

Análisis de rendimiento y eficiencia energética en el clúster Raspberry Pi Cronos

Martha Semken¹, Mariano Vargas¹, Ignacio Tula¹, Giuliana Zorzoli¹, Andrés Rojas Paredes¹

¹Instituto de Ciencias (ICI) Universidad Nacional de General Sarmiento – UNGS

{msemken, avargas, itula, gjzorzoli, arojas}@campus.ungs.edu.ar

Abstract. En este artículo se presenta una evaluación del rendimiento computacional y la eficiencia energética del clúster Cronos, compuesto por microcomputadoras Raspberry Pi modelo 4 y modelo 3b orientado a fines educativos. Se realizaron pruebas experimentales utilizando el benchmark High Performance Linpack (HPL), bajo un entorno de gestión de recursos configurado con Slurm y comunicación paralela mediante Open MPI. El estudio se centró en analizar la escalabilidad, la estabilidad y el consumo eléctrico durante la ejecución de cargas intensivas de cómputo, considerando distintas configuraciones de nodos. Los resultados muestran que el clúster alcanza un rendimiento de hasta 6.91 GFLOPS en configuraciones homogéneas de 6 nodos RPi 4, y que el uso de nodos heterogéneos (incluyendo Raspberry Pi 3B) puede impactar negativamente en la estabilidad y la eficiencia. Asimismo, se midió el consumo eléctrico total del sistema durante las ejecuciones, permitiendo estimar la relación rendimiento/consumo (GFLOPS/W) como métrica comparativa. Este estudio constituye un aporte concreto para el diseño, evaluación y aprovechamiento de clústeres ARM de bajo costo en contextos educativos y de investigación.

Keywords: clúster, Raspberry Pi, benchmarking, eficiencia energética, Munge, Slurm, Open MPI, computación paralela, HPL, Slurm

1. Introducción

En el contexto actual de la computación, la demanda de soluciones eficientes y escalables para procesamiento paralelo ha impulsado la adopción de clústeres de bajo costo basados en arquitecturas ARM. En particular, las computadoras de placa única (Single Board Computer, SBC) como la Raspberry Pi ofrecen una alternativa accesible para explorar conceptos avanzados de paralelismo, distribución de tareas y eficiencia energética, tanto en ámbitos educativos como en proyectos de investigación aplicada (ver [1]).

El clúster Cronos, desarrollado en el Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS), está compuesto por microcomputadoras Raspberry Pi 3b y 4; fue concebido con fines didácticos, orientado a la enseñanza de cómputo paralelo. Este trabajo se inscribe en el marco de un proyecto de investigación en curso, que tiene como objetivo la evaluación de un clúster de computadoras utilizando computadoras Raspberry Pi, evaluar el rendimiento, la escalabilidad y la eficiencia energética de sistemas de cómputo de bajo costo, con potencial para ser utilizados en entornos académicos y experimentales.

En etapas previas se abordó el diseño físico del clúster, su ensamblaje, y la instalación del software base, incluyendo herramientas como Munge (autenticación ver [2]), Slurm (gestión de recursos, ver [3]) y Open MPI (comunicación paralela). Sobre esta infraestructura funcional, se realizó una evaluación experimental utilizando el benchmark High Performance Linpack (HPL; Dongarra, Luszczek, & Petitet, 2003 ver [4]), para medir el rendimiento explorando distintas configuraciones de nodos y parámetros computacionales en términos de FLOPS (Floating Point Operations Per Second), una unidad que expresa la cantidad de operaciones en punto flotante que un sistema puede realizar por segundo.

Asimismo, se llevaron a cabo mediciones de corriente y tensión durante la ejecución de los trabajos, lo que permitió estimar el consumo eléctrico total y calcular métricas de eficiencia como GFLOPS/Watt utilizadas en rankings como el Green500 (2024). Esto se enmarca en los principios del Green Computing, que promueven el desarrollo de soluciones computacionales de bajo impacto ambiental (ver [5]).

El objetivo principal de este trabajo es analizar la relación entre rendimiento y consumo energético en un entorno heterogéneo, accesible y replicable, y reflexionar sobre su viabilidad como plataforma de experimentación en contextos educativos y de investigación. A su vez, se documentan los principales problemas técnicos encontrados durante las pruebas, junto con las soluciones implementadas, con el fin de aportar conocimiento práctico a la comunidad interesada en el desarrollo de clústeres ARM de bajo consumo.

2. Líneas de investigación y desarrollo

El presente trabajo se enmarca en un proyecto que se estructura en tres fases principales, cada una con objetivos, procedimientos y productos específicos. Esta división permite abordar de forma progresiva el diseño, implementación, evaluación y aprovechamiento del clúster Cronos.

- **Primera Fase:** Configuración inicial y pruebas funcionales
Objetivo: montaje del hardware, instalación del sistema operativo, configuración de red, NFS, Munge, Slurm y Open MPI.
Estado: Completada. Se documentó en el artículo “Configuración y Puesta en Marcha del Clúster Raspberry Pi Cronos” (CACIC 2024), donde se verificó el funcionamiento básico del clúster y su capacidad para ejecutar tareas paralelas simples (ver [6]).
Actividades destacadas: en diciembre de 2024 se llevó a cabo un workshop de introducción al cómputo paralelo utilizando el clúster Cronos. En dicho taller,

más de cuarenta estudiantes de la carrera de Programación adquirieron conocimientos sobre el diseño de algoritmos paralelos y realizaron prácticas en lenguaje C utilizando herramientas y metodologías propias del cómputo paralelo. Durante las actividades se identificaron limitaciones relacionadas con la administración de usuarios, la escalabilidad y el rendimiento del almacenamiento, lo que motivó la implementación de mejoras en la infraestructura del clúster.

- **Segunda Fase:** Evaluación del rendimiento y eficiencia energética
Objetivo: medir el rendimiento computacional del clúster utilizando benchmarks estandarizados (HPL), analizar su escalabilidad con diferentes configuraciones de nodos y evaluar el consumo energético real durante la ejecución de tareas intensivas.
Estado: En desarrollo. Este artículo documenta los avances de esta fase, presentando resultados detallados de pruebas con diferentes parámetros, nodos y condiciones de operación.
- **Tercera Fase:** Desarrollo de aplicaciones paralelas y documentación técnica.
Objetivo: diseñar e implementar aplicaciones que aprovechen el entorno del clúster, generar material didáctico, guías de replicación y optimización del sistema para futuros usos educativos o investigativos.
Estado: a planificarse tras la finalización de las pruebas de rendimiento.
Perspectivas: se prevé continuar desarrollando cursos, prácticas y talleres de cómputo paralelo utilizando Cronos como plataforma formativa. Estas actividades permitirán seguir testeando nuevas aplicaciones, incorporar mejoras al entorno y fortalecer la enseñanza de programación paralela en la carrera de Informática.

La presente publicación se focaliza en los resultados obtenidos durante la Fase II, centrada en la evaluación del rendimiento computacional y el análisis del consumo energético. A lo largo de esta etapa se realizaron diversas pruebas utilizando la herramienta High Performance Linpack (HPL), junto con mediciones de corriente eléctrica para estimar la eficiencia del sistema en términos de GFLOPS/Watt. También se analizó el impacto de diferentes configuraciones de nodos (homogéneas vs. heterogéneas) y se documentaron incidentes técnicos surgidos durante la experimentación, junto con las estrategias aplicadas para su resolución.

3. Evaluación del rendimiento y eficiencia energética

Esta sección presenta los resultados experimentales obtenidos al ejecutar el benchmark High Performance Linpack (HPL) en el clúster Cronos, con el objetivo de medir su rendimiento computacional (en GFLOPS) y evaluar su comportamiento bajo distintas configuraciones. Las pruebas se realizaron utilizando herramientas estándar del entorno científico, con un enfoque en la reproducibilidad y la estabilidad de las ejecuciones.

3.1 Introducción al benchmark HPL Linpack

High Performance Linpack (HPL) es una implementación paralela y portátil del benchmark Linpack, utilizado internacionalmente para evaluar la capacidad de cómputo en punto flotante de alto rendimiento en clústeres y supercomputadoras. Linpack resuelve sistemas de ecuaciones lineales densos del tipo $Ax=b$, donde A es una matriz cuadrada de coeficientes, x y b son vectores. Esta operación es fundamental en muchas aplicaciones científicas, y su resolución eficiente permite medir el desempeño real de una arquitectura computacional.

HPL realiza esta tarea utilizando aritmética de doble precisión (64 bits), aprovechando bibliotecas como BLAS (ver [7]) para operaciones numéricas intensivas, y MPI para la comunicación entre múltiples nodos en sistemas distribuidos. El benchmark permite ajustar diversos parámetros de ejecución, entre ellos:

- N: tamaño del sistema (dimensión de la matriz A)
- NB: tamaño de bloque para la factorización

P x Q: distribución de procesos en una cuadrícula bidimensional, donde P y Q definen cómo se reparten los procesos MPI entre las filas y columnas lógicas de la topología. Esta distribución PxQ permite adaptar el mapeo de procesos a la arquitectura del clúster, maximizando la eficiencia de las comunicaciones y el uso de la memoria.

El resultado más relevante del benchmark es el rendimiento expresado en GFLOPS (giga operaciones en punto flotante por segundo), que representa la tasa de cómputo alcanzada durante la resolución del sistema.

HPL se utiliza como métrica estandarizada de rendimiento en computación de alto desempeño, y es la herramienta empleada por el ranking internacional TOP500 para evaluar y comparar las supercomputadoras más poderosas del mundo (ver [8]).

En este trabajo, HPL se utilizó como herramienta principal para caracterizar el comportamiento del clúster Cronos bajo cargas intensivas. Los resultados obtenidos fueron luego relacionados con el consumo eléctrico del sistema, permitiendo así estimar su eficiencia energética (GFLOPS/Watt). Este enfoque se alinea con las tendencias actuales del Green Computing y la evaluación sostenible de infraestructuras informáticas.

3.2 Resultados destacados con 6 nodos

Las pruebas más estables y eficientes se lograron utilizando únicamente los 6 nodos Raspberry Pi 4 (4 GB de RAM), excluyendo a los Raspberry Pi 3B. Esta configuración homogénea permitió un mejor aprovechamiento de recursos, mayor estabilidad operativa y menor dispersión en los resultados.

Nodos	N	NB	P×Q	Tiempo(s)	GFLOPS	Comentario
6	30000	224	3×2	2604.42	6.9112	Mejor resultado registrado
6	30000	224	3×2	2946.40	6.1096	Ejecución estable con fuentes PC

Nodos	N	NB	P×Q	Tiempo(s)	GFLOPS	Comentario
6	30000	160	3×2	2947.49	6.1073	Primeras pruebas estables con fuente switch

Se verificó que la combinación P=3, Q=2 es óptima para esta topología de 6 nodos, y que el tamaño de bloque NB = 224 maximiza el rendimiento sin comprometer la estabilidad. La mejor ejecución alcanzó **6.9112 GFLOPS**, estableciendo un techo de rendimiento para este entorno homogéneo.

Para esta ejecución, se midió la corriente consumida durante 35 minutos en intervalos de 5 minutos, utilizando una pinza amperimétrica conectada a la fuente switching de 5V. Aplicando el método del trapecio sobre los valores registrados, se estimó un consumo total de **0,448 Wh**. Considerando un rendimiento de **6.9112 GFLOPS**, la eficiencia energética calculada para esta prueba fue de aproximadamente 15,42 GFLOPS/Watt. Los datos crudos y el gráfico correspondiente están disponibles en el repositorio complementario del proyecto [2].

3.3 Resultados con 8 nodos y comparación

También se realizaron pruebas con 8 nodos (6 RPi 4 + 2 RPi 3B). Aunque podría esperarse un aumento de rendimiento, los resultados mostraron lo contrario: la diferencia fue mínima o incluso negativa, dependiendo de la configuración.

Nodos	N	NB	P×Q	Tiempo (s)	GFLOPS	Comentario
8	30000	160	3×2	2932.81	6.1379	Igual distribución P×Q que con 6 nodos
8	30000	256	8×1	6873.31	2.619	Configuración forzada, rendimiento pobre

Aunque en uno de los casos con 8 nodos se logró 6.1379 GFLOPS, el valor es solo 0.4% superior al obtenido con 6 nodos, y muy inferior al máximo de 6.91. Además, las pruebas con 8 nodos mostraron menor estabilidad y varios incidentes técnicos que comprometen su uso prolongado bajo carga.

Durante las ejecuciones de HPL se presentaron distintos incidentes técnicos que afectaron la estabilidad del clúster. Por ejemplo, se detectaron fallas de comunicación entre nodos debido a la desincronización horaria provocada por la falta de acceso a servidores NTP, lo cual impidió la autenticación correcta con SLURM (mensaje “Zero Bytes were transmitted or received”). En otro caso, el nodo7 (RPi 3B) dejó de aceptar tareas pese a responder a ping, lo que interrumpió temporalmente la ejecución del job. La intervención manual con `scontrol` y el reinicio físico del nodo permitieron continuar la ejecución sin pérdida de datos. Estos episodios motivaron decisiones técnicas clave, como la exclusión de los nodos RPi 3B en las pruebas finales, privilegiando configuraciones más estables y homogéneas. Se puede ver en la figura 1 los resultados finales de las pruebas.



Figura 1: Resultados finales de HPL

3.4 Decisión técnica: Justificación del uso de 6 nodos

Luego de múltiples pruebas, se optó por adoptar como configuración de referencia la de 6 nodos RPi 4 homogéneos, por las siguientes razones:

- Mejor rendimiento absoluto (6.91 GFLOPS).
- Mayor estabilidad: no se registraron cuelgues ni reinicios espontáneos.
- Menor variabilidad en los resultados.

3.5 Consistencia en el uso de recursos, con balance de carga uniforme.

Menor complejidad operativa, al no requerir adaptaciones por diferencias de hardware (los RPi 3B generaban desincronizaciones y posibles cuellos de botella de red o RAM).

Esta decisión técnica permitió obtener resultados más confiables y representativos del potencial real del clúster en condiciones controladas.

4. Aplicaciones paralelas y validación funcional del clúster

Se realizaron pruebas aplicando MPI y MPI + OpenMp sobre un algoritmo para el cálculo de PI, aplicando la regla del punto medio. En base a las mediciones realizadas se obtuvieron los siguientes gráficos.

Con MPI

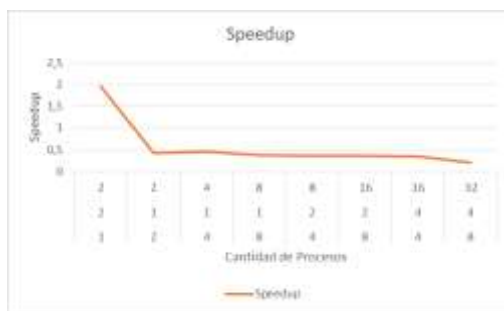


Figura 2: Speedup MPI

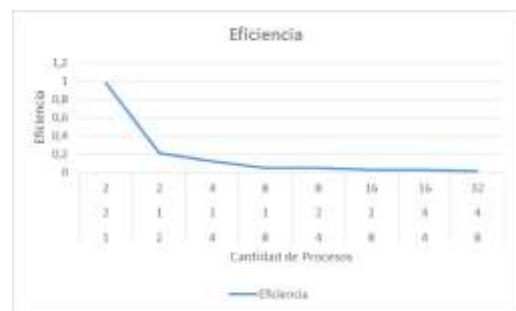


Figura 3: Eficiencia MPI

Con MPI + OpenMP

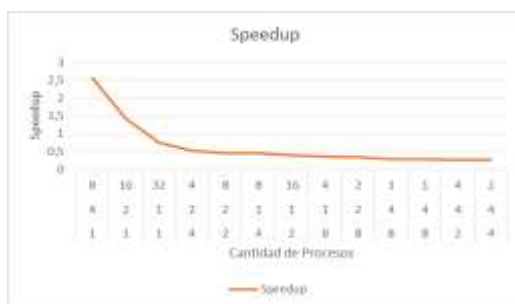


Figura 4: Speedup MPI

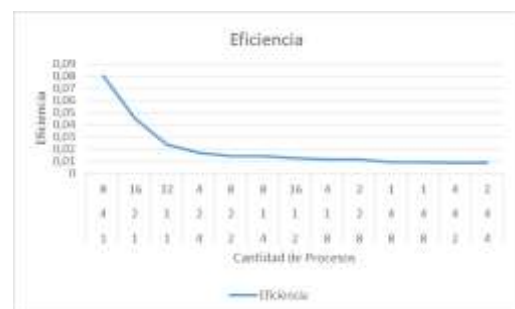


Figura 5: Eficiencia OpenMP + MPI

En MPI se ve mayor disminución de eficiencia al aumentar el número de procesos, las mediciones con MPI+OpenMP (modelo híbrido) se realizaron siempre con 32 procesos pero con distintas configuraciones de nodos, procesos e hilos. El modelo híbrido escala mejor, si se aprovechan todos los cores por nodo, no teniendo la misma eficiencia cuando se usan muchos nodos y solo un core por cada uno.

Todos los scripts, archivos de configuración (como HPL.dat), códigos fuente en C utilizados para el cálculo del número π en versiones secuencial, MPI e híbrida, así como los resultados obtenidos (tiempos, GFLOPS, consumo eléctrico, cálculos de speedup y eficiencia), se encuentran disponibles en el repositorio público GitHub del proyecto de investigación (ver [9]).

5. Conclusiones

Este trabajo presentó una evaluación del rendimiento y la eficiencia energética del clúster Cronos. Mediante pruebas con HPL Linpack, se evaluó el rendimiento computacional del sistema en configuraciones homogéneas y heterogéneas. La mejor combinación fue con una configuración homogénea con seis nodos Raspberry Pi 4, alcanzando un máximo de 6.9112 GFLOPS y una eficiencia energética de 15.42 GFLOPS/Watt. Este valor, aunque lejano de los máximos reportados por el ranking Green500 (superiores a 60 GFLOPS/Watt en supercomputadoras de última generación), resulta altamente competitivo para un clúster educativo de bajo costo y consumo energético, confirmando su viabilidad como plataforma formativa en cómputo paralelo. Se documentaron además incidentes técnicos que llevaron a mejoras en la infraestructura y operatividad del sistema.

Por otro lado, la implementación del cálculo del número π en versiones secuencial, MPI e híbrida (MPI + OpenMP) permitió evaluar la escalabilidad del clúster desde una perspectiva funcional. El enfoque híbrido logró mejores resultados en términos de speedup y eficiencia, aprovechando tanto la paralelización multinúcleo como entre nodos.

Como trabajo futuro, se prevé continuar con el desarrollo de aplicaciones paralelas, incorporar herramientas de monitoreo y respaldo, y mantener el uso del clúster en actividades de formación en cómputo paralelo.

Referencias

- [1] Raspberry Pi Chile. (n.d.). ¿Qué es Raspberry Pi? En Raspberry Pi Chile. <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>
- [2] Munge. (s.f.). Munge: Authentication Service for HPC. <https://dun.github.io/munge/>
- [3] Jette, M. A., Yoo, A. B., & Grondona, M. (2002). SLURM: Simple Linux Utility for Resource Management. In Proceedings of the 9th International Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing (pp. 44-60). Springer.
- [4] Dongarra, J., Luszczek, P., & Petitet, A. (2003). The LINPACK Benchmark: Past, Present and Future. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 15(9), 803–820. <https://doi.org/10.1002/cpe.728>
- [5] Green500. (2024). Green500 List - June 2024. TOP500. <https://www.top500.org/green500/>
- [6] Semken, M., Vargas, M., Tula, I. & Rojas Paredes, A. (2024). *Configuración y Puesta en Marcha del Clúster Raspberry Pi Cronos*. En Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2024). Universidad Nacional de Río Negro.
- [7] OpenBLAS. (2024). An optimized BLAS library based on GotoBLAS2. <https://www.openblas.net/>
- [8] TOP500 Supercomputer Sites. The TOP500 Project. Disponible en: <https://www.top500.org/project>
- [9] Cronos Cluster. (2025). Repositorio del proyecto: Evaluación de rendimiento y eficiencia energética. GitHub. https://github.com/ColosUNGS/CACIC_2025