



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2019/2020

Proyecto nº 55

Análisis de rendimiento de aplicaciones MPI en clusters de Raspberries Pi3.

Responsable del proyecto: Alberto Núñez Covarrubias

Facultad de Informática

Departamento de Sistemas Informáticos y Computación

## 1.- Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

La asignatura Programación de Sistemas Distribuidos (PSD) dedica una parte del temario a las aplicaciones de alto rendimiento y, en particular, a las aplicaciones desarrolladas con MPI. En resumen, estas aplicaciones despliegan en las máquinas físicas del sistema distribuido una serie de procesos, los cuales deben explotar -de la forma más eficiente posible- los recursos compartidos del sistema para incrementar su rendimiento.

Sin embargo, debido a la restrictiva configuración de los laboratorios de la Facultad de Informática (FDI), donde prima principalmente la seguridad, no resulta posible ejecutar estas aplicaciones en sus ordenadores. La única alternativa posible consiste en ejecutar la aplicación en un único ordenador, haciendo uso de los núcleos de CPU del mismo, es decir, sin utilizar la red. Esto limita considerablemente el alcance docente de las prácticas, ya que los alumnos no pueden realizar un estudio real de escalabilidad utilizando los ordenadores de un sistema distribuido. Además, resulta complicado saber si el funcionamiento de la aplicación, ejecutada en un único procesador, es correcto o no, ya que al no hacer uso de la red de comunicaciones, parte del código no se ejecuta de la forma esperada.

Cabe destacar que en proyectos anteriores se ha intentado aliviar este problema mediante el uso de un simulador. De hecho, los dos últimos proyectos de innovación desarrollados en el ámbito de la asignatura PSD -que actualmente están implantados en una práctica de la asignatura- han sido aceptados de forma satisfactoria, lo cual se refleja tanto en las encuestas realizadas por los alumnos, como en las calificaciones obtenidas. Mientras que el primer proyecto, llevado a cabo en el curso académico 17/18 y titulado “Diseño y despliegue de un clúster de placas Raspberry Pi3 para la ejecución de las prácticas de la asignatura PSD”, tenía como objetivo la ejecución de simulaciones en un clúster utilizando placas de bajo coste Raspberry Pi3, el segundo, llevado a cabo en el curso 18/19 y titulado “Adaptación y ejecución de aplicaciones MPI en entornos de simulación para analizar el rendimiento de arquitecturas distribuidas”, consistía en modelar aplicaciones MPI para poder ejecutarlas en un entorno de simulación.

Una vez analizados los comentarios y opiniones de los alumnos en el presente curso, se ha identificado un hueco que no queda cubierto con la propuesta de las prácticas actuales: la ejecución de las aplicaciones MPI en un clúster real. Es decir, mientras que en los proyectos anteriores se utilizaba un simulador para representar el comportamiento, tanto de las aplicaciones como de la arquitectura donde éstas se ejecutan, **el objetivo de este proyecto se centra en el análisis del rendimiento de las aplicaciones ejecutadas en un clúster real**. Así, este proyecto tiene como principal objetivo cubrir esta necesidad, de forma que no sólo se cumplirán las expectativas de los alumnos al realizar las prácticas de la asignatura, sino que también se aumentará la calidad docente de la misma.

Los objetivos específicos de este proyecto se detallan a continuación:

- **Objetivo 1: Aumentar la motivación de los alumnos.** Para ello, se utilizará un clúster de placas Raspberry Pi3 en clase de teoría, el cual contará con parte de la configuración generada en el proyecto del curso 17/18. Así, los alumnos podrán ejecutar de forma presencial las aplicaciones en clase, pudiendo también discutir de forma más directa los resultados obtenidos. Además, dado el reducido tamaño del clúster, podrán realizarse cambios arquitecturales en el mismo para que los alumnos puedan comprobar su impacto sobre el rendimiento de las aplicaciones ejecutadas.

- **Objetivo 2: Mejorar la calidad docente de la asignatura.** Puesto que los alumnos ejecutarán aplicaciones en sistemas distribuidos, más cercanos a los sistemas utilizados en las empresas del sector que las herramientas utilizadas hasta ahora, podrán tener una experiencia más cercana a los sistemas actuales, lo cual se demanda actualmente por las principales empresas de las TIC.

- **Objetivo 3: Agilizar el desarrollo de las prácticas relacionadas con el estudio del rendimiento de aplicaciones y sistemas paralelos.** Generalmente, la dificultad para realizar las prácticas de la asignatura radica en el uso de diferentes configuraciones, tanto a nivel software, con los parámetros de la propia aplicación, como a nivel hardware, utilizando diferentes topologías a nivel de arquitectura. Esto supone, en la mayor parte de los casos, un reto para los alumnos, ya que es necesario comprender y asimilar un alto número de términos y conceptos relacionados con el comportamiento de las aplicaciones y con el hardware donde se ejecutan. Por ello, se pretende aliviar esta dificultad mediante el uso de un software que utilizará, como base, una parte de la aplicación desarrollada en el proyecto de innovación docente del curso 18/19.

## **2.- Objetivos alcanzados**

El objetivo principal de este proyecto consiste en **analizar el rendimiento de clusters de bajo presupuesto, concretamente, de sistemas formados por placas Raspberry Pi3.**

El objetivo de este proyecto se ha alcanzado de forma satisfactoria. Cabe mencionar que, además de los objetivos anteriormente comentados, se ha planificado la realización de pruebas adicionales de rendimiento con las nuevas placas Raspberry Pi4. La principal motivación para ello radica en que, de esta forma, se podrán realizar prácticas con sistemas heterogéneos, enriqueciendo de manera considerable el estudio planificado inicialmente. Además, el coste de las nuevas placas Raspberry Pi4 es similar a las placas Raspberry Pi3, lo cual no supone un impacto significativo en la planificación inicial del proyecto. Sin embargo, dada la situación actual causada por la pandemia COVID-19, una parte del material no ha podido ser suministrado antes de la finalización del curso, por lo que este objetivo adicional se llevará a cabo durante los primeros meses del siguiente curso.

Los resultados obtenidos en este proyecto se aplicarán en las prácticas de la asignatura Programación de Sistemas Distribuidos durante el próximo curso 20/21. Por ello, dado que se ha alcanzado con éxito el objetivo principal del proyecto, esperamos poder cumplir los objetivos específicos del mismo, los cuales se analizarán una vez finalice la asignatura.

### **Objetivo 1: Aumentar la motivación de los alumnos**

El análisis de rendimiento se ha llevado a cabo sobre un sistema real, formado por placas actuales de bajo presupuesto. Este hecho tiene un impacto positivo en la motivación del alumno, ya que observa de una forma muy directa cómo se comporta el sistema al interactuar directamente con el mismo. Además, es importante tener en cuenta que un número considerable de alumnos ya posee estas placas para su uso doméstico, las cuales se utilizan en tareas tales como sistemas de compartición de ficheros, sistemas de emulación de videojuegos y reproducción de contenido multimedia.

### **Objetivo 2: Mejorar la calidad docente de la asignatura**

Uno de los principales factores que han motivado el desarrollo de este proyecto ha sido la mejora en la calidad docente de la asignatura Programación de Sistemas Distribuidos. Con el análisis desarrollado sobre el clúster de placas Raspberry Pi3 esperamos conseguir una mejora docente en dos aspectos concretos. Primero, los alumnos podrán observar el comportamiento de un sistema real, formado por componentes actuales. Así, podrán comparar el rendimiento de este sistema – de bajo presupuesto – con otros sistemas actuales, como ordenadores portátiles y ordenadores de sobremesa que utilicen en su vida cotidiana. Segundo, el propio sistema se enseñará en clase, ya que el tamaño del mismo lo permite, pudiendo explicar de forma detallada cómo se realiza el montaje y configuración del mismo.

Además, también será posible comentar la escalabilidad del sistema, ya que ha sido diseñado para ser fácilmente extensible añadiendo más placas al sistema.

### **Objetivo 3: Agilizar el desarrollo de las prácticas relacionadas con el estudio del rendimiento de aplicaciones y sistemas paralelos**

La asignatura Programación de Sistemas Distribuidos consta de tres prácticas obligatorias. En particular, la segunda práctica consiste en desarrollar una aplicación de alto rendimiento, mientras que en la tercera se analiza el rendimiento de sistemas distribuidos utilizando un simulador. Estas dos prácticas tienen una estrecha relación con el objetivo principal de este proyecto.

El estudio de rendimiento realizado sobre el cluster de placas Raspberry Pi3 permitirá a los alumnos comprender de una forma ágil y fluida el comportamiento del sistemas HPC. De esta forma, se pretende facilitar y agilizar el desarrollo de las prácticas, ya que los alumnos contarán con una visión real del sistema, pudiendo reflejar el objetivo que se persigue en las prácticas antes de empezar su desarrollo.

### **3.- Metodología empleada en el proyecto**

El desarrollo del proyecto está dividido en seis tareas. Seguidamente, se enumeran y describen las mismas.

- 1) Diseño arquitectural del nuevo clúster de placas Raspberry Pi3.
- 2) Montaje y despliegue del nuevo clúster.
- 3) Análisis de requisitos para analizar el rendimiento de aplicaciones y sistemas de alto rendimiento.
- 4) Implementación de los módulos necesarios para:
  - a. Ejecutar aplicaciones MPI en el clúster.
  - b. Analizar los resultados obtenidos en términos de rendimiento.
- 5) Diseño de experimentos para comprobar la aplicabilidad y usabilidad del proyecto.
- 6) Diseño y planificación de los indicadores necesarios que permitan llevar a cabo los procedimientos de evaluación.

El responsable del proyecto se ha encargado de sincronizar las distintas tareas que forman el proyecto. Estas tareas, junto con la asignación de cada miembro del equipo a cada una de las mismas, se detallan en la sección 5.- Desarrollo de las actividades.

Tras la finalización del proyecto, es responsable del mismo realizó un informe con la información generada en cada tarea.

#### **4.- Recursos humanos**

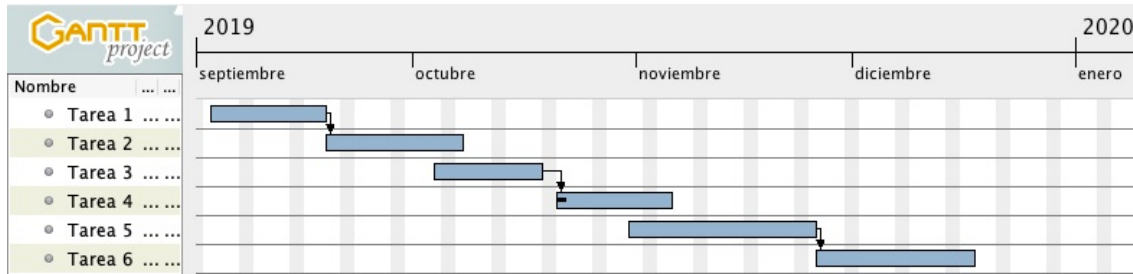
Para la realización de este proyecto se ha contado con un grupo de trabajo formado, principalmente, por personal de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Adicionalmente el equipo cuenta con la profesora M. Emilia Cambroneró, perteneciente a la Universidad Castilla-La Mancha (UCLM). Cabe destacar la presencia de dos estudiantes que han cursado la asignatura PSD en cursos anteriores. Por un lado, Pablo C. Cañizares, que ha finalizado en febrero de 2020 su tesis doctoral enfocada a sistemas cloud y, por otro lado, Javier A. Ricaldi Esquivel. Con ello se pretende aportar una visión adicional, desde el punto de vista de los estudiantes, para poder realizar con mayor precisión los métodos propuestos.

De los miembros PDI, tres profesores han impartido asignaturas relacionadas con sistemas distribuidos. Concretamente, de la UCM, los profesores Simon Pickin y Alberto Núñez han impartido la asignatura PSD durante los últimos seis años académicos, la cual fue puesta en marcha en el curso académico 2012/2013 por el profesor Alberto Núñez. Además, la profesora M. Emilia Cambroneró ha impartido, durante los últimos ocho años, la asignatura Sistemas Distribuidos del grado en Ingeniería Informática de la UCLM.

Para el desarrollo de este proyecto es necesario contar con miembros con experiencia en el desarrollo de aplicaciones. En este sentido, el resto de los profesores del grupo de trabajo cuenta con amplia experiencia en asignaturas de programación. Además, el grupo de trabajo cuenta con personal PAS de la UCM. Concretamente, Ana Bartolomé podrá apoyar en las tareas 1 y 2 al contar con amplia experiencia en este campo.

## 5.- Desarrollo de las actividades

El siguiente diagrama de Gantt muestra la línea temporal en la que se ha desarrollado el proyecto, donde se indica el tiempo requerido para realizar cada una de las tareas desarrolladas.



Los intervalos asignados a cada una de las tareas se especifican a continuación:

Tarea 1: 03/09/2019 – 18/09/2019

Tarea 2: 19/09/2019 – 07/10/2019

Tarea 3: 04/10/2019 – 18/10/2019

Tarea 4: 21/10/2019 – 05/11/2019

Tarea 5: 31/10/2019 – 25/11/2019

Tarea 6: 26/11/2019 – 17/12/2019

La asignación de cada miembro del equipo a cada una de las tareas realizadas se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la especialización y habilidades de cada miembro. Así, el siguiente cuadro muestra las tareas en las que ha participado cada miembro del equipo, donde 'C' indica el coordinador de cada tarea y 'X' la participación de un miembro en una tarea.

Miembro\Tarea	1	2	3	4	5	6
Alberto Núñez	C	C	C	X	X	X
Simon Pickin	X	X		C	X	
Víctor Lavín				X	X	
Luis Llana	X	X	X		C	X
Ana Bartolomé	X	X				
Pablo Cerro	X		X	X	X	
Emilia Cambroner	X			X		
Javier A. Ricaldi	X	X	X	X	X	X
Miguel Gómez-Zamalloa			X			C

La descripción de cada una de las tareas realizadas en el proyecto se describe a continuación:



La tarea 1 tiene como objetivo principal realizar un diseño arquitectural del clúster donde se ejecutarán las aplicaciones MPI. En particular, el clúster estará formado por placas Raspberry Pi3, el cableado necesario para la alimentación de los dispositivos y una red de comunicaciones Ethernet Gigabit. Seguidamente, el montaje físico y despliegue del clúster se realiza en la tarea 2. Para ello se utiliza, como base, parte de la configuración generada en el proyecto del curso 17/18. Cabe destacar que, en este caso, el diseño del clúster no será el mismo que el utilizando en el proyecto anterior, ya que ambos no persiguen los mismos objetivos. Mientras que el presente proyecto persigue proporcionar un clúster de fácil acceso y configuración, en el anterior proyecto se perseguía minimizar la temperatura generada al ejecutar aplicaciones de cómputo masivo.

Una vez desplegado el hardware donde se ejecutarán las aplicaciones MPI, es necesario realizar un análisis de los requisitos necesarios para estudiar el rendimiento de estas aplicaciones. En esencia, este rendimiento dependerá de dos factores fundamentales. Por un lado, aspectos relacionados directamente con la configuración de la aplicación, tales como el número de procesos involucrados en la ejecución y el algoritmo utilizado para el reparto de datos. Por otro lado, la configuración del clúster donde se podrá definir, por ejemplo, el número de núcleos de CPU físicos disponibles para cada ejecución. Este análisis se realizará en la tarea 3. La tarea 4 tiene como objetivo la implementación de dos módulos. El primero está enfocado a la ejecución de aplicaciones MPI, de forma que el usuario pueda personalizar fácilmente los parámetros de ejecución. El segundo módulo gestiona la obtención de las distintas métricas que nos permiten calcular el rendimiento obtenido de la aplicación como, por ejemplo, el tiempo total de ejecución, *throughput* de cada proceso -tanto en disco como en red- y tiempo medio de ejecución de cada proceso.

En la tarea 5 se lleva a cabo un estudio experimental con el fin de comprobar la aplicabilidad y usabilidad del proyecto. En concreto, se diseñan y ejecutan varias aplicaciones MPI reales utilizando clúster resultante de las tareas 1 y 2.

Finalmente, en la tarea 6 se definen y llevan a cabo los indicadores que nos permiten conocer el grado en que el sistema desplegado cumple con los objetivos previamente descritos. Es importante remarcar que para el desarrollo del proyecto contamos con un equipo de trabajo heterogéneo, formando parte del equipo varios profesores -de diferentes universidades- que imparten asignaturas centradas en los sistemas distribuidos.