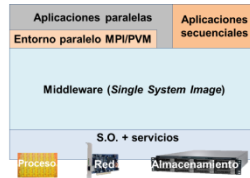
```
#include <omp.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main (int argc, char *argv[])
{
    #pragma omp parallel private(nthreads, tid)
    {
        int tid = omp_get_thread_num();
        printf("Hello World from thread = %d\n", tid);

        #pragma omp master
        {
            int nthreads = omp_get_num_threads();
            printf("Number of threads = %d\n", nthreads);
        }
    }
}
```

Plataforma software

SW



- Vectoriales
 - Uso de instrucciones especiales
- Multiprocesador
 - UMA, NUMA
 - OpenMP, ...
 - M. Distribuida
 - MPI, ...

Qué es MPI

MPI es una interfaz de paso de mensaje que representa un esfuerzo prometededor de mejorar la disponibilidad de un software altamente eficiente y portable para satisfacer las necesidades actuales en la computación de alto rendimiento a través de la definición de un estándar de paso de mensajes universal.

William D. Gropp et al.

Principales pilares de MPI

- **Portabilidad:**
 - Definido independiente de plataforma paralela.
 - Útil en arquitecturas paralelas heterogéneas.
- **Eficiencia:**
 - Definido para aplicaciones multihilo (*multithread*)
 - Sobre una comunicación fiable y eficiente.
 - Busca el máximo de cada plataforma.
- **Funcionalidad:**
 - Fácil de usar por cualquier programador que ya haya usado cualquier biblioteca de paso de mensajes.

Implementaciones de MPI



Open MPI 5.0.10 (23/2/2026)

- <http://www.open-mpi.org/>
- FT-MPI + LA-MPI + LAM/MPI + PACX-MPI



MPICH 5.0.1 (10/04/2026)

- <http://www.mpich.org/>
- Argonne National Laboratory & University of Chicago

Cómo es MPI

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

main(int argc, char **argv)
{
    int node,size;
    int tam = 255;
    char name[255];

    MPI_Init(&argc, &argv);

    MPI_Comm_size (MPI_COMM_WORLD, &size);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);
    MPI_Get_processor_name(name, &tam);
    printf("Hola Mundo2 del proceso %d de %d procesos (%s)\n", node, size, name);

    MPI_Finalize();
}
```

Cómo es MPI: uso interactivo

```
uc3m15672@login2:~/tmp> mpicc -g -o hello hello.c
```

```
uc3m15672@login2:~/tmp> cat > machines
```

```
login1
```

```
login2
```

```
login3
```

```
login4
```

```
^D
```

```
uc3m15672@login2:~/tmp> mpirun -np 4 -machinefile machines ~/tmp/hello
```

```
Hola Mundo2 del proceso 0 de 4 procesos (login1)
```

```
Hola Mundo2 del proceso 3 de 4 procesos (login4)
```

```
Hola Mundo2 del proceso 1 de 4 procesos (login2)
```

```
Hola Mundo2 del proceso 2 de 4 procesos (login3)
```

Cómo es MPI: uso de SLURM (1)

```
uc3m15672@login2:~/tmp> cat hello.cmd
```

```
#!/bin/bash
```

```
#SBATCH --job-name=mpi
```

```
#SBATCH --output=mpi_%j.out
```

```
#SBATCH --error=mpi_%j.err
```

```
#SBATCH --nodes=4
```

```
#SBATCH --exclusive
```

```
#SBATCH --time=00:05:00
```

```
#SBATCH --qos=debug
```

```
export HOME_PATH=/home/uc3m15/uc3m15672
```

```
scontrol show hostnames ${SLURM_JOB_NODELIST} > ${HOME_PATH}/tmp/machine_file
```

```
mpirun -np 2 -machinefile ${HOME_PATH}/tmp/machine_file ${HOME_PATH}/tmp/hello
```

Cómo es MPI: uso de SLURM (2)

```
uc3m15672@login2:~/tmp> sbatch hello.cmd
```

```
Submitted batch job 25372807
```

```
uc3m15672@login2:~/tmp> squeue
```

JOBID	PARTITION	NAME	USER	ST	TIME	NODES	NODELIST(REASON)
25372807	sequentia	hello.cm	uc3m1567	PD	0:00	1	(None)

```
uc3m15672@login2:~/tmp> squeue
```

JOBID	PARTITION	NAME	USER	ST	TIME	NODES	NODELIST(REASON)
25372807	sequentia	hello.cm	uc3m1567	R	0:05	1	s07r2b72

```
uc3m15672@login2:~/tmp> squeue
```

JOBID	PARTITION	NAME	USER	ST	TIME	NODES	NODELIST(REASON)
-------	-----------	------	------	----	------	-------	------------------

Cómo es MPI: uso de SLURM (3)

```
uc3m15672@login2:~/tmp> cat slurm-25372807.out
```

```
Hola Mundo2 del proceso 1 de 2 procesos (s07r1b08)
```

```
Hola Mundo2 del proceso 0 de 2 procesos (s07r1b05)
```

Cómo es MPI: uso de SLURM (4)

```
uc3m15672@login2:~/tmp> bsc_queues
```

queue name	job nodes	max cores	wall clock time
-----	-----	-----	-----
debug	16	768	00:10:00
interactive	1	4	02:00:00
bsc	50	2400	48:00:00
RES Class A	200	9600	72:00:00
PRACE	400	19200	72:00:00

MPI 2.2 – 5.0

(<http://mpi-forum.org/docs/>)

- Estructuras de datos
 - Tipos de datos (básicos, vectores, compuestos, ...)
 - Grupo de procesos (grupos, comunicadores, ...)
- Paso de mensajes
 - Llamadas punto a punto (bloqueantes, ...)
 - Llamadas colectivas (*bcast*, *scatter*, *gather*, ...)
- Entrada y salida
 - Gestión de ficheros (apertura, cierre, ...)
 - Gestión de contenidos (vistas, punteros, ...)
- Procesos
 - Gestión de procesos (creación, ...)
 - *Profiling*

Send-receive en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

int main ( int argc, char **argv )
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 10;

    MPI_Init(&argc,&argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size );
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    if (node == 0)
        MPI_Send(&num, 1, MPI_INT, 1, 0, MPI_COMM_WORLD);
    else
        MPI_Recv(&num, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Finalize();
    return 0 ;
}
```

Send-receive en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

int main ( int argc, char **argv )
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 10;

    MPI_Init(&argc,&argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size );
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    if (node == 0)
        MPI_Send(&num, 1, MPI_INT, 1, 0, MPI_COMM_WORLD);
    else
        MPI_Recv(&num, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Finalize();
    return 0 ;
}
```

Dato a enviar (points to `&num`)

Número de elementos (points to `1`)

Tipo de datos (points to `MPI_INT`)

MPI data types:

- MPI_CHAR
- MPI_BYTE
- MPI_INT
- MPI_FLOAT
-
- Tipos de datos derivados

Send-receive en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

int main ( int argc, char **argv )
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 10;

    MPI_Init(&argc,&argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size );
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    if (node == 0)
        MPI_Send(&num, 1, MPI_INT, 1, 0, MPI_COMM_WORLD);
    else
        MPI_Recv(&num, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Finalize();
    return 0 ;
}
```

Dato a enviar (points to `&num`)

Número de elementos (points to `1`)

Tipo de datos (points to `MPI_INT`)

Proceso destinatario (points to `1`)

Etiqueta asociada al mensaje (points to `0`)

Comunicador (points to `MPI_COMM_WORLD`)

Tipo de datos list:

- MPI_CHAR
- MPI_BYTE
- MPI_INT
- MPI_FLOAT
-
- Tipos de datos derivados

Send-receive en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

int main ( int argc, char **argv )
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 10;

    MPI_Init(&argc,&argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size );
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    if (node == 0)
        MPI_Send(&num, 1, MPI_INT, 1, 0, MPI_COMM_WORLD);
    else
        MPI_Recv(&num, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Finalize();
    return 0 ;
}
```

Proceso origen
del mensaje

Etiqueta asociada al mensaje

Comunicador

Operaciones colectivas en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

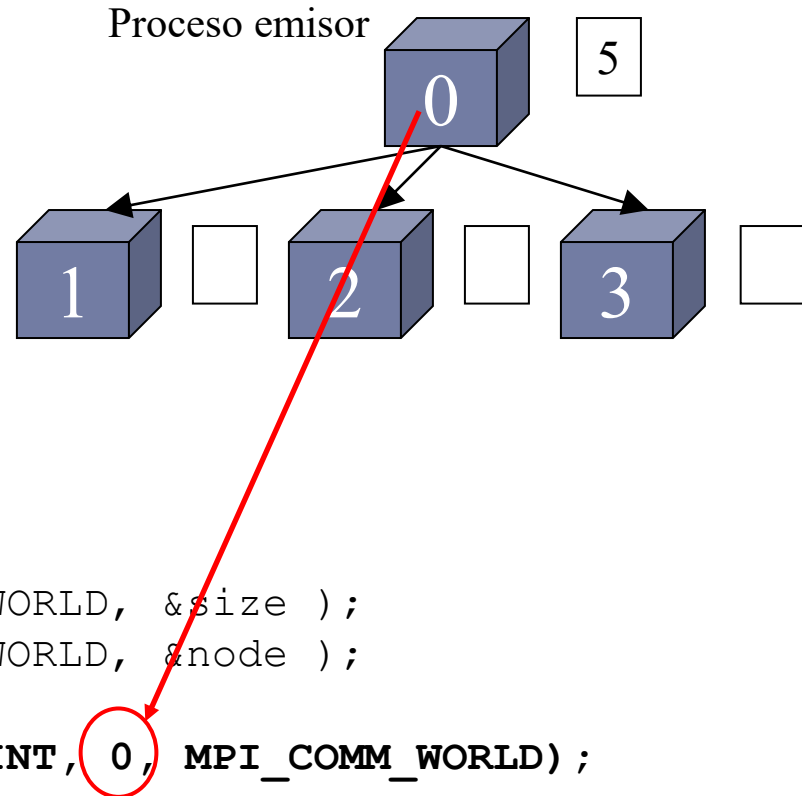
```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

main (int argc, char **argv)
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 5;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    MPI_Bcast(&num, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
    printf("El proceso %d recibe %d\n", node, num);
    MPI_Finalize();
}
```



Operaciones colectivas en MPI



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

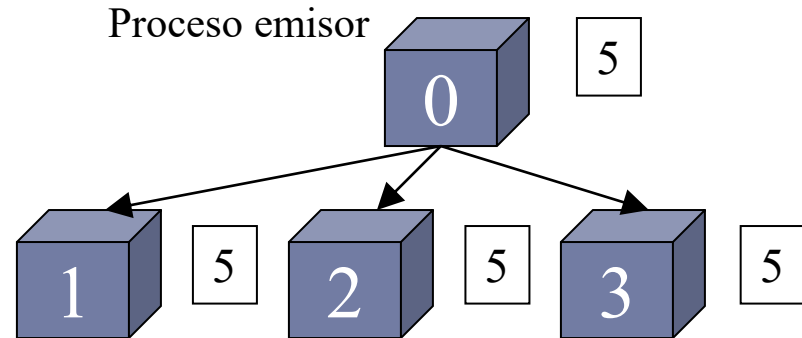
```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"

main (int argc, char **argv)
{
    int node, size;
    int tam = 255;
    char name[255];
    int num = 5;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);

    MPI_Bcast(&num, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);

    MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
    printf("El proceso %d recibe %d\n", node, num);
    MPI_Finalize();
}
```



El resto de procesos reciben en num
el mensaje enviado por el proceso 0

```
MPI_Bcast(&num, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
```

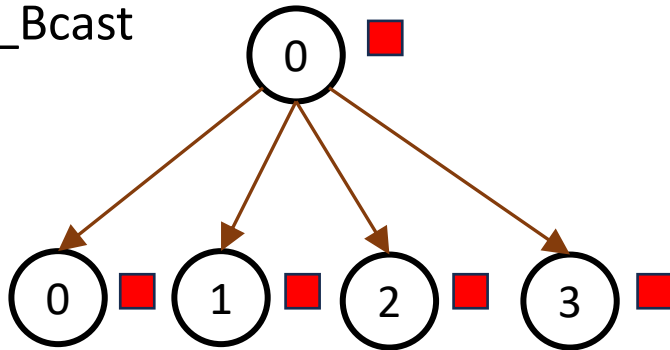
```
MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
printf("El proceso %d recibe %d\n", node, num);
MPI_Finalize();
```

Operaciones colectivas

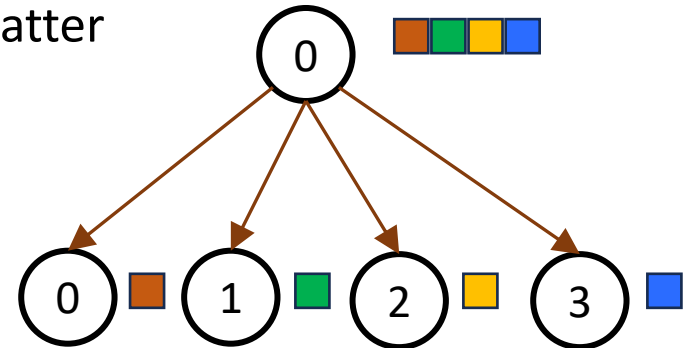


<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

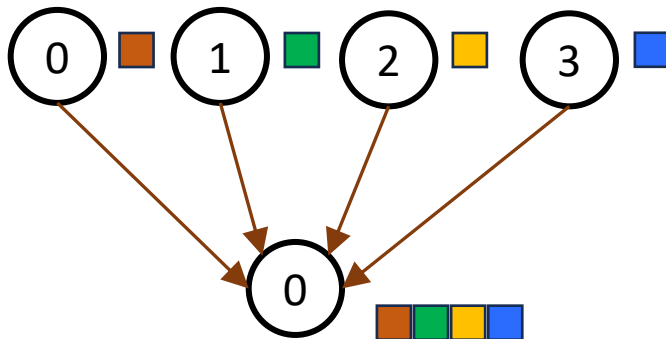
MPI_Bcast



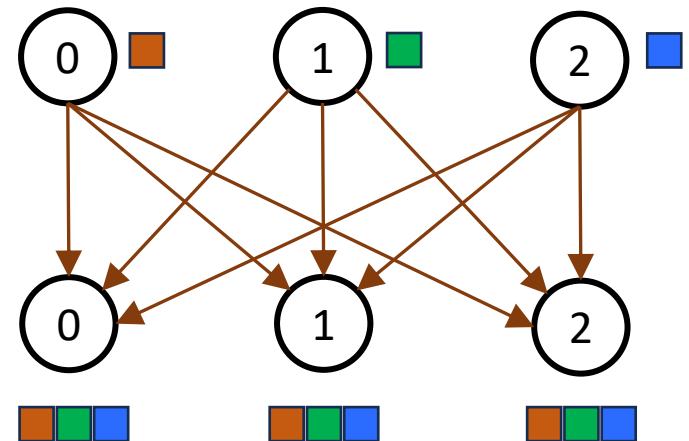
MPI_Scatter



MPI_Gather



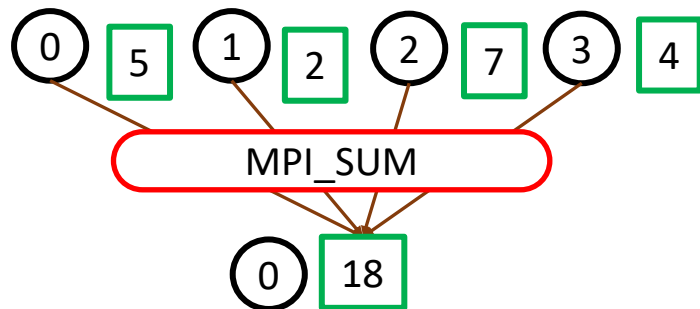
MPI_Allgather



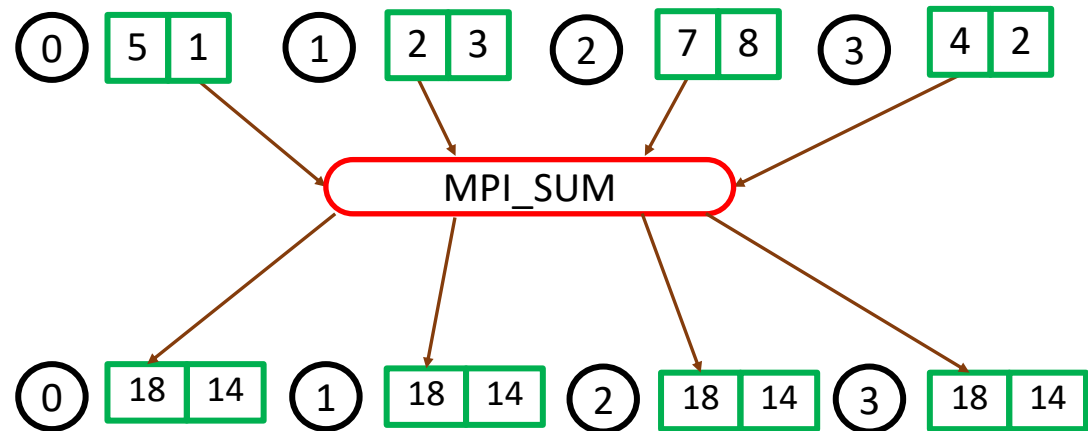
Operaciones colectivas de reducción



MPI_Reduce



MPI_Allreduce

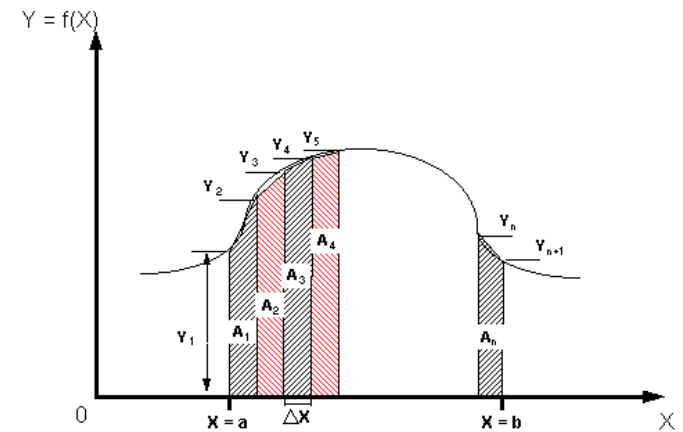
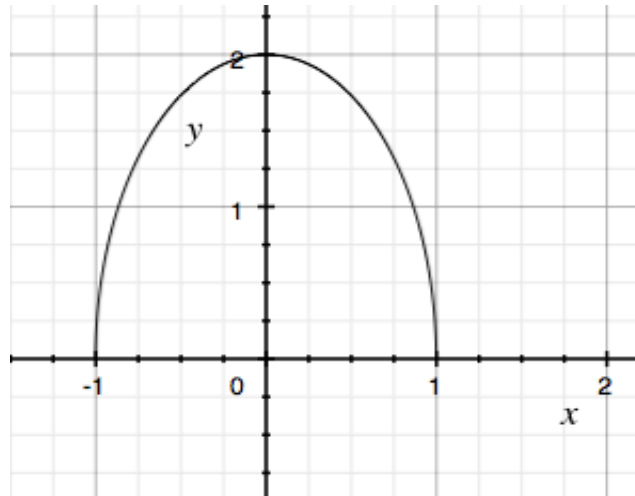


Ejemplo: Cálculo de π



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

$$\int_0^1 \sqrt{4(1-x^2)} dx = \frac{\pi}{2}$$



Cálculo secuencial



<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

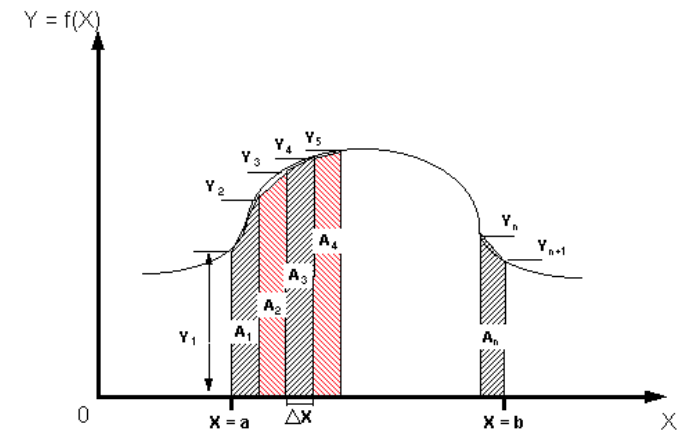
```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

int main(int argc, char *argv[])
{
    int    n, i;
    double pi, h, sum, x;

    n  = 1000000 ; // number of intervals
    h  = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    for (i = 0;          i <= n; i++) {
        x = h * ((double)i - 0.5);
        sum += 4.0 / (1.0 + x*x);
    }
    pi = h * sum;

    printf("pi is approximately %.16f\n", pi);

    return 0;
}
```



Cálculo paralelo

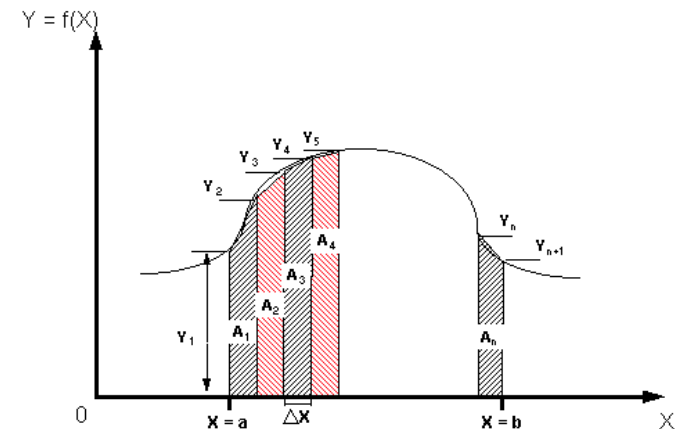


<https://www.pinterest.es/pin/497577458813063755/>

```
#include "mpi.h"
#include <stdio.h>
#include <math.h>

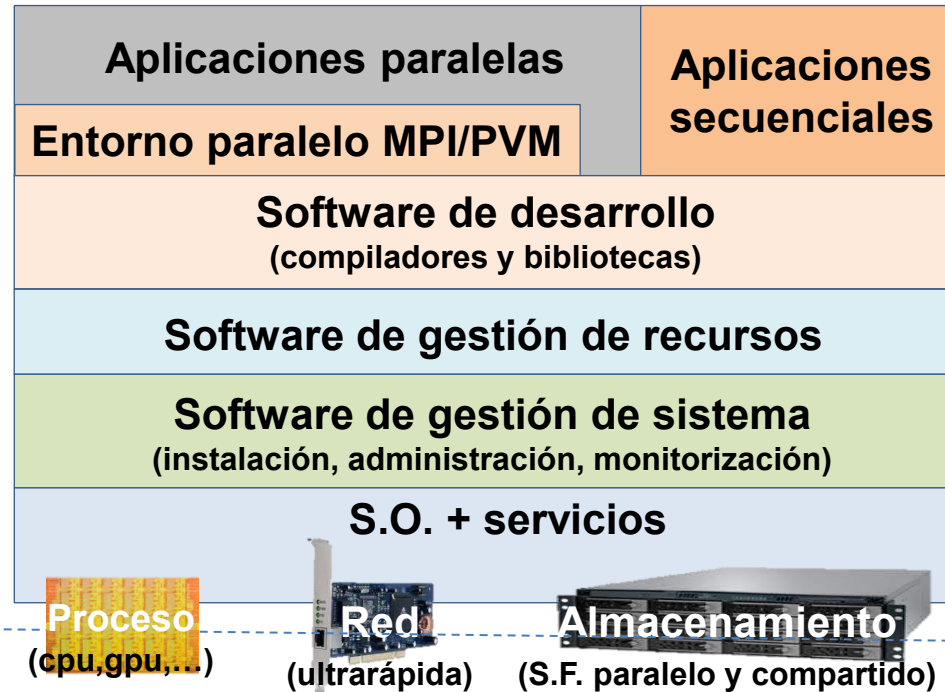
int main(int argc, char *argv[])
{
    int    n, i, myid, numprocs;
    double pi, h, sum, x, mypi;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &numprocs);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &myid);
    n    = 1000000 ; // number of intervals
    h    = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    for (i = myid + 1; i <= n; i += numprocs) {
        x = h * ((double)i - 0.5);
        sum += 4.0 / (1.0 + x*x);
    }
    mypi = h * sum;
    MPI_Reduce(&mypi, &pi, 1, MPI_DOUBLE, MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD);
    if (myid == 0)
        printf("pi is approximately %.16f\n", pi);
    MPI_Finalize();
    return 0;
}
```



Plataforma hardware y software

SW



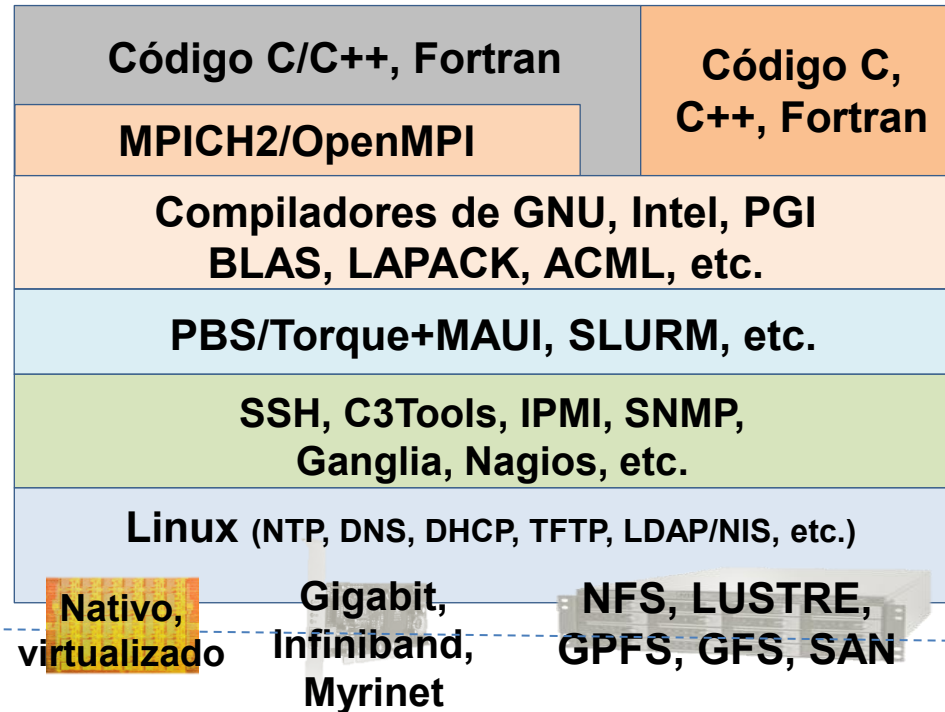
HW



Supercomputador

Plataforma hardware y software

SW



HW



Supercomputador

Top 500 Junio 2026

(<http://www.top500.org>)

Rank	System	Cores	R _{max} (PFLOP/s)	R _{peak} (PFLOP/s)	Power (kW)
1	LineShine - LingKun, LX2 304C 1.55GHz, LingQi, Kylin OS, Shenzhen Cloud Computing Center Co., Ltd. National Supercomputing Centre in Shenzhen (NSCS) China	13,789,440	2,198.40	2,735.82	42,220
2	El Capitan - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A, Slingshot-11, TOSS, HPE DOE/NNSA/LLNL United States	11,340,000	1,809.00	2,821.10	29,685
3	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE Cray OS, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607
4	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	9,264,128	1,012.00	1,980.01	38,698
5	JUPITER Booster - BullSequana XH3000, GH Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200, Quad-Rail NVIDIA InfiniBand NDR200, RedHat Enterprise Linux , Bull EuroHPC/FZJ Germany	4,801,344	1,000.00	1,226.28	15,794
6	HPC7 - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A, Slingshot-11, RHEL 9, HPE Eni S.p.A. Italy	3,461,472	571.50	861.13	8,735
7	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Azure Microsoft Azure United States	2,073,600	561.20	846.84	
8	HPC6 - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, RHEL 8.9, HPE Eni S.p.A. Italy	3,143,520	477.90	606.97	8,461
9	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
10	Alps - HPE Cray EX254n, NVIDIA Grace 72C 3.1GHz, NVIDIA GH200, Slingshot-11, HPE Cray OS, HPE Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	2,121,600	434.90	574.84	7,124

Top 500

(country=es)

- Junio ~~2020~~ ~~2021~~ ~~2022~~ ~~2023~~

37 63 82 98	Barcelona Supercomputing Center Spain	MareNostrum - Lenovo SD530, Xeon Platinum 8160 24C 2.1GHz, Intel Omni-Path , Lenovo	153,216	6,470.8	10,296. 1	1,632
--	--	---	---------	---------	--------------	-------

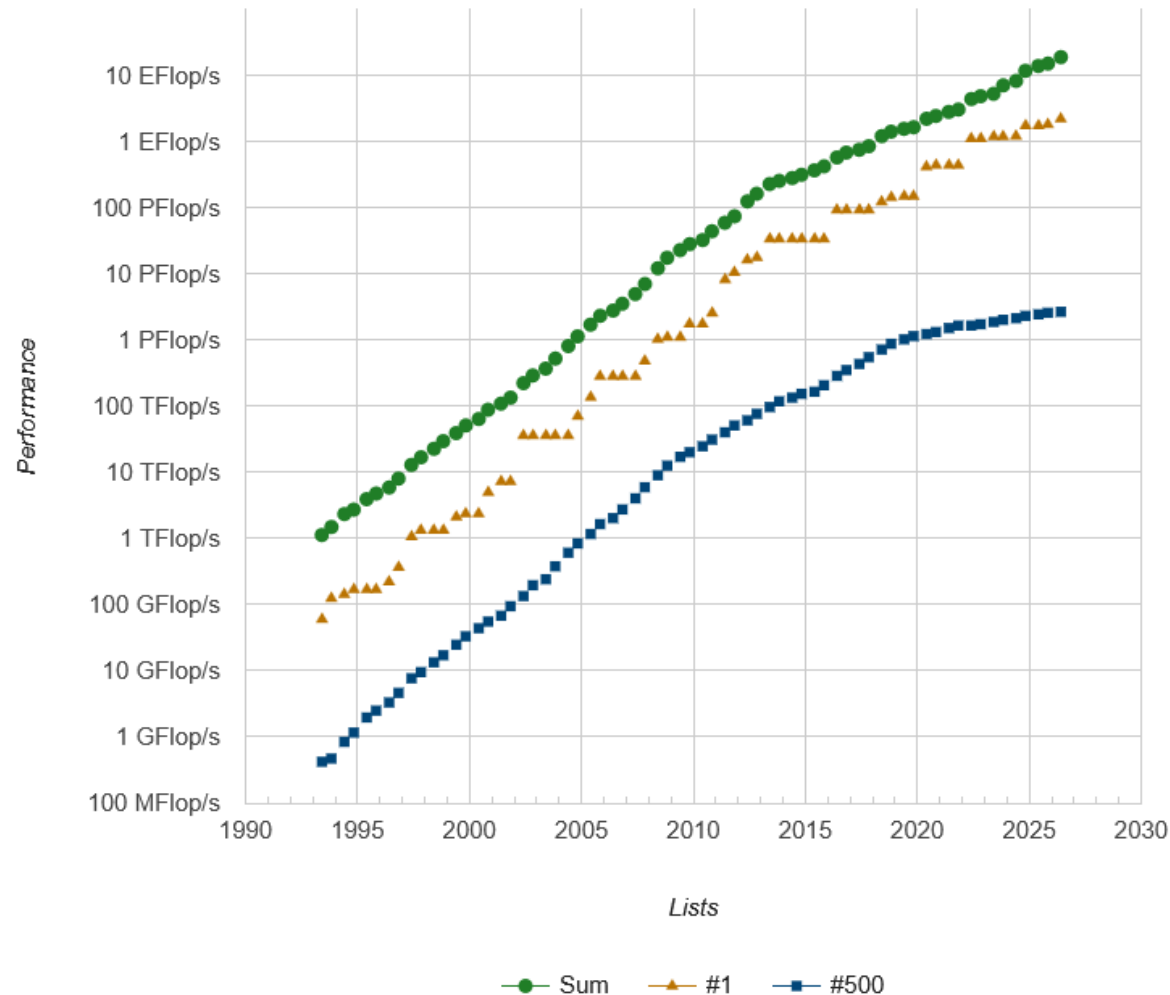
- Junio 2026

Rank	System	Cores	$R_{\max}$ (PFLOP/s)	R_{peak} (PFLOP/s)	Power (kW)
16	MareNostrum 5 ACC - BullSequana XH3000, Xeon Platinum 8460Y+ 32C 2.3GHz, NVIDIA H100 64GB, Infiniband NDR, EuroHPC/BSC	663,040	175.30	249.44	4,159
61	MareNostrum 5 GPP - ThinkSystem SD650 v3, Xeon Platinum 03H-LC 56C 1.7GHz, Infiniband NDR200 , Lenovo EuroHPC/BSC	725,760	40.10	46.37	5,753
257	MareNostrum - Lenovo SD530, Xeon Platinum 8160 24C 2.1GHz, Intel Omni-Path , Lenovo Barcelona Supercomputing Center	153,216	6.47	10.30	1,632

Top 500 Junio 2026

(<http://top500.org/statistics/perfdevel/>)

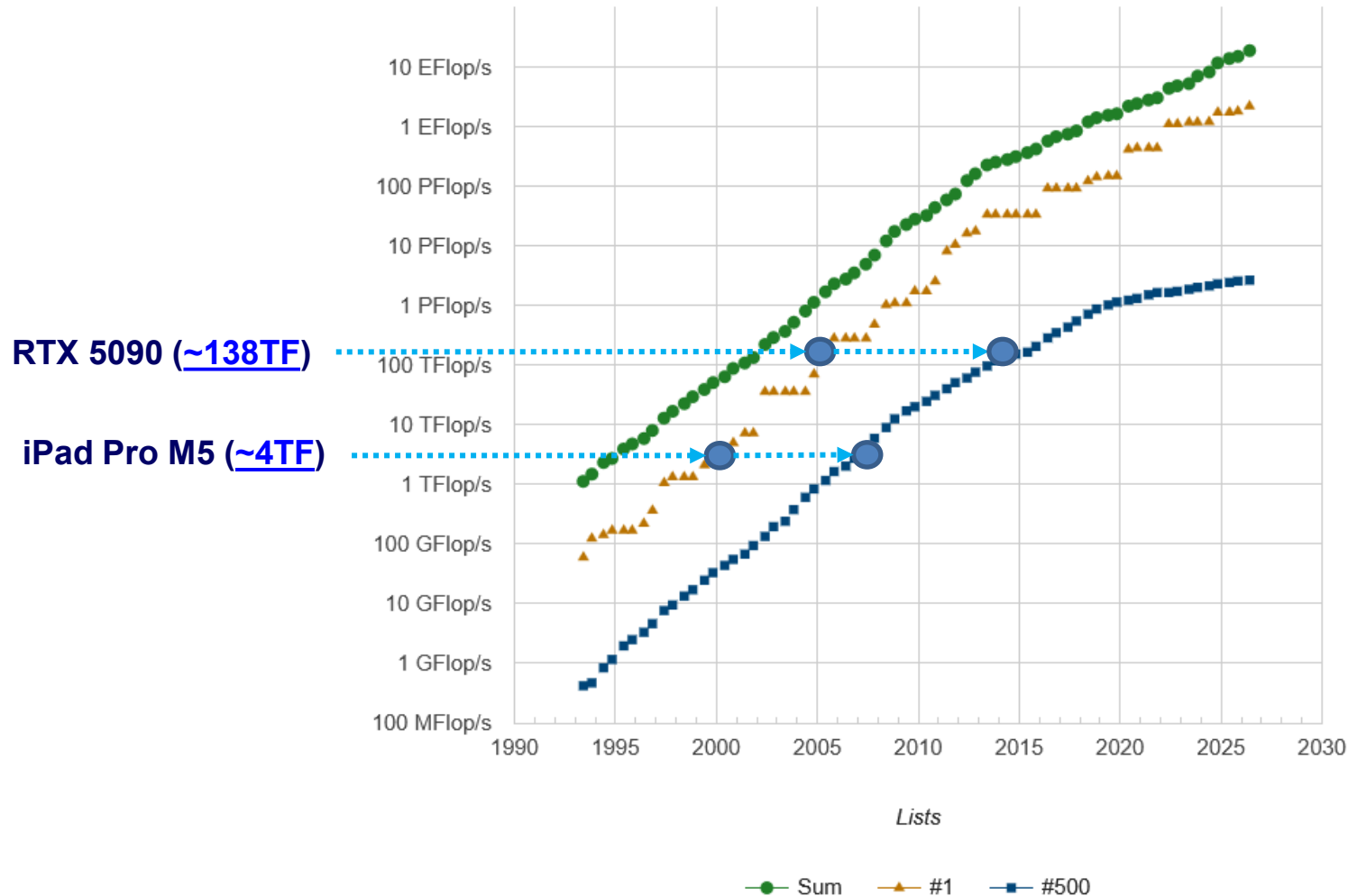
Performance Development



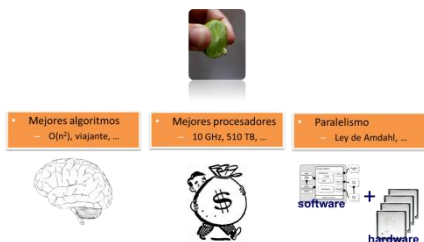
Top 500 Junio 2026

(<http://top500.org/statistics/perfdevel/>)

Performance Development

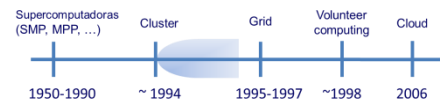


Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software



Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias



Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Problemas con gran cantidad de cómputo
- Más usado en ciencia y ejército
- Uso de paralelismo masivo



Supercomputadoras
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)



1950-1990

Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Problemas con gran cantidad de datos tratados
- Más usado en administración
- Uso de paralelismo y alta frecuencia



Supercomputadoras & Mainframes
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)



1950-1990

Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Construido por Donald Becker y Thomas Sterling en 1994 (NASA)
- Formado por 16 computadores personales con procesador intel DX4 a 200 MHz interconectados por un switch Ethernet.
- Rendimiento teórico era de 3,2 Gflops
- Posibilidad de supercomputadoras "baratas"



Supercomputadoras
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)

Cluster



Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Construido por Donald Becker y Thomas Sterling en 1994 (NASA)
- Formado por 16 computadores personales con procesador intel DX4 a 200 MHz interconectados por un switch Ethernet.
- Rendimiento teórico era de 3,2 Gflops
- Posibilidad de supercomputadoras "baratas"

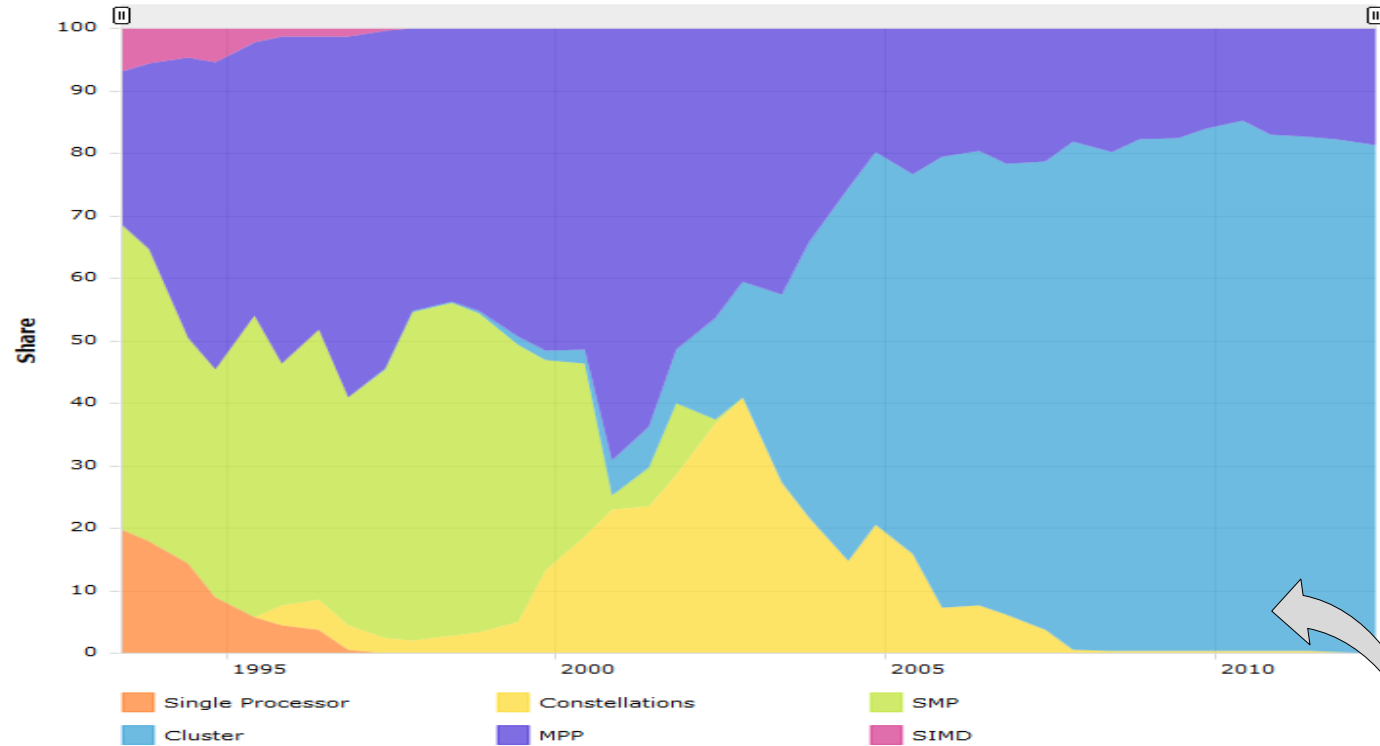


Supercomputadoras
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)

Cluster



Architecture - Systems Share



Supercomputadoras
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)

Cluster





[Click to learn more](#)

1997: THE FIRST INTEL® TERAFLUP COMPUTER
consisted of:

9,298 INTEL
PROCESSORS

and occupied:

72 SERVER
CABINETS

THE INTEL® XEON® PHI™ COPROCESSOR
will provide:

1 TERAFLUP OF
PERFORMANCE

and occupy:

1 PCIe
SLOT



Supercomputadoras
(SMP, MPP, Sistólico, Array, ...)

Cluster



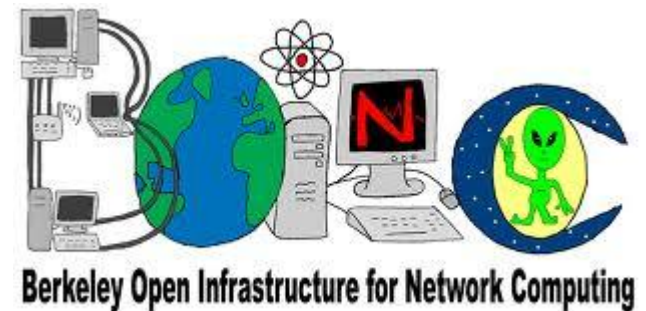
Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Antecesor: metacomputing por Larry Smarr (NCSA) al inicio de los 80
 - Centros de supercomputación interconectados: más recursos disponibles
 - I-WAY demostrado en 1995
- Grid aparece en un seminario dado en 1997 en ANL por Ian Foster y Carl Kesselman



Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Término acuñado por Luis F. G. Sarmenta (Bayanihan)
- En 1999 se lanza los proyectos SETI@home y Folding@home
- A día 5/9/2026 todos los proyectos BOINC suponen ~14,104 TeraFLOPS

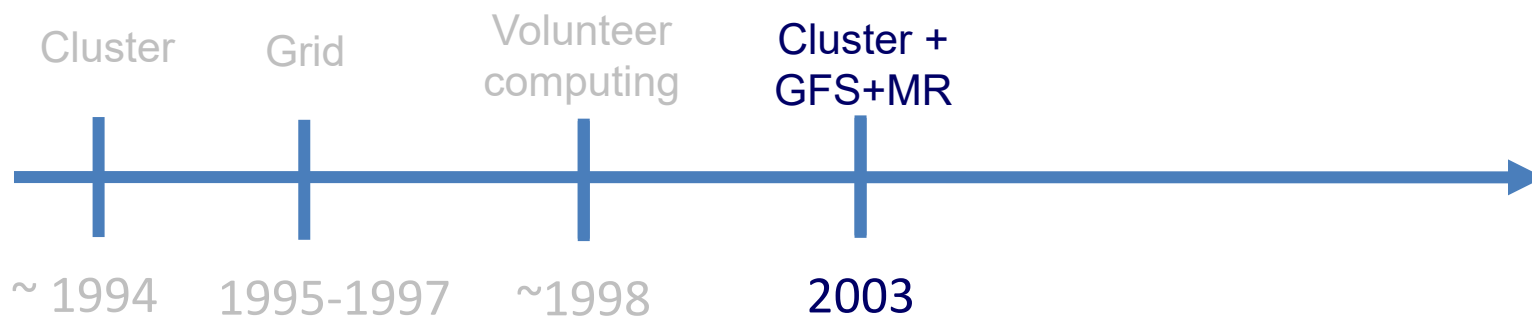


Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Google presenta:
 - MapReduce como *framework* para trabajar con grandes conjuntos de datos: la misma función se aplica a diferentes particiones de datos (map) y después estos resultados se combinan (reduce)
 - GFS como forma de almacenar petabytes de datos (ordenadores normales, distribución escalable y tolerancia a fallos)
- GFS+MR vs mainframe “similar” a cluster vs supercomputador

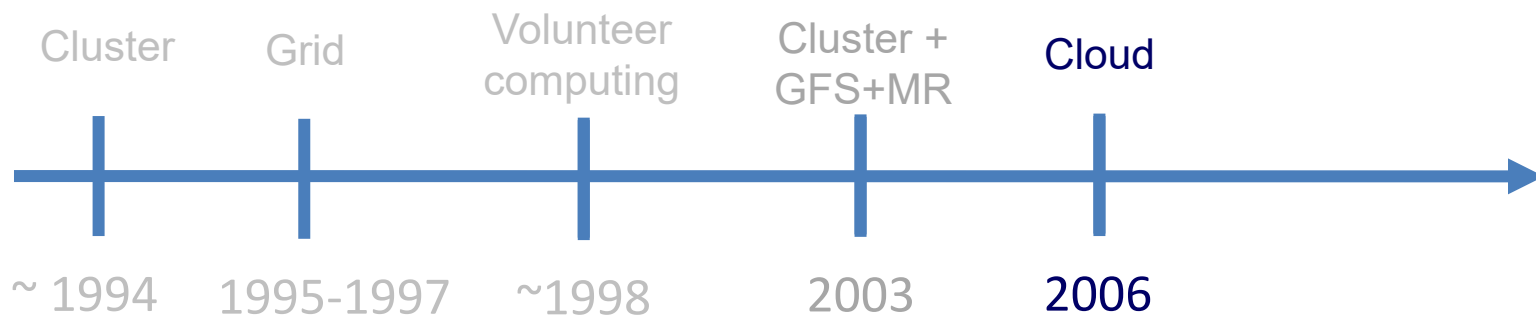
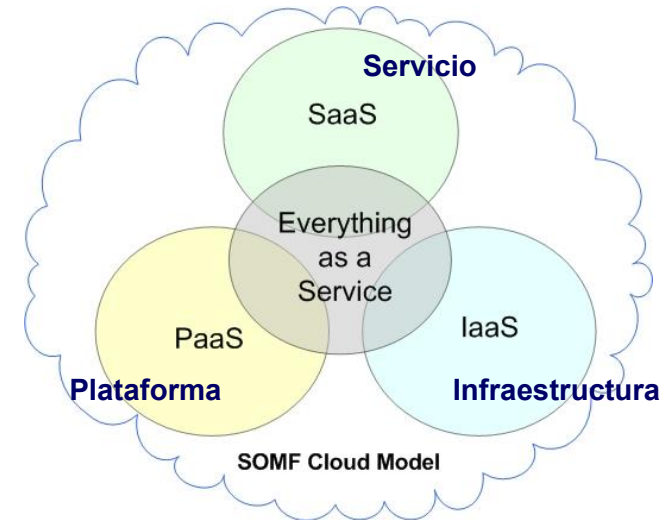


Doug Cutting
y Hadoop



Evolución en las plataformas de computación de altas prestaciones

- Amazon inspira el *Cloud computing* actual:
 - *data centers* pensando en las compras de Navidad, el resto del tiempo se usaban “poco” -> alquilar
- Principales pilares fundamentales: computación bajo demanda y virtualización
- Principales mejoras: agilidad, coste, escalabilidad, mantenimiento, ...
- **Openstack: construir un *cloud* con un cluster**

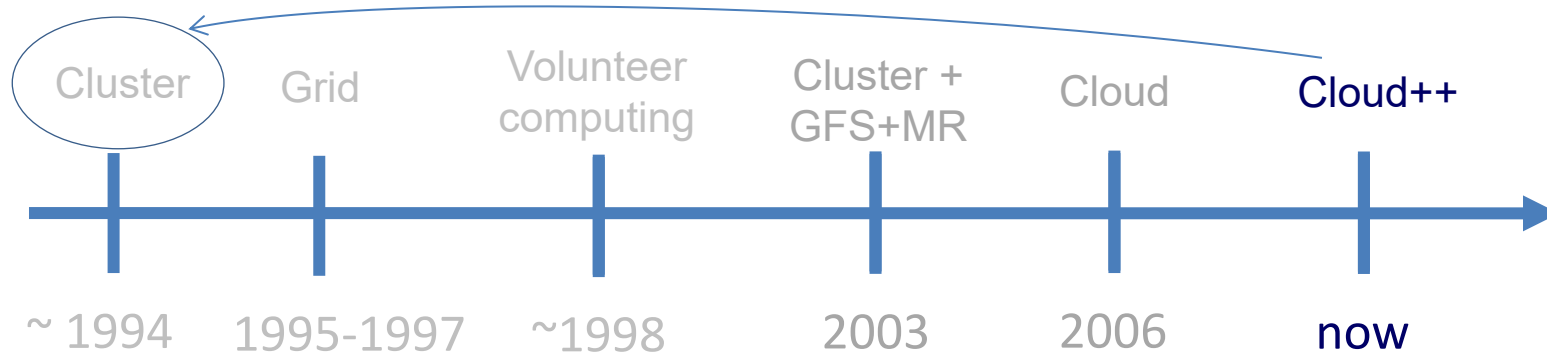
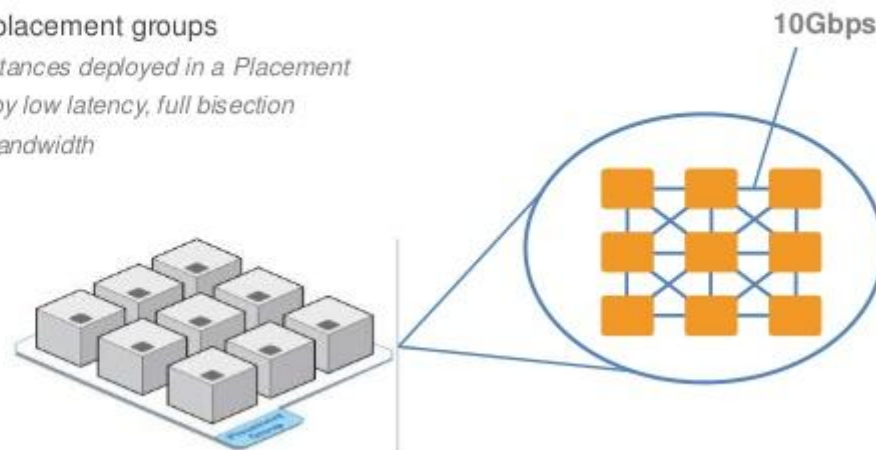


Amazon Cluster Compute Instance

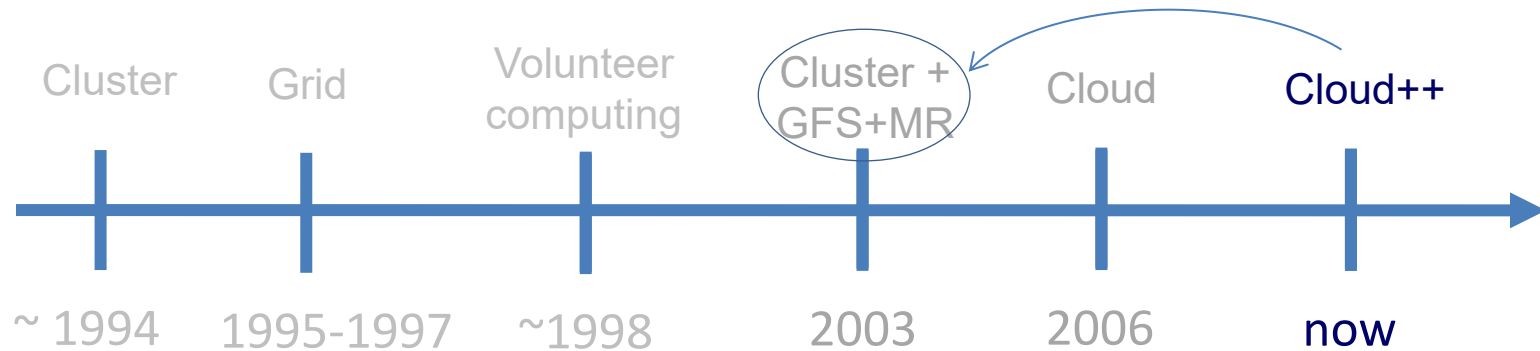
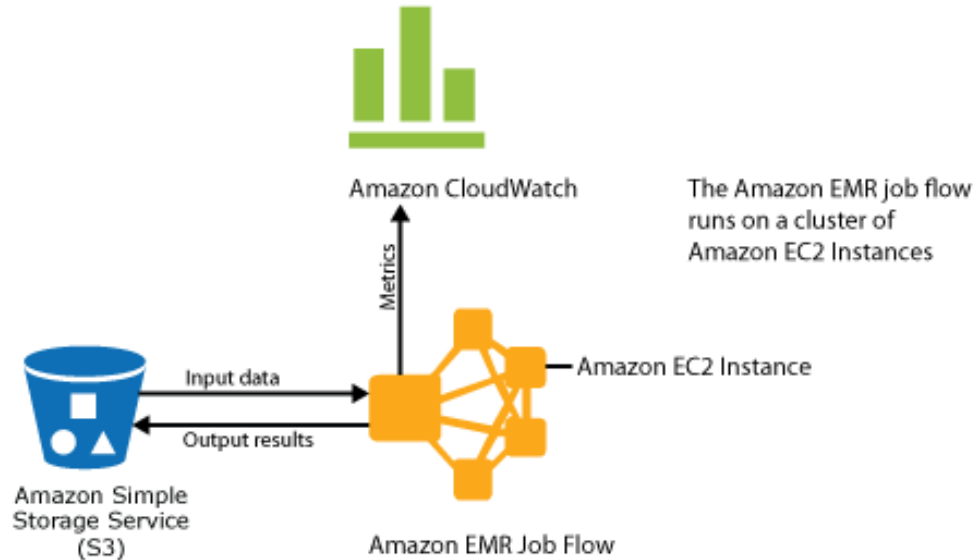
Tightly coupled

Network placement groups

Cluster instances deployed in a Placement Group enjoy low latency, full bisection 10 Gbps bandwidth



Amazon Elastic MapReduce



Nvidia DGX-320G

(<https://www.nvidia.com/es-es/data-center/dgx-2/>)

ANNOUNCING NVIDIA DGX STATION 320G

Workgroup AI Supercomputer-in-a-Box

Plug-into-the-Wall Instant AI Infrastructure

2.5 petaFLOPS

320 GB at 8 TB/sec

7.68 TB NVMe

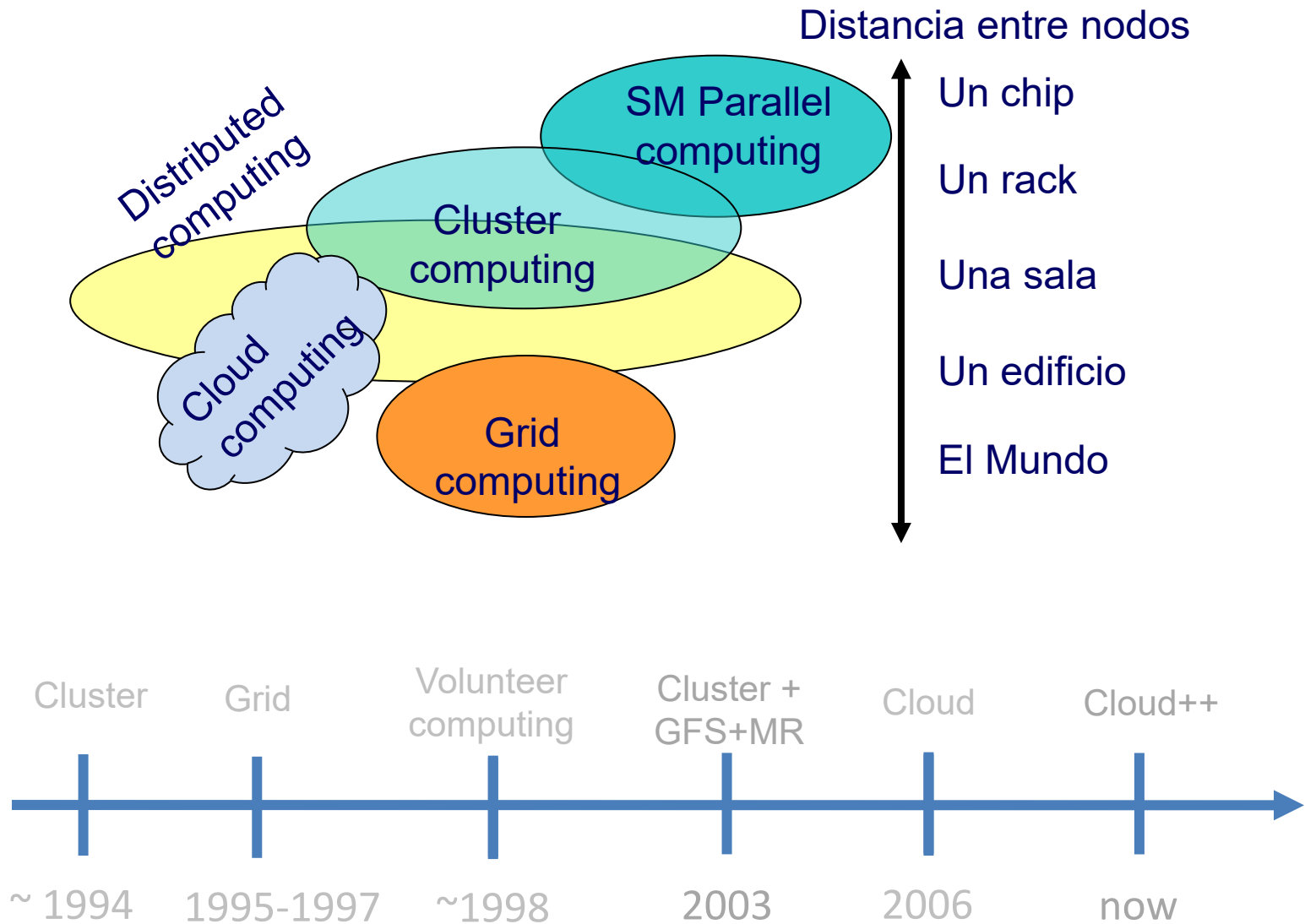
28 MIGs

1500W and < 37db

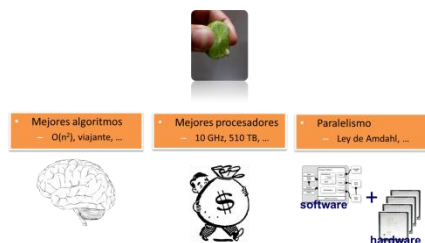
\$149,000 or \$9,000/Month Subscription



<https://wccfttech.com/nvidia-dgx-station-320g-quad-ampere-a100-gpus-with-320-gb-memory/>

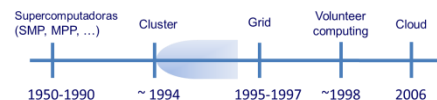


Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software



Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias



Principales tendencias



Supercomputadoras
(SMP, MPP, ...)

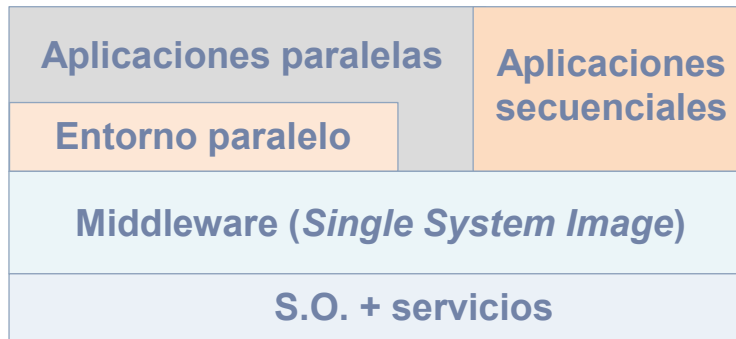
Cluster

Grid

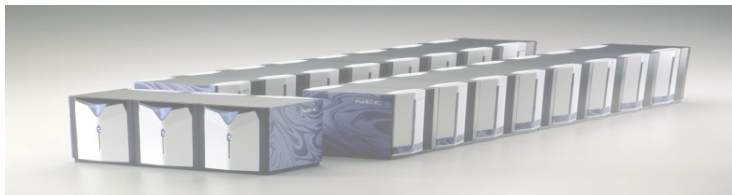
Volunteer
computing

Cloud

Plataforma



Software



Computador de altas prestaciones

Hardware



Principales tendencias



Supercomputadoras
(SMP, MPP, ...)

Cluster

Grid

Volunteer
computing

Cloud

Plataforma



Aplicaciones paralelas

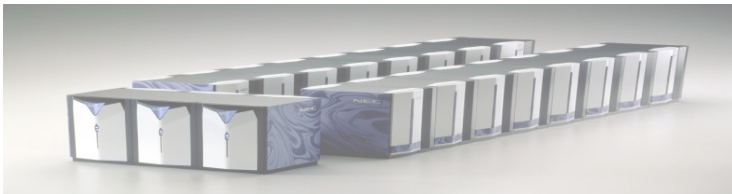
Entorno paralelo

Aplicaciones
secuenciales

Middleware (*Single System Image*)

S.O. + servicios

Software



Computador de altas prestaciones

Hardware

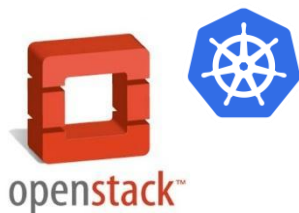




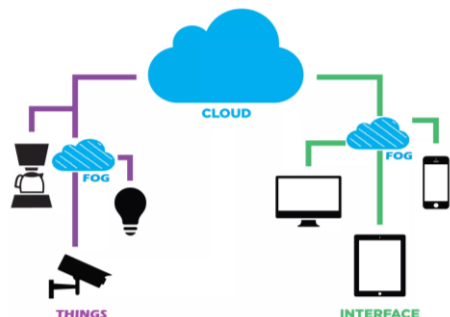
Plataforma:

uso de recursos distribuidos

- **Clouds:** empleo de recursos distribuidos alquilados bajo demanda



- **Clouds privados y públicos:** ajuste de infraestructura para minimizar gasto



- **Fog/Edge:** acercar el cloud a los dispositivos que lo usan...

<https://iot.do/ngd-openfog-fog-computing-2016-10>



Plataforma:

uso eficiente de recursos



- **Green computing:** uso de recursos distribuidos de distintas organizaciones
- **Internet computing:** uso de ordenadores personales a escala global

Norton 360 Now Comes With a Cryptominer

<https://krebsonsecurity.com/2022/01/norton-360-now-comes-with-a-cryptominer/>

January 6, 2022

110 Comments

Norton 360, one of the most popular antivirus products on the market today, has installed a cryptocurrency mining program on its customers' computers. Norton's parent firm says the cloud-based service that activates the program and allows customers to profit from the scheme — in which the company keeps 15 percent of any currencies mined — is "opt-in," meaning users have to agree to enable it. But many Norton users complain the mining program is difficult to remove, and reactions from longtime customers have ranged from unease and disbelief to, "Dude, where's my crypto?"



Plataforma:

uso eficiente de recursos



- **Green computing:** uso de recursos distribuidos de distintas organizaciones
- **Internet computing:** uso de ordenadores personales a escala global



<https://x.com/NVIDIARTXSpark/status/2095580592704217349?s=20>

Principales tendencias



Supercomputadoras
(SMP, MPP, ...)

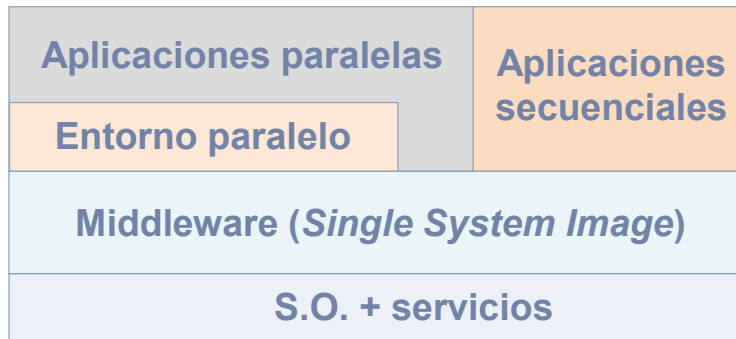
Cluster

Grid

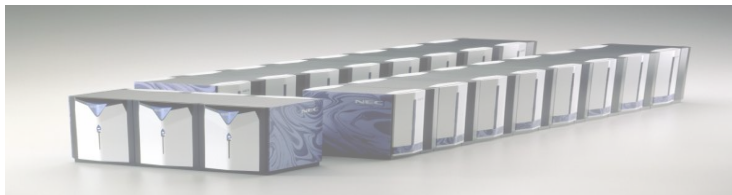
Volunteer
computing

Cloud

Plataforma



Software

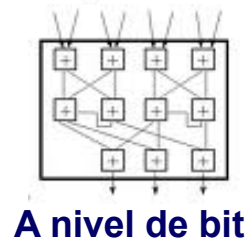


Computador de altas prestaciones

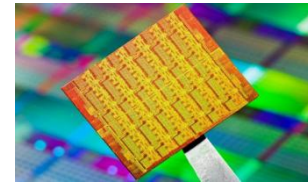
Hardware



Hardware



**A nivel de
instrucción**

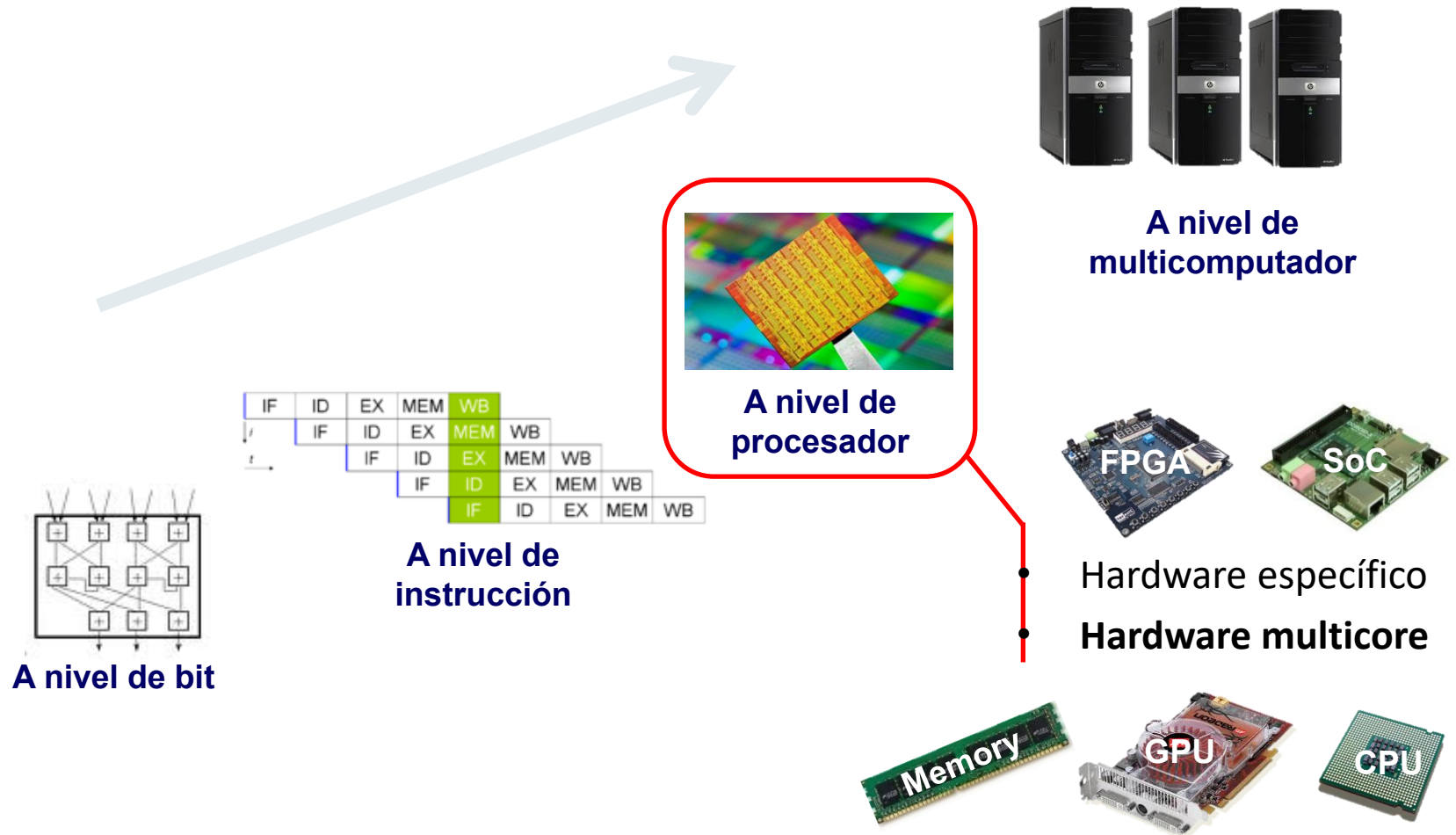


**A nivel de
procesador**



**A nivel de
multicomputador**

Hardware





Hardware:

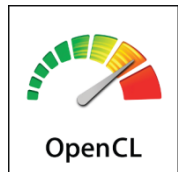
más procesadores y cores heterogéneos

- **Tarjetas gráficas:** uso de la capacidad de procesamiento de las potentes tarjetas gráficas actuales



- **CUDA:**

Entorno de programación para poder usar la potencia de las tarjetas gráficas de NVidia



- **OpenCL:**

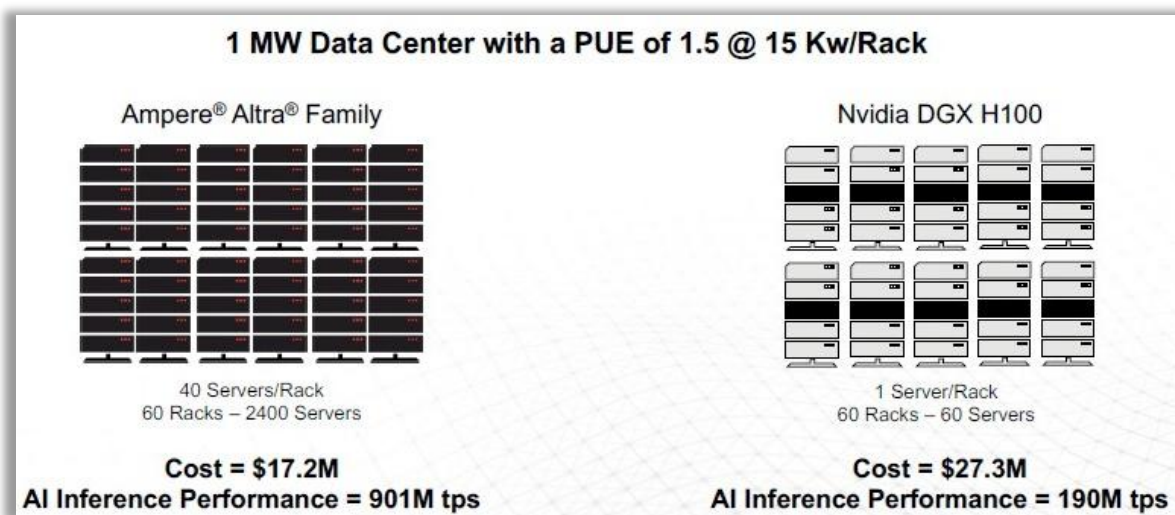
lenguaje basado en C99 extendido para operaciones vectoriales y eliminando ciertas funcionalidades



Hardware:

más procesadores y cores heterogéneos

- **Procesadores heterogéneos:**
gran cantidad de procesadores con
coprocesadores especializados



- <https://www.servethehome.com/this-is-ampere-ampereone-a192-32x-a-192-core-arm-server-cpu-arm/>
- <https://www.nextplatform.com/2024/04/16/ampere-readies-256-core-cpu-beast-awaits-the-ai-inference-wave/>



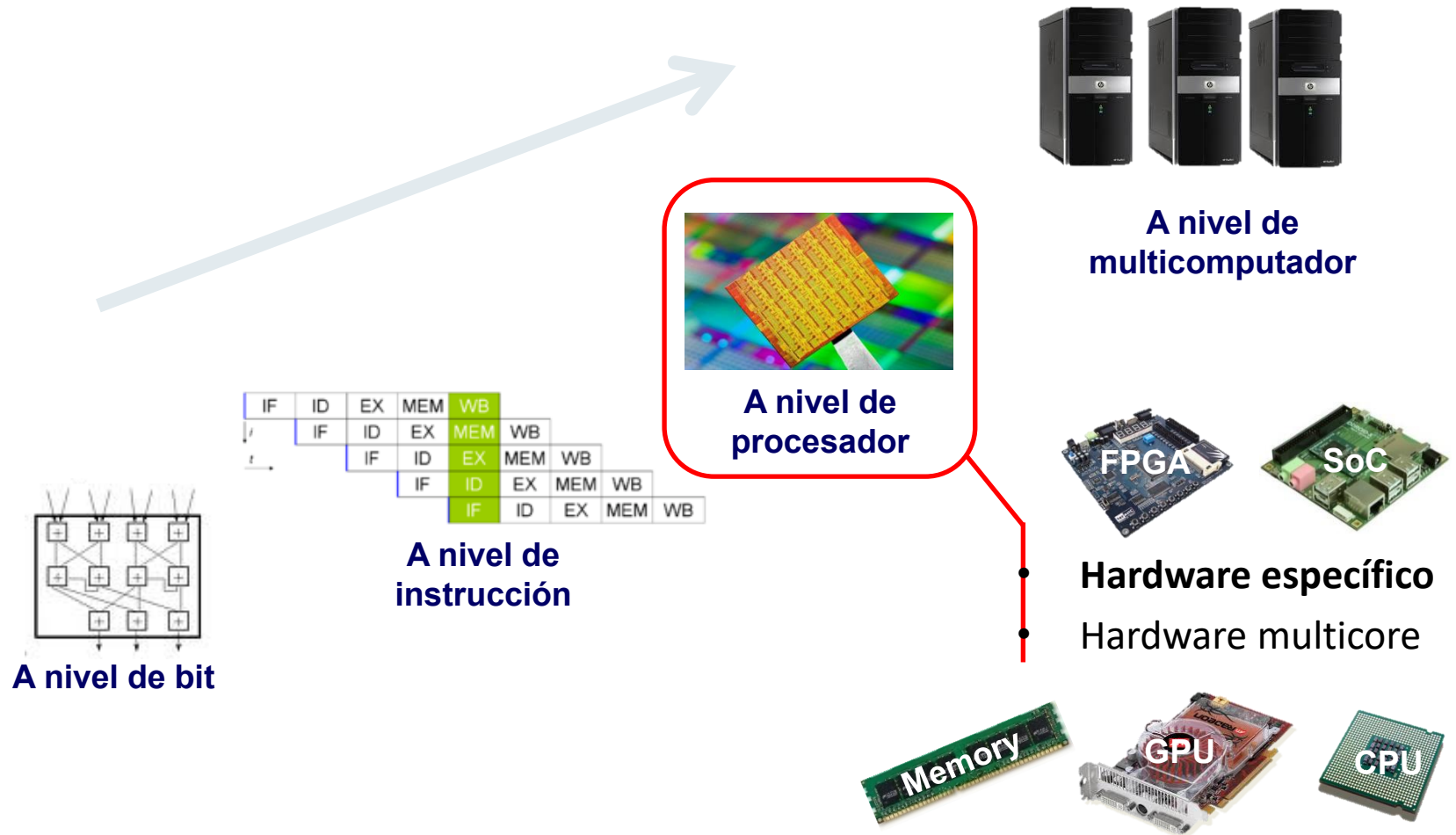
Hardware:

más procesadores y cores heterogéneos

- **Procesadores heterogéneos:**
gran cantidad de procesadores con coprocesadores especializados
 - <memoria compartida>:
OpenMP, OpenACC, OpenCL
 - <paso de mensaje>:
MPI

- <https://www.servethehome.com/this-is-ampere-ampereone-a192-32x-a-192-core-arm-server-cpu-arm/>
- <https://www.nextplatform.com/2024/04/16/ampere-readies-256-core-cpu-beast-awaits-the-ai-inference-wave/>

Hardware





Hardware:

“memoria” con capacidad de cómputo

- **Memoria “activa”:**
computo simple en la propia memoria

Planted Motif Search Problem	Automata Processor	UConn - BECAT Hornet Cluster
Processors	48 (PCIe Board)+CPU	48 CPU (Cluster/OpenMPI)
Power	245W-315W ¹	>2,000W ¹
Cost	TBD	~\$20,000 ¹
Performance (25,10)	12.26 minutes ²	20.5 minutes
Performance (26,11)	13.96 minutes ²	46.9 hours
Performance (36,16)	36.22 minutes ²	Unsolved

- Planted Motif Search problem is a leading problem in bioinformatics and is NP Hard. Attempts to find common genomic sequences in noisy data.
- Solutions involving high match lengths and substitution counts are often presented to HPC clusters for processing.
- Independent research predicts the Micron Automata Processor significantly outperforms a multi-core HPC cluster in speed, power and estimated cost.

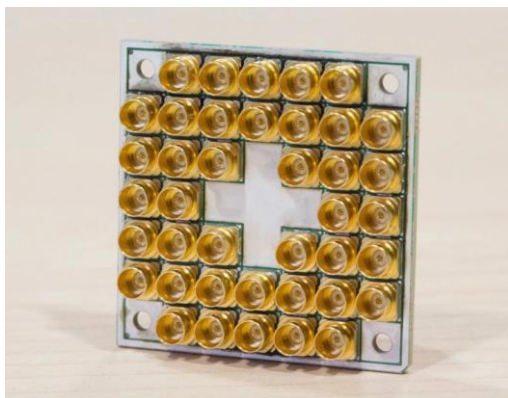
¹ Micron Technology Estimates, Not including Memory of 4GB DRAM /Core

² Research conducted by Georgia Tech (Roy/Aluru)



Hardware:

qubit-chip



- “...While quantum computers promise greater efficiency and performance to handle certain problems, they won’t replace the need for conventional computing or other emerging technologies like [neuromorphic computing](#). We’ll need the technical advances that Moore’s law delivers in order to invent and scale these emerging technologies...”

Principales tendencias



Supercomputadoras
(SMP, MPP, ...)

Cluster

Grid

Volunteer
computing

Cloud

Plataforma



Aplicaciones paralelas

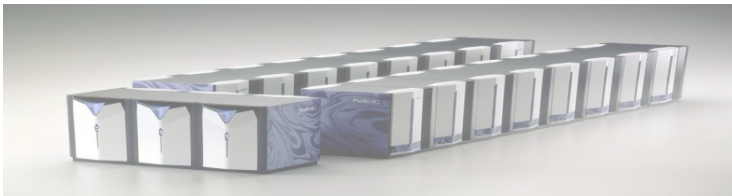
Entorno paralelo

Aplicaciones
secuenciales

Middleware (*Single System Image*)

S.O. + servicios

Software



Computador de altas prestaciones

Hardware





Software

Vectoriales

SSE, AVX, AVX2, ...

Multiprocesador

UMA, NUMA

OpenMP,

iTBB, ...

M. Distribuida

MPI,...

Map-reduce

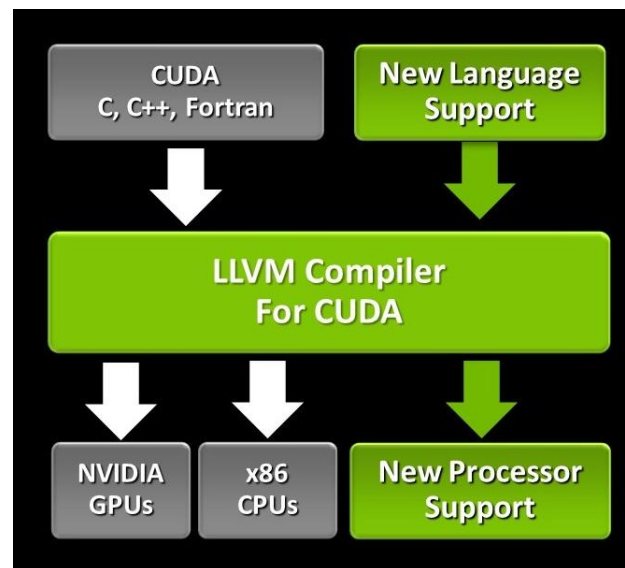
- **Integrar soluciones vectoriales y multiprocesador (dentro de las herramientas de desarrollo)**



Ejemplo:

CUDA/LLVM adaptado a nuevos entornos

- CUDA Compiler SDK
- Versión de Clang/LLVM con:
 - Generación de código para GPU
 - Compilación con CUDA
- Soporte para:
 - MacOS
 - Windows
 - Linux (algunos)



▪ <http://developer.nvidia.com/cuda/cuda-llvm-compiler>



Software

Vectoriales

SSE, AVX, AVX2, ...

Multiprocesador

UMA, NUMA

OpenMP,
iTBB, ...

M. Distribuida

MPI,...

Map-reduce

- Integrar soluciones vectoriales y multiprocesador (dentro de las herramientas de desarrollo)
- **Integrar soluciones de memoria compartida y paso de mensaje con ayuda del sistema operativo.**



Ejemplo:

MPI x: adaptación a requisitos actuales

- Programación híbrida
- Tolerancia a fallos
- Acceso remoto a memoria
- Comunicación colectiva y topología
- Soporte de herramientas
- Persistencia
- Compatibilidad hacia atrás



Software

Vectoriales

SSE, AVX, AVX2, ...

Multiprocesador

UMA, NUMA

OpenMP,

iTBB, ...

M. Distribuida

MPI,...

Map-reduce

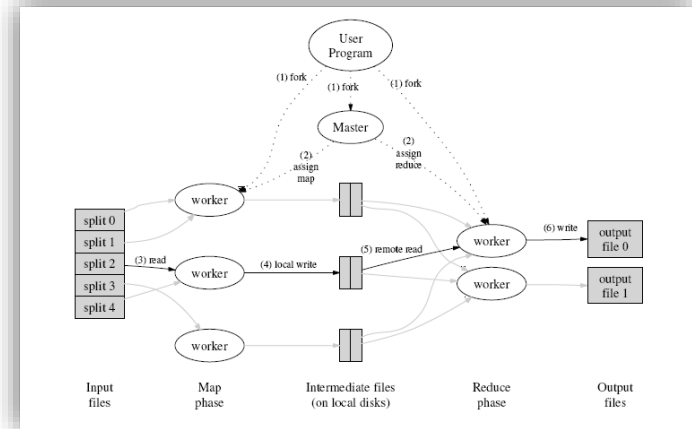
- Integrar soluciones vectoriales y multiprocesador (dentro de las herramientas de desarrollo)
- Integrar soluciones de memoria compartida y paso de mensaje con ayuda del sistema operativo.
- **Buscar perfiles simplificados que permitan la mayor escalabilidad posible.**



Sistemas distribuidos:

Computación de altas prestaciones

- Google:
 - Modelo MapReduce



- Sistemas de ficheros de Google
- Algoritmos de clasificación (K-Means + Canopy)

- <http://code.google.com/edu/parallel/mapreduce-tutorial.html>
- <http://code.google.com/edu/submissions/mapreduce-minilecture/listing.html>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/MapReduce>



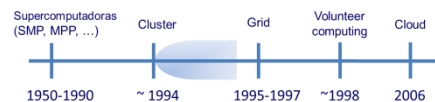
Aplicaciones:

Adaptación a computación de altas prestaciones

- Ejemplos:
 - Primal and dual-based algorithms for sensing range adjustment in WSNs
 - The unified accelerator architecture for RNA secondary structure prediction on FPGA
 - Protein simulation data in the relational model
 - Dynamic learning model update of hybrid-classifiers for intrusion detection

▪ <http://www.springer.com/computer/swe/journal/11227>

Agenda



Introducción a la computación de altas prestaciones

- Qué, dónde y cómo
- Hardware y software

Evolución de la computación de altas prestaciones

- Plataformas
- Tendencias



Bibliografía

- **Parallel Computer Architectures: a Hardware/Software Approach.**
D.E. Culler, J.P. Singh, with A. Gupta
 - Capítulo 1
- **Organización y Arquitectura de Computadores (5ta. ed.)**
William Stallings
 - Capítulo 16: Procesamiento Paralelo.
- **Organización de Computadoras (4ta. ed.)**
Andrew S. Tanenbaum
 - Capítulo 8: Arquitecturas de computadoras paralelas.

Bibliografía

- **GPU + CPU**
 - <http://www.hardwarezone.com.ph/articles/view.php?cid=3&id=2786>
- **Cluster**
 - <http://www.democritos.it/~baro/slides/LAT-HPC-GRID-2009/Part1.pdf>
- **TOP500 Supercomputer Sites**
 - <http://www.top500.org/>
- **Beowulf**
 - <http://www.beowulf.org/overview/index.html>

Sistemas Paralelos y Distribuidos

Félix García Carballeira

Alejandro Calderón Mateos

Sistemas de altas prestaciones en entornos distribuidos

