

DESARROLLO DE SOFTWARE EN ARQUITECTURAS PARALELAS

Josep Arnal Garcia



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Dpnt. de Ciència de la Computació i Intel·ligència *a*rtificial
Dpto. de Ciencia de la Computación e Inteligencia *a*rtificial



Grupo de Computación de
Altas Prestaciones y Paralelismo

DESARROLLO DE SOFTWARE EN ARQUITECTURAS PARALELAS

1. Motivación y aspectos de la programación paralela.
2. Tipos de sistemas paralelos. Paradigmas de programación paralela.
3. Conceptos básicos y medidas de paralelismo.
4. Diseño de programas paralelos.
5. La interface de paso de mensaje: el estándar MPI.
6. Paralelización de algoritmos: ejemplos y aplicaciones.

DESARROLLO DE SOFTWARE EN ARQUITECTURAS PARALELAS

1. Motivación y aspectos de la programación paralela.
 - Necesidades de la computación en paralelo.
 - Aplicaciones.
 - ¿Dónde se realiza cómputo en paralelo?
2. Tipos de sistemas paralelos. Paradigmas de programación paralela.
3. Conceptos básicos y medidas de paralelismo.
4. Diseño de programas paralelos.
5. La interface de paso de mensaje: el estándar MPI.
6. Paralelización de algoritmos: ejemplos y aplicaciones.

Necesidades de la computación en paralelo

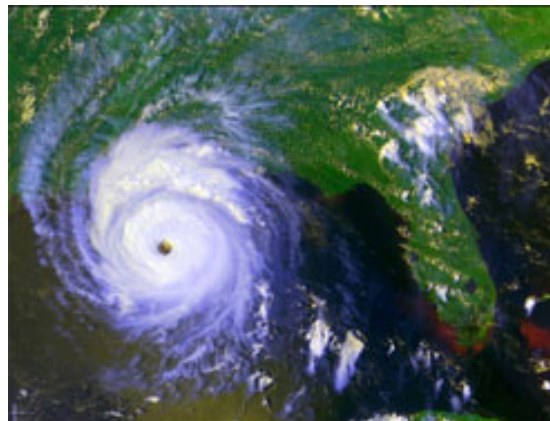
- DEMANDA:
 - Computadores con gran potencia de calculo.
 - Velocidad en la computación.
 - Problemas con complejidad elevada:
 - Problemas de gran dimensión: coste polinomial de grado alto o aplicabilidad a grandes problemas.
 - Problemas de tiempo real.
 - Problemas de gran desafío: gran importancia social. Estudio del genoma humano, predicción meteorológica mundial, modelado fenómenos sísmicos, ...

Necesidades de la computación en paralelo

- LIMITACIONES de la computación secuencial:
 - Restricciones lógicas:
 - **Complejidad intrínseca de los algoritmos.**
 - **Problemas de gran dimensión.**
 - Problemas que requieren PetaFLOPS (10^{15} FLOPS) y PetaBytes en recursos computacionales (ver por ejemplo “Grand Challenge” en.wikipedia.org/wiki/Grand_Challenge).
 - Web search engines: se procesan millones de datos por segundo.
 - Problemas en tiempo real.



Formación de galaxias



Cambio global



Predicción climatológica

Necesidades de la computación en paralelo

- LIMITACIONES de la computación secuencial:
 - Restricciones tecnológicas:
 - Velocidad de transmisión: La velocidad de un computador secuencial depende directamente de cómo los datos se mueven a través del hardware. Los límites absolutos son la velocidad de la luz (30 cm/nanoseg) y el límite de transmisión del cable de cobre (9cm/nanoseg). Un incremento de velocidad necesita de un incremento en la proximidad de los elementos de proceso.
 - Límite de integración: Cerca del límite máximo, aunque la ley de Moore (el número de transistores integrados por unidad de silicio se dobla cada 18 meses, 1965) se ha mantenido precisa durante un largo tiempo.
 - Estancamiento en los incrementos de la frecuencia de reloj (del orden de unos pocos nanosegundos). Más frecuencia → Más consumo + Temperaturas muy elevadas + interferencia electromagnética.
 - Limitaciones económicas:
 - Es considerablemente muy caro hacer que un único procesador sea más rápido. Es mucho menos caro utilizar un número mayor de procesadores para conseguir el mismo propósito (o incluso mejorarlo).

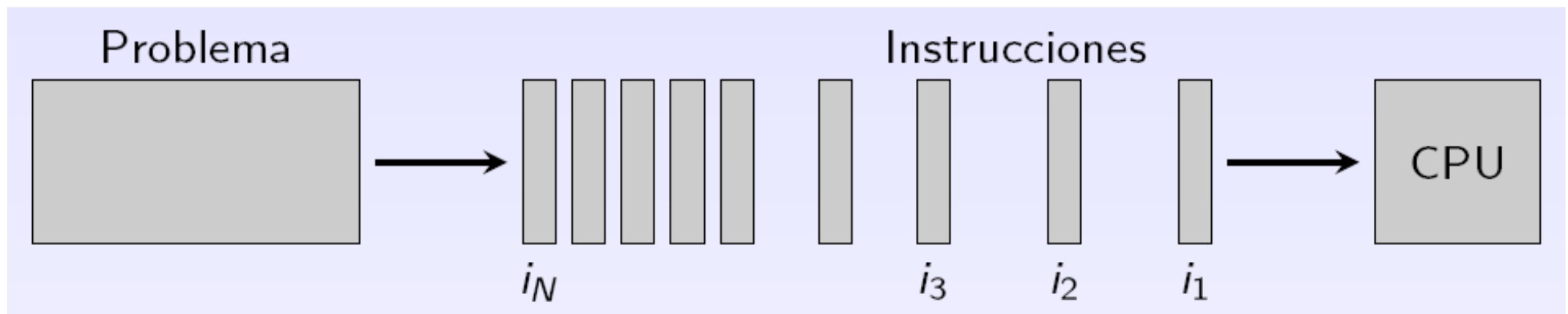
Necesidades de la computación en paralelo

- **SOLUCIONES:**
 - De tipo software: mejoras en los algoritmos.
 - De tipo hardware: mejoras en la tecnología de computadores (mayor rapidez de instrucciones, dispositivos electrónicos más rápidos, ...)
 - Paralelismo: replicar unidades de tratamiento de información con el objetivo de repartir tareas entre las mismas.

Necesidades de la computación en paralelo

Tradicionalmente los programas se han desarrollado para el cálculo en serie:

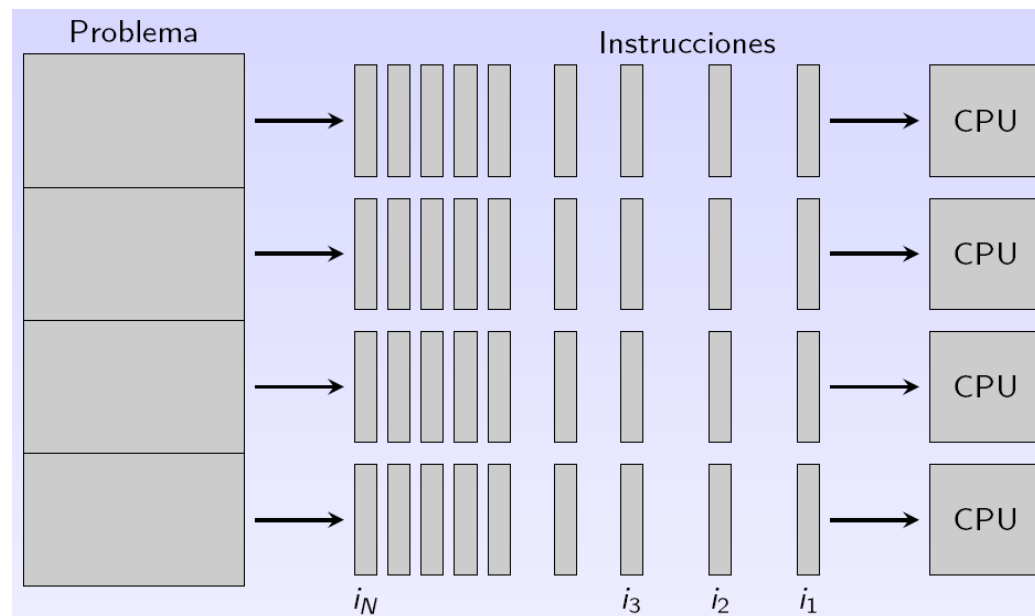
- Funcionan en un ordenador con una única CPU.
- Un problema es dividido en un conjunto de instrucciones.
- Las instrucciones se ejecutan secuencialmente.
- Únicamente una instrucción es ejecutada cada vez.



Necesidades de la computación en paralelo

El cálculo en paralelo consiste en usar múltiples recursos simultáneamente para resolver un problema dado:

- Hace uso de un ordenador con varias CPUs.
- El problema es dividido en partes independientes.
- Cada parte es dividida en un conjunto de instrucciones.
- Las instrucciones son ejecutadas secuencialmente.
- Las partes son resueltas simultáneamente.



Necesidades de la computación en paralelo

- **Paralelismo:**
 - **Computador paralelo:** Capaz de ejecutar varias instrucciones simultáneamente.
 - **Computación paralela:** Uso de varios procesadores trabajando juntos para resolver una tarea común:
 - Cada procesador trabaja en una porción del problema.
 - Los procesos pueden intercambiar datos, a través de las direcciones de memoria compartidas o mediante una red de interconexión.
 - A las arquitecturas de este tipo se las denomina **Arquitecturas Paralelas**.

Necesidades de la computación en paralelo

Ejemplo: Ordenar un conjunto de libros

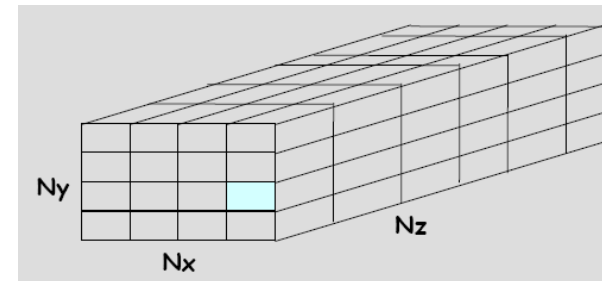
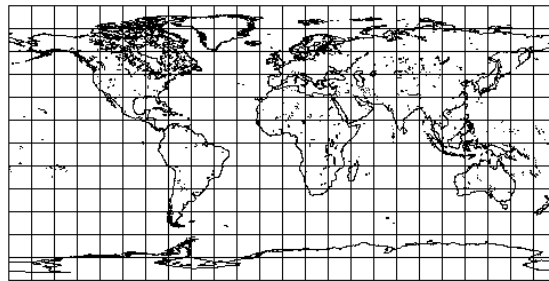
- Libros organizados en **estantes**.
- Estantes agrupados en **estanterías**.
- **Una persona** → Velocidad limitada.
- **Varias personas** → Enfoques:
 - Repartir libros entre trabajadores + ordenación simultánea.
 - Trabajadores deben desplazarse.
 - Repartir libros y estanterías.
 - Si un trabajador encuentra un libro suyo lo almacena.
 - Si no, lo pasa al responsable.



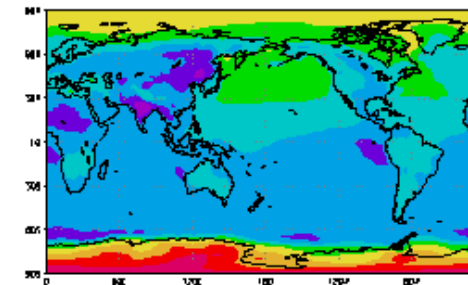
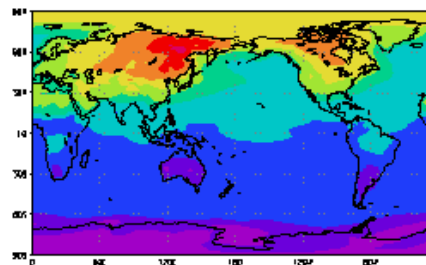
- **Aspectos de la solución paralela:**
 - **Descomposición:** La tarea se divide en subtareas.
 - **Asignación:** Las tareas se asignan a trabajadores.
 - **Comunicación:** Los trabajadores deben cooperar.
 - **Diferentes soluciones paralelas** de un problema.

Aplicaciones

- Modelado predictivo y simulaciones.
- Ejemplo: modelado del clima:
 - Mallado de $N_x = N_y = 3000$ Kms, $N_z = 11$ kms.
 - Dominio descompuesto en segmentos cúbicos $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \approx 10^{11}$ segmentos.

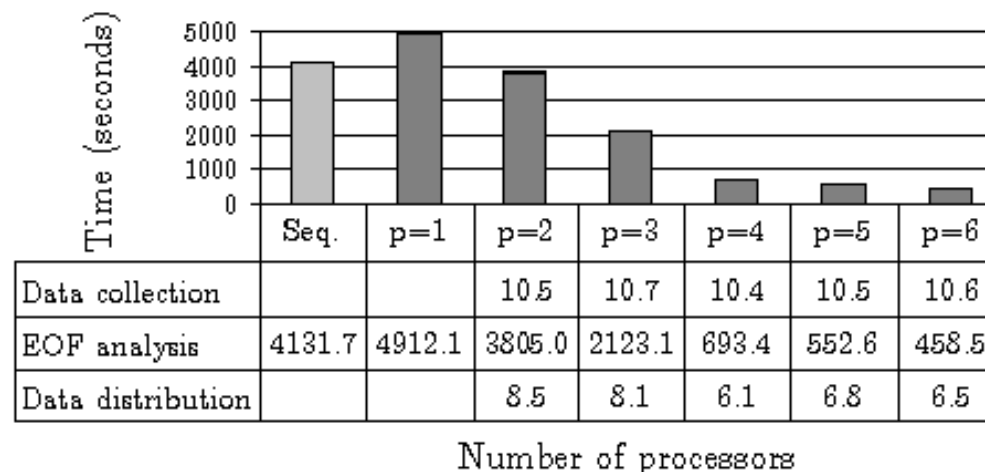


- Evolución temporal (2 días): recálculo segmento en paso de tiempo (30 min.) \rightarrow 100 operaciones.



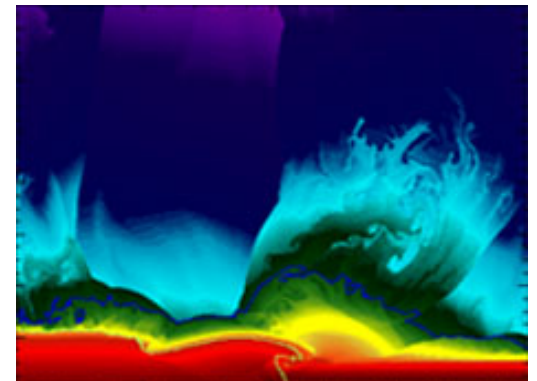
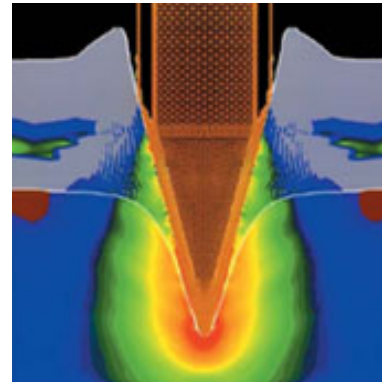
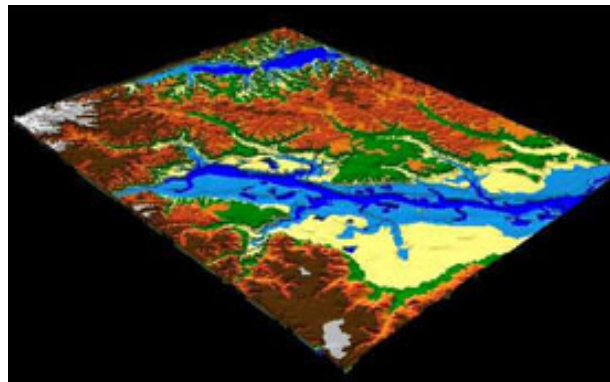
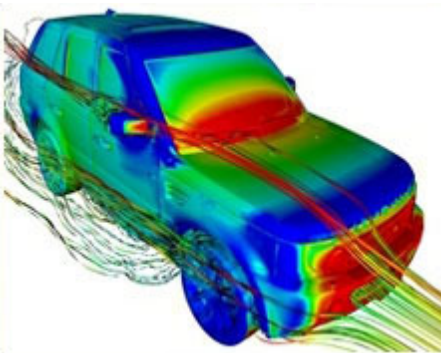
Aplicaciones

- Modelado predictivo y simulaciones.
- Ejemplo: modelado del clima:
 - Ordenador secuencial 10^9 inst./seg $\rightarrow \approx 12$ días !
 - Ordenador paralelo con 1000 procesadores: resolución en **menos de 3 horas**.
 - Ventajas paralelismo:
 - Resolución problemas antes “irresolubles”.
 - Mallado más fino para incrementar la precisión.



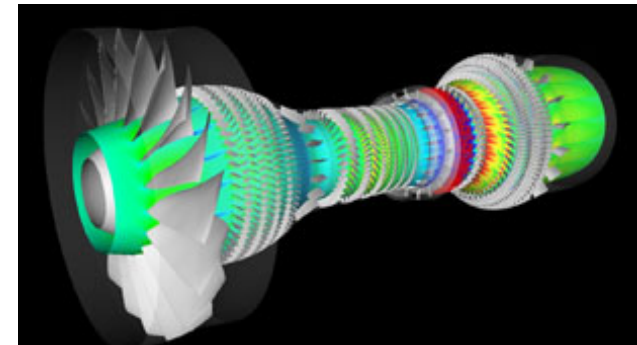
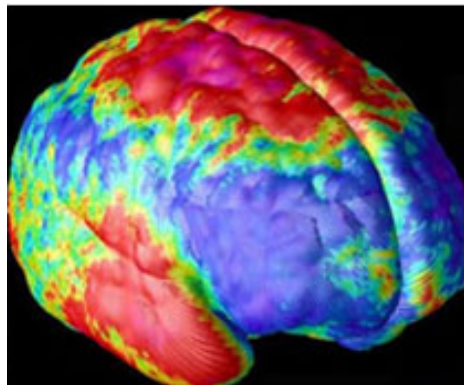
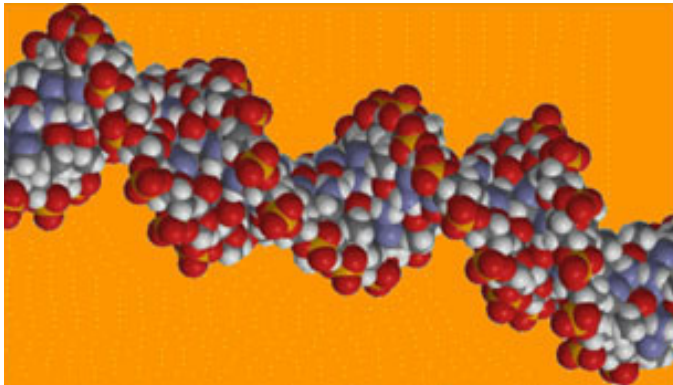
Aplicaciones

- Diseño y automatización de proyectos de ingeniería.
 - Aerodinámica computacional.
 - Inteligencia artificial y automatización:
 - Procesado de imágenes, reconocimiento de patrones, comprensión del habla, deducción automática, robótica inteligente, sistemas expertos, ...
 - Aplicaciones de detección remota.
- Exploración de recursos energéticos: exploración sísmica, modelado de yacimientos, energía de fusión en plasmas, ...



Aplicaciones

- Investigación médica: tomografía asistida por computador, ingeniería genética, genoma humano, ...
- Investigación de armamentos y defensa.
- Problemas de investigación básica: química, mecánica cuántica, dinámica de fluidos, ...



Aplicaciones

(en medianas empresas)

- Uso de computación de altas prestaciones para el diagnostico temprano de fallos en turbinas de gas.
- Control de calidad de discos ópticos defectuosos.
 - Control de defectos visual realizado por especialistas.
 - Tiempo por disco: 3 minutos.
 - Control automático sobre un cluster de PC's usando PVM: control de calidad en menos de 1 minuto.

Aplicaciones

(en medianas empresas)

- Proyecto PARSAR: Procesamiento rápido y barato de imágenes SAR (Radar de apertura sintética).
 - Permite obtener imágenes terrestres desde satélites incluso a través de cielos nublados.
 - Problema: retraso entre la adquisición de datos y su procesamiento (≈ 1 mes).
 - Complejidad de los algoritmos de procesado.
 - Distancia entre las estaciones receptoras de los datos y los centros de procesamiento.
 - Solución: uso de paralelismo en las propias estaciones receptoras para minimizar tiempo de proceso.

Aplicaciones

(en medianas empresas)

- **Proyecto PCECOWATER: Modelado eficiente de corrientes en entornos medioambientales.**
 - Adaptación de código secuencial para su funcionamiento en redes de ordenadores.
- **Proyecto HIPEROAD: Diseño aerodinámico de coches.**
 - Diseño de un coche: especialista propone diseño inicial, construcción de uno o varios modelos a escala, prueba experimental, modificaciones aerodinámicas, construcción modelo a escala natural, prueba en tunel de viento.
 - En HIPEROAD se desarrolló un entorno de simulación para diseñar y optimizar automáticamente la geometría de un coche usando paralelismo.
 - Usado, por ejemplo, en el diseño preliminar de un modelo de coche deportivo similar al Ferrari 550 Maranello.

Aplicaciones

(más cercanas)

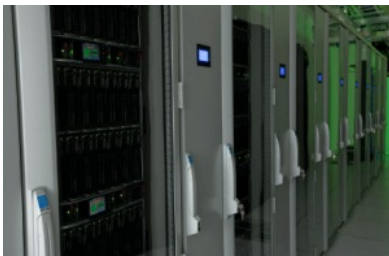
- Efectos especiales de Titanic (1997):
 - 160 433MHz DEC Alpha systems (Carrera Computers of Newport Beach, California) con una conexión Ethernet a 100Mbps.



Aplicaciones

(más cercanas)

- **Efectos especiales de Avatar (2009):**
 - 4.352 servidores HP Proliant BL2x220c G5 Blade con GNU/Linux.
 - 40.000 procesadores (refrigerados por agua).
 - 104 Terabytes de RAM.
 - Para la película se procesaron 12 MB/frame \rightarrow 288 MB/s \rightarrow 17,3 GB/m
 - Las 24 horas del día \rightarrow 1,3-1,4 millones de tareas \rightarrow Procesando 708 GB/s.



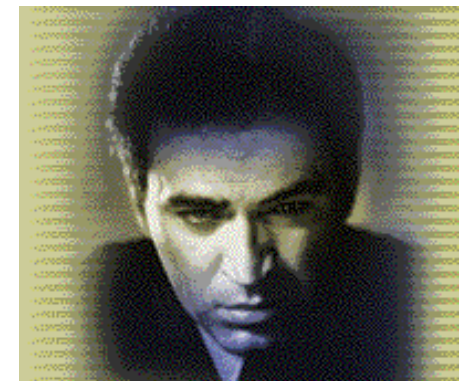
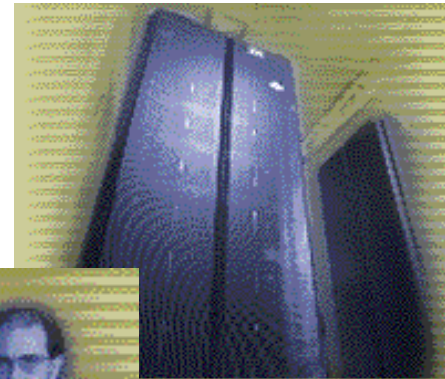
More than 4,000 HP blades power the processing at Weta Digital. Photo courtesy of Weta Digital.

Water-cooling of racks keep energy costs surprisingly low at Weta. Photo courtesy of Weta Digital.

Aplicaciones

(más cercanas)

- Derrota de Kasparov frente a Deep Blue (1996-1997):
 - 2 frames IBM RS/6000 con 48 procesadores.



Aplicaciones

(más cercanas)

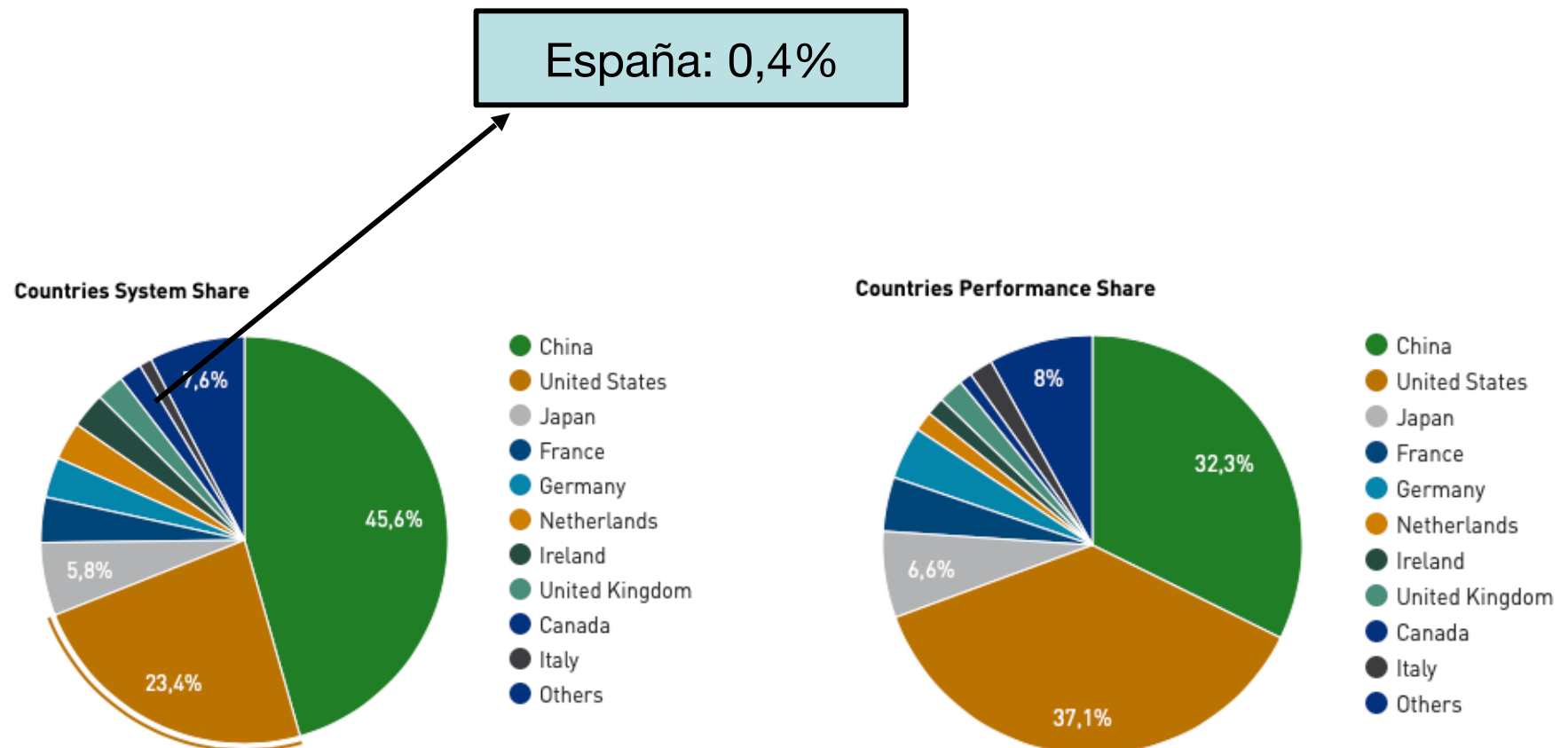
- Watson venció a los campeones de Jeopardy (2011):
 - Un prototipo Blue Gene/Q con 8192 cores.
 - Número 115 en el Top 500 (Noviembre 2010).
 - Más de 100 teraflops (10^{14} flops) de rendimiento pico.
 - 65 teraflops con LINPACK.





¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

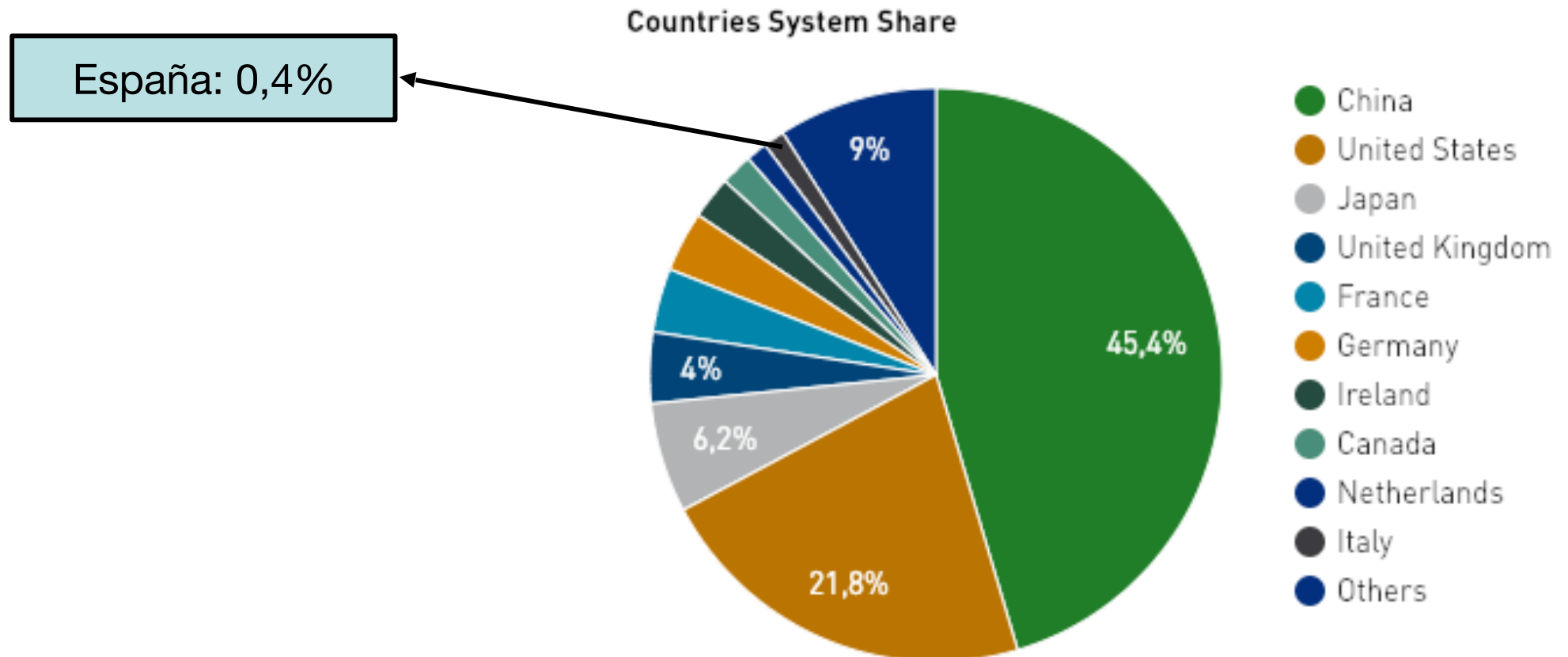
- Fuente: www.top500.org
- Países (noviembre 2019):





¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

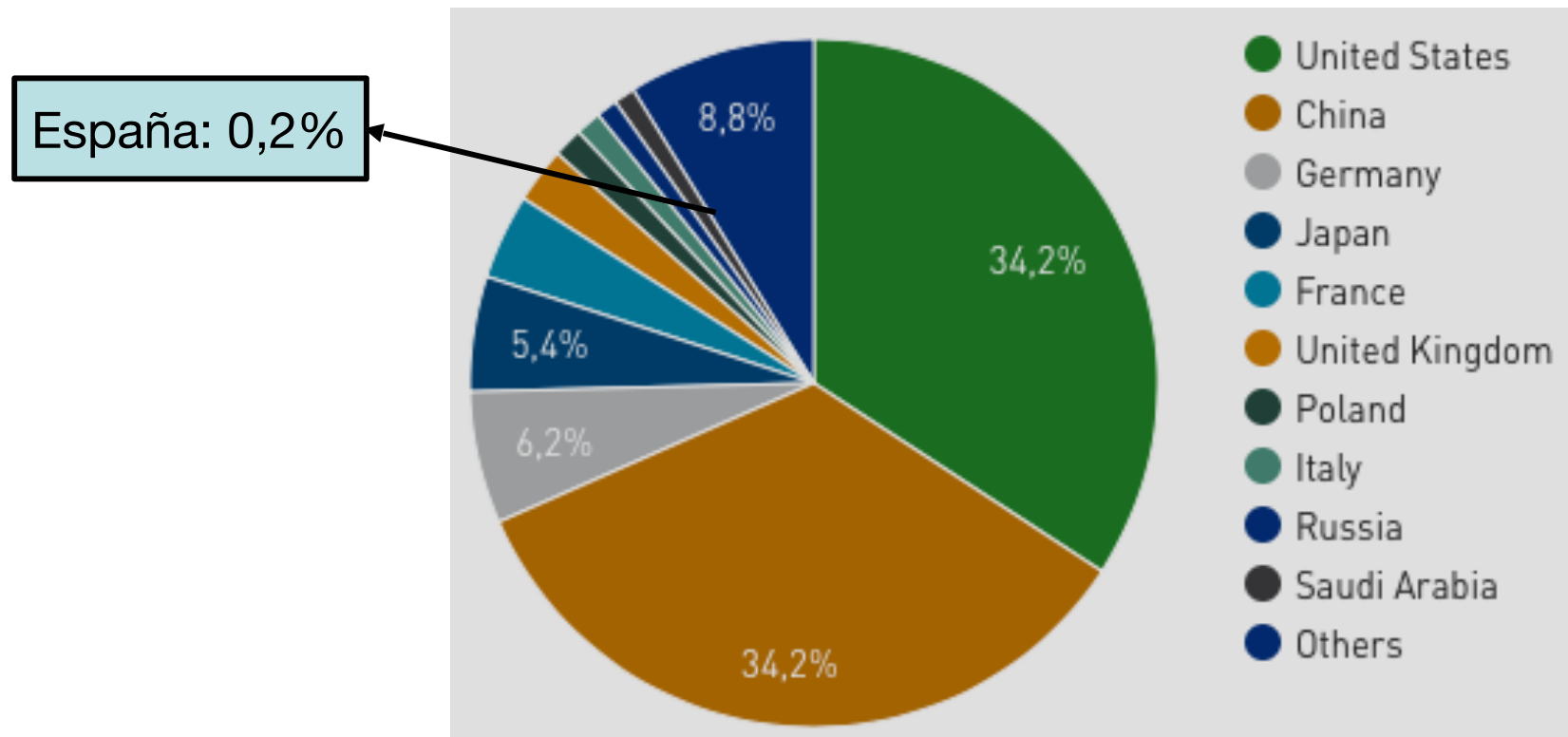
- Fuente: www.top500.org
- Países (noviembre 2018):





¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- Países (noviembre 2016):

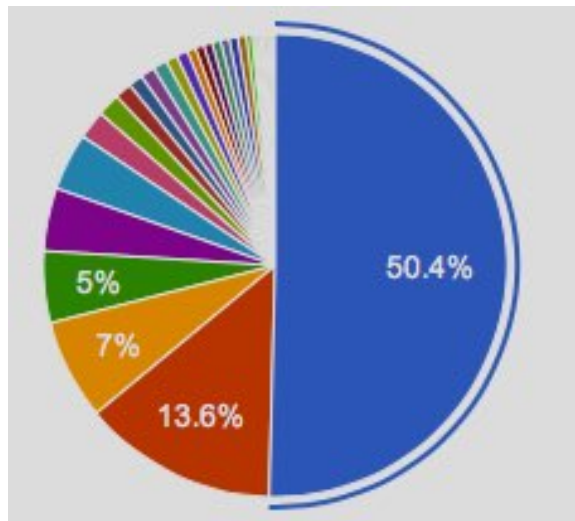




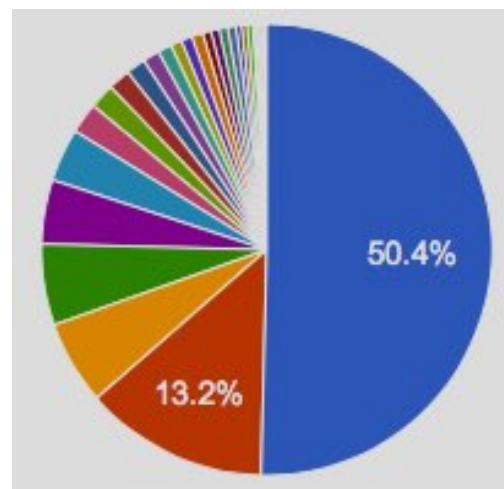
¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- Países (Evolución):

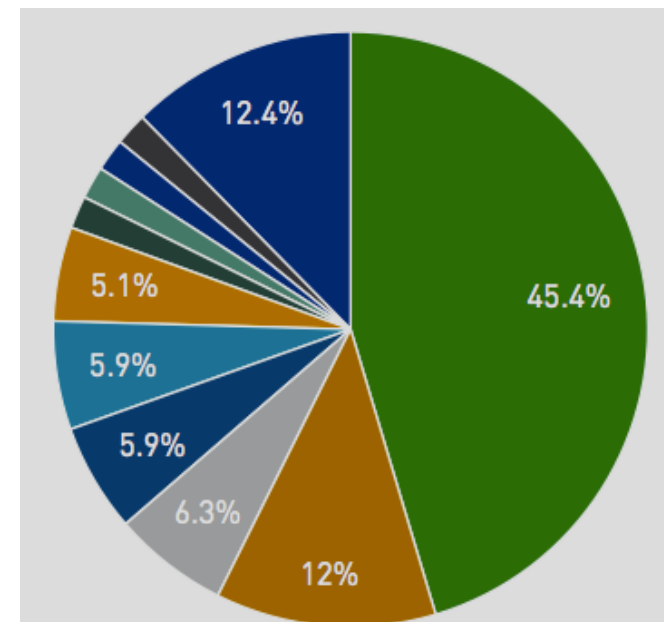
Países junio 2012



Países junio 2013



Países Noviembre 2014

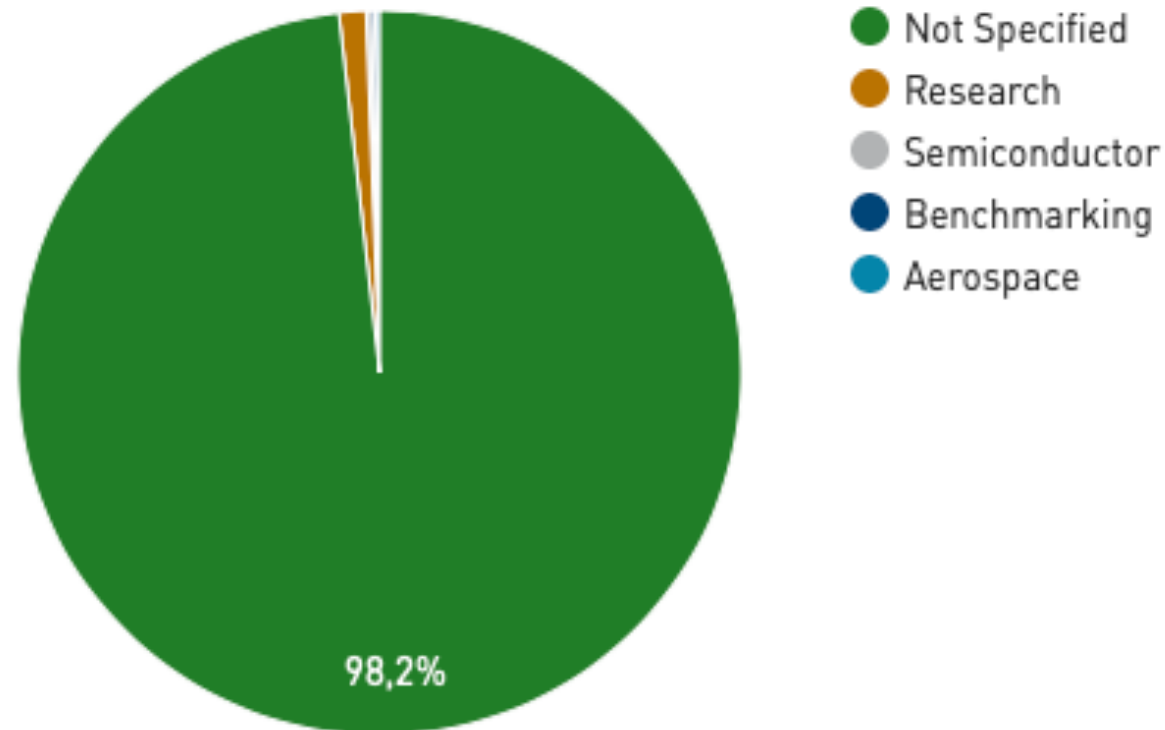




¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- Áreas de aplicación (noviembre 2019):

Application Area System Share

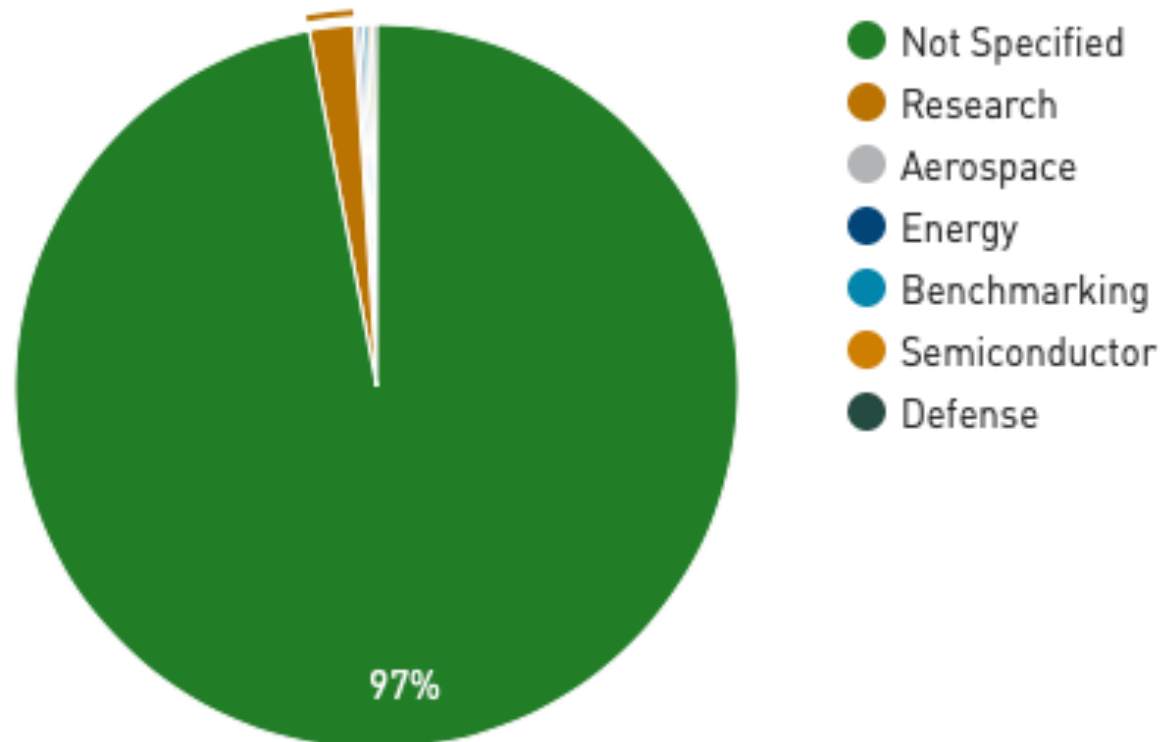




¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- Áreas de aplicación (noviembre 2018):

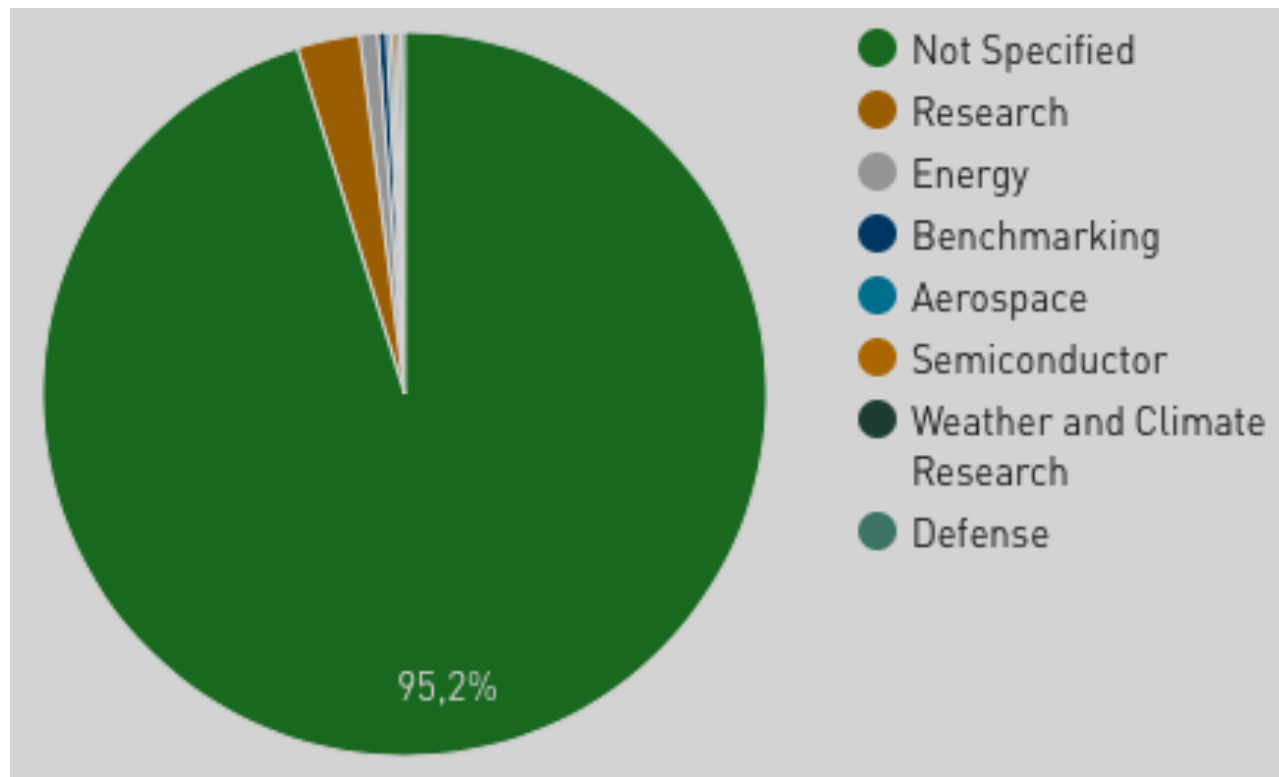
Application Area System Share





¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

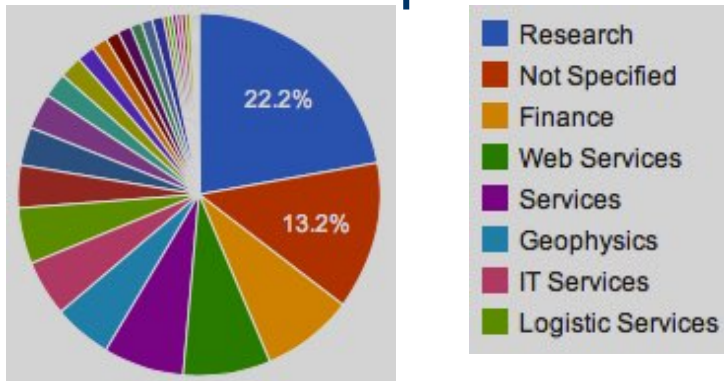
- Fuente: www.top500.org
- Áreas de aplicación (noviembre 2016):



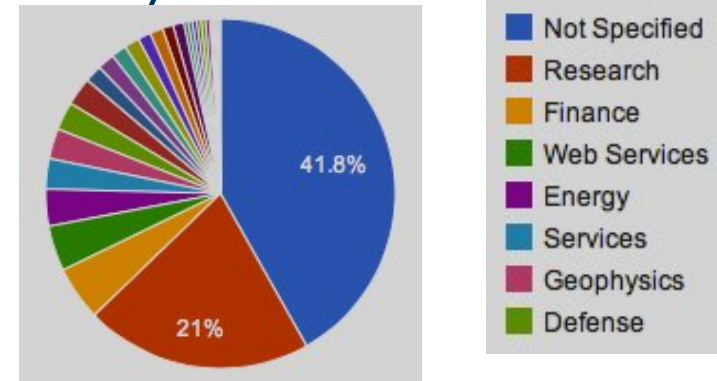


¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

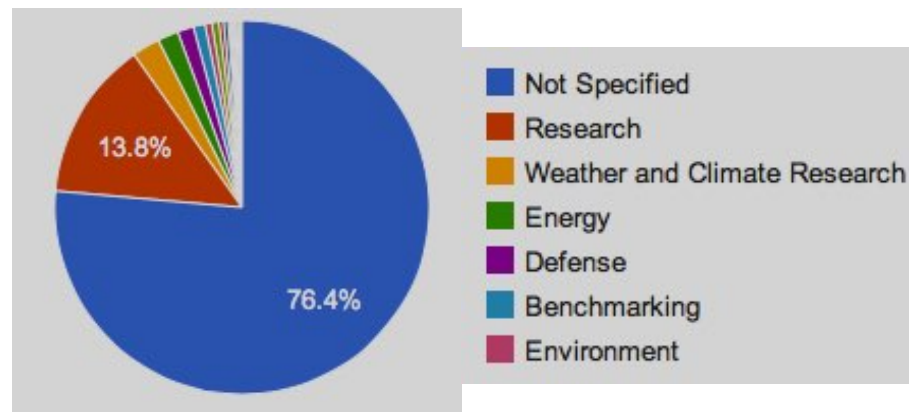
- Fuente: www.top500.org
- Áreas de aplicación (Evolución):



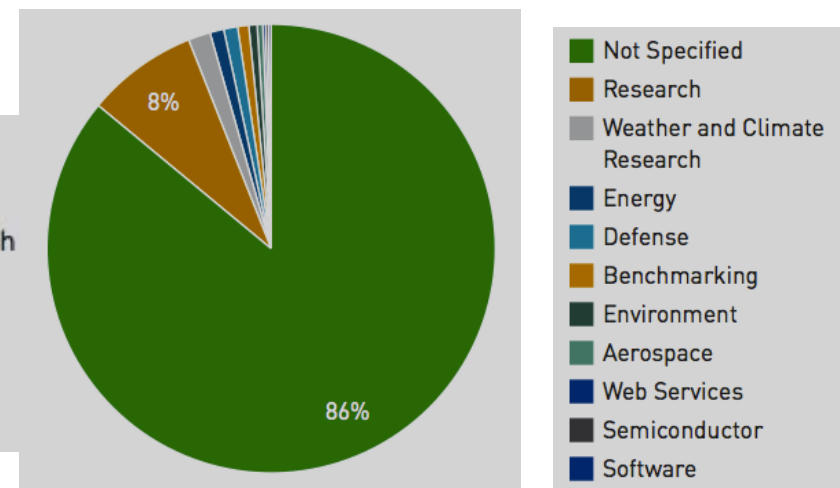
Áreas de aplicación noviembre 2011



Áreas de aplicación junio 2012



Áreas de aplicación junio 2013



Áreas de aplicación noviembre 2014



¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- TOP 10 (noviembre 2019):

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
2	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
3	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway , NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Frontera - Dell C6420, Xeon Platinum 8280 28C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand HDR , Dell EMC Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	448,448	23,516.4	38,745.9	



¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

- Fuente: www.top500.org
- TOP 10 (noviembre 2019):

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
6	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 , Cray/HPE Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
7	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect , Cray/HPE DOE/NNSA/LANL/SNL United States	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
8	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR , Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649
9	SuperMUC-NG - ThinkSystem SD650, Xeon Platinum 8174 24C 3.1GHz, Intel Omni-Path , Lenovo Leibniz Rechenzentrum Germany	305,856	19,476.6	26,873.9	
10	Lassen - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Tesla V100 , IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	288,288	18,200.0	23,047.2	



¿Dónde se realiza cómputo paralelo?

Los computadores más potentes en España

Marenostrum, Centro de Supercomputación de Barcelona:
Tras una actualización en 2017, en el TOP500 de noviembre de 2019 ocupa el Puesto 30:

- 153216 cores.
- Llegó a ser en 2004 el más potente de Europa y el cuarto del mundo.
- <http://www.bsc.es/>
- <https://www.bsc.es/marenostrum/marenostrum>

