

Avaliação do Consumo Energético e Desempenho de Clusters Baseados em Banana Pi e Raspberry Pi

Luís Fillipe Magalhães Conrado Pereira, Henrique Cota de Freitas

Computer Architecture and Parallel Processing Team (CArT)
Departamento de Ciência da Computação
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)
Belo Horizonte, Minas Gerais - Brasil

lfmcpereira@sga.pucminas.br, cota@pucminas.br

Abstract. *This paper presents an evaluation of the energy efficiency and performance of Raspberry Pi and Banana Pi clusters. Experiments using NAS Parallel Benchmarks (CG, Class B) varied processes (1-32), collecting power consumption and execution time. Both platforms benefit from parallelism. The Banana Pi achieves the best result at eight processes, with energy consumption increasing thereafter. The Raspberry Pi, however, continuously reduces energy and time up to 32 processes. The analysis evidences the Raspberry Pi's energy efficiency as superior to the Banana Pi's in the tested context, especially under higher parallelism.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma avaliação da eficiência energética e do desempenho de clusters Raspberry Pi e Banana Pi. Experimentos com NAS Parallel Benchmarks (CG, Classe B) variaram processos (1-32), coletando potência consumida e tempo gasto na execução. Ambos se beneficiam do paralelismo. O Banana Pi encontra melhor resultado em oito processos, com consumo energético aumentando depois. O Raspberry Pi, porém, reduz continuamente energia e tempo até 32 processos. A análise evidencia uma eficiência energética do Raspberry Pi superior à do Banana Pi no contexto do experimento, especialmente, com maior paralelismo.*

1. Introdução

A crescente demanda por processamento paralelo impulsionou o uso de *clusters*, com computadores de placa única (SBCs) como Raspberry Pi e Banana Pi emergindo como plataformas de baixo custo e alta versatilidade para aplicações em pesquisa e implementações práticas que exigem eficiência econômica (Saffran et al., 2017). Nesse contexto, a eficiência energética tornou-se um fator crítico, e a avaliação rigorosa do desempenho e do consumo energético é essencial, sendo comumente realizada com *benchmarking* de algoritmos estabelecidos para medir e comparar diferentes arquiteturas sob cargas de trabalho controladas (Shao et al., 2022).

Luís Fillipe Pereira realizou este trabalho durante sua graduação em Ciência da Computação.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq - Códigos 311697/2022-4 e 402837/2024-0) e à PUC Minas FIP 2025/32469.

Este artigo parte de um problema motivador voltado para as diferenças arquiteturais entre placas Banana Pi e Raspberry Pi e como reagem ao consumir energia. Portanto, este artigo foca na avaliação comparativa da eficiência energética e, conseqüentemente, do desempenho de *clusters* baseados em Raspberry Pi e Banana Pi, utilizando o *benchmark Conjugate Gradient (CG) Classe B* do *NAS Parallel Benchmarks*. Como consequência, busca-se preencher uma lacuna na literatura sobre o perfil energético do Banana Pi em comparação com o Raspberry Pi, fornecendo dados objetivos para auxiliar na escolha de soluções de *cluster* de baixo custo, eficientes energeticamente e viáveis para ambientes acadêmicos e de pesquisa.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 revisa trabalhos correlatos sobre *clusters* SBC e eficiência energética. A Seção 3 detalha os conceitos fundamentais. A Seção 4 descreve a metodologia e as ferramentas utilizadas. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos para os *clusters* baseado em Banana Pi e Raspberry Pi. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões e direções futuras.

2. Trabalhos Correlatos

A pesquisa sobre *clusters* de computadores de placa única (SBCs) tem evoluído significativamente, com foco na avaliação de desempenho e eficiência energética para computação paralela de baixo custo. Em 2014, Zacarias (2014) explorou o uso da ferramenta de *benchmark HPL* para avaliar o desempenho de *clusters*, identificando limitações no enlace de rede e propondo a expansão da análise para fatores que influenciam sistemas paralelos com memória distribuída, além de sugerir a implementação de um mecanismo de tolerância a falhas.

Avançando na aplicação de SBCs, em 2015, Garcia e Freitas (2015) avaliaram o desempenho de um *cluster* de Raspberry Pi Model B V1.1 utilizando o conjunto de testes *NAS Parallel Benchmarks*, evidenciando seu potencial como alternativa viável para aplicações paralelas de baixo custo, embora tenham destacado limitações de escalabilidade relacionadas à largura de banda de rede e ao cache. Em 2017, Saffran et al. (2017) investigaram a viabilidade de *clusters* de Raspberry Pi energeticamente eficientes aplicados a algoritmos de mineração de dados, como *K-means* e *Apriori*. Os autores compararam os resultados com um Intel Xeon Phi e concluíram que o Raspberry Pi se apresenta como uma alternativa promissora para computação de alto desempenho de baixo custo e menor consumo de energia. Posteriormente, em 2019, Qureshi e Koubaa (2019) analisaram o desempenho (tempo de execução, memória, armazenamento, *throughput* de rede e consumo de energia) e o custo operacional de *clusters* compostos por Raspberry Pi Model 2B e Odroid XU-4 com a utilização do Hadoop, concluindo que, apesar das limitações de hardware, tais plataformas são viáveis para pesquisa em computação de baixo custo e sustentável.

Em 2020, Besimi et al. (2020) focaram na aplicação de *clusters* de Raspberry Pi energeticamente eficientes para algoritmos de aprendizado de máquina em recomendação de artigos científicos, evidenciando a redução de custos e consumo de energia em comparação com alternativas de nuvem, embora com menor escalabilidade. Complementarmente, Basford et al. (2020) apresentaram uma análise detalhada de *clusters* de SBCs (Raspberry Pi 3B, 3B+, Odroid C2) utilizando a técnica *Pi Stack*, apresentando como esses *clusters* podem alcançar alta eficiência energética e custo-benefício, reforçando seu

potencial para computação de borda sustentável e portátil.

Di Pierro e Hank (2024) analisaram a eficiência paralela e o consumo de energia de um *cluster* híbrido composto por 16 Raspberry Pi 4 e 8 Nvidia Jetson Nano em tarefas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), concluindo que *clusters* de baixo custo são uma solução viável e energeticamente eficiente para computação paralela em larga escala. Silva e Freitas (2024) apresentaram uma implementação e avaliação de um *cluster* de Banana Pi como alternativa de baixo custo para computação paralela, utilizando benchmarks NAS e destacando seu desempenho promissor e maior largura de banda de comunicação em comparação com *clusters* de Raspberry Pi.

Embora existam estudos sobre desempenho e eficiência energética em *clusters* de SBCs, em especial com Raspberry Pi, há uma ausência de análises comparativas envolvendo o Banana Pi, conforme Tabela 1. Este trabalho busca preencher essa lacuna, avaliando, por meio do *Conjugate Gradient* (CG) Classe B do *NAS Parallel Benchmarks*, o desempenho e o consumo energético de ambos os *clusters*, oferecendo dados objetivos para soluções acadêmicas de baixo custo e eficiência energética.

Tabela 1. Comparação entre os trabalhos correlatos

Trabalho	Raspberry Pi	Banana Pi	Outro SBC	Benchmark	Foco
Zacarias (2014)	✗	✗	–	HPL	Desempenho
Garcia & Freitas (2015)	✓	✗	–	BT/CG/EP (NAS)	Desempenho
Saffran et al. (2017)	✓	✗	–	K-means, Apriori	Desempenho e Eficiência energética
Qureshi & Koubaa (2019)	✓	✗	Odroid XU-4	Hadoop	Desempenho e Eficiência energética
Besimi et al. (2020)	✓	✗	–	Machine Learning	Eficiência energética
Basford et al. (2020)	✓	✗	Odroid C2	Pi Stack	Eficiência energética
Di Pierro & Hank (2024)	✓	✗	Nvidia Jetson Nano	CFD	Desempenho e Eficiência energética
Silva & Freitas (2024)	✗	✓	–	BT/CG/EP (NAS)	Desempenho
Este Trabalho	✓	✓	–	CG (NAS)	Desempenho e Eficiência energética

3. Referencial Teórico

3.1. Clusters de Computação de Baixo Custo

Clusters de computação são sistemas compostos por vários computadores interconectados que trabalham de forma cooperativa para aumentar a capacidade de processamento. Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas aplicações, como simulações científicas, aprendizado de máquina e processamento de grandes volumes de dados. Com o avanço da tecnologia, surgiram *clusters* de baixo custo baseados em computadores de placa única, também chamadas de *Single Board Computers* (SBCs), como o Raspberry Pi e o Banana Pi. Esses dispositivos foram inicialmente desenvolvidos para fins educacionais, mas rapidamente passaram a ser utilizados para pesquisas em computação paralela e distribuída devido à sua acessibilidade e eficiência energética (Saffran et al., 2017). A

escolha entre essas plataformas depende de fatores como custo, consumo energético e requisitos específicos das aplicações a serem utilizadas.

3.2. Benchmarking para Avaliação de Desempenho

Benchmarking é uma metodologia utilizada para medir e comparar o desempenho de sistemas computacionais. No contexto de *clusters*, os *benchmarks* são fundamentais para avaliar aspectos como tempo de execução, eficiência energética e escalabilidade. A implementação de *benchmarks* permite identificar problemas no desempenho e oportunidades de otimização. Dessa forma, ao comparar o Raspberry Pi e o Banana Pi sob a mesma carga de trabalho, é possível determinar qual das plataformas oferece melhor eficiência computacional.

3.3. Eficiência Energética em Clusters

A eficiência energética é um aspecto fundamental na computação paralela, especialmente em *clusters* de baixo custo, onde o consumo elétrico pode impactar diretamente a viabilidade do sistema. O consumo de energia em *clusters* é influenciado por diversos fatores, como a arquitetura do hardware, a eficiência do software e os padrões de execução das aplicações. A avaliação rigorosa do desempenho e do consumo energético é, portanto, essencial, sendo comumente realizada através de *benchmarking*, que utiliza algoritmos padronizados para medir e comparar diferentes arquiteturas sob cargas de trabalho controladas (Shao et al., 2022).

4. Metodologia

Nesta seção, são apresentados os materiais empregados para a elaboração da pesquisa e o método utilizado na execução. Para o desenvolvimento do projeto, foi utilizada a ferramenta de *benchmarking* *NAS Parallel Benchmarks* (NPB), i.e., um conjunto de algoritmos desenvolvido pela NASA para avaliar o desempenho de *clusters* e supercomputadores.

Este estudo avalia o desempenho e a eficiência energética de dois *clusters* de baixo custo: um com 12 Banana Pi BPI-M1 (CPU Allwinner A20 Dual-core, 1 GB DDR3, Debian 11) e outro com 12 Raspberry Pi 2 Model B V1.1 (CPU Broadcom BCM2836 Quad-core, 1 GB LPDDR2, Raspberry Pi OS Lite baseado no Debian 12). Ambos utilizam rede interna dedicada por *switch* de 32 portas e executam o *benchmark* com compilador GNU Fortran 10.2.1 padronizado. O consumo de energia foi medido com DMI T50T. A metodologia adotada neste estudo, ilustrada em detalhes no fluxograma da Figura 1, baseia-se na execução de um algoritmo do conjunto *NAS Parallel Benchmarks* (NPB) em sua versão 3.4.3, (Division, 2024).



Figura 1. Fluxograma da Metodologia de Trabalho.

Dentre os testes do *NAS Parallel Benchmarks*, adotou-se o *benchmark Conjugate Gradient* (CG), um *kernel* iterativo voltado à resolução de sistemas esparsos de equações lineares, que exige intensa comunicação e sincronização entre processos, sendo adequado

para avaliar a eficiência de *clusters* sob cargas distribuídas. Foi utilizada a Classe B, que equilibra complexidade e viabilidade de execução, além de permitir comparações com trabalhos correlatos do grupo de pesquisa. Os experimentos variaram o número de processos, registrando tempo médio de execução, potência ativa média e consumo total de energia, possibilitando análise comparativa de escalabilidade e eficiência energética entre os *clusters* Banana Pi e Raspberry Pi.

4.1. Cálculo de Métricas de Desempenho e Energia

Os dados coletados pelos medidores DMI T50T durante a execução do *benchmark* foram processados considerando `timestamp` e `potencia_ativa`, utilizados para calcular tempo de execução, potência média e energia total. A energia consumida, em Joules (J), foi obtida pela fórmula

$$Energia(J) = P_{media} \times t_{total}$$

Onde P_{media} é a potência ativa média e t_{total} o intervalo entre o primeiro e o último `timestamp`. Os resultados foram convertidos para quilojoules (kJ) para apresentação. Cada configuração de número de processos foi executada 10 vezes, e as médias e desvios padrão dessas métricas foram calculados para compor os gráficos de resultados.

5. Resultados e Discussão

Os resultados de tempo de execução, potência e energia estão resumidos nas Tabelas 2 e 3, e ilustrados nas Figuras 2, 3 e 4. Os testes, realizados com 1, 2, 4, 8, 16 e 32 processos e 10 iterações por configuração, permitem avaliar os impactos da escalabilidade no desempenho, consumo e gasto energético. As barras de erro nos gráficos representam o desvio padrão, evidenciando a variabilidade dos dados. Além disso, as margens de erro máximas para um intervalo de confiança de 95% no Banana Pi são de 3.76%, 0.61% e 3.65% para tempo, potência e energia, respectivamente. Já no Raspberry Pi, os valores correspondentes são de 1.92%, 0.73% e 1.66%, reforçando a confiabilidade estatística dos resultados obtidos em ambos os sistemas. A análise a seguir interpreta esses resultados à luz das características arquiteturais dos *clusters*, destacando padrões de eficiência e limitações de escalabilidade.

Tabela 2. Resumo dos resultados médios e desvios padrão por número de processos (Banana Pi - NAS CG Classe B)

Processos	Tempo (s)	Potência (W)	Energia (kJ)
1	5406.8 ± 3.1	40.2 ± 0.1	218 ± 0
2	1939.9 ± 6.7	40.7 ± 0.3	79 ± 1
4	1075.0 ± 48.4	42.0 ± 0.1	45 ± 2
8	388.6 ± 10.9	44.7 ± 0.1	17 ± 0
16	429.5 ± 13.5	48.5 ± 0.1	21 ± 1
32	485.0 ± 10.6	51.1 ± 0.1	25 ± 1

A comparação entre os *clusters* evidencia diferenças marcantes em desempenho e eficiência energética à medida que se aumenta o número de processos. O Banana Pi,

Tabela 3. Resumo dos resultados médios e desvios padrão por número de processos (Raspberry Pi - NAS CG Classe B)

Processos	Tempo (s)	Potência (W)	Energia (kJ)
1	3037.3 ± 2.8	25.2 ± 0.0	77 ± 0
2	1553.8 ± 2.7	25.5 ± 0.0	40 ± 0
4	1233.0 ± 2.1	26.0 ± 0.0	32 ± 0
8	543.6 ± 1.1	27.2 ± 0.0	15 ± 0
16	403.7 ± 10.8	29.5 ± 0.2	12 ± 0
32	314.1 ± 4.4	33.7 ± 0.3	11 ± 0

mesmo com apenas dois núcleos por placa, apresenta comunicação mais eficiente entre os nós graças à porta Gigabit Ethernet (10/100/1000 Mbps, Realtek RTL8211E/D)¹, enquanto o Raspberry Pi, com quatro núcleos, sofre com a limitação do Fast Ethernet (100BASE-TX)², o que impacta diretamente o desempenho em ambientes de computação paralela e distribuída.

Ambos apresentaram redução significativa no tempo de execução de 1 para 8 processos (Figura 2; Tabelas 2 e 3). A partir desse ponto, os comportamentos divergem: no Banana Pi o tempo volta a crescer com 16 e 32 processos, sugerindo gargalos no gerenciamento paralelo e na comunicação pelo menor número de núcleos. Já no Raspberry Pi o tempo continua caindo — ainda que com ganhos marginais — até 32 processos, indicando maior escalabilidade, mesmo com a limitação de rede entre os nós.

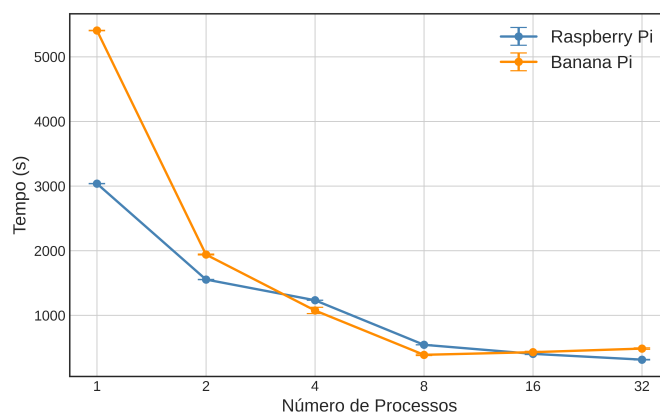


Figura 2. Tempo médio de execução em função do número de processos ativos

Em termos de potência média consumida, ambos os sistemas apresentaram crescimento proporcional ao número de processos, como esperado em arquiteturas *multicore* (Figura 3; Tabelas 2 e 3). O Banana Pi, porém, iniciou em um patamar significativamente mais alto (cerca de 40 W com 1 processo) em relação ao Raspberry Pi (cerca de 25 W), refletindo maior custo energético desde o início das execuções.

¹Especificações técnicas do Banana Pi BPI-M1 disponíveis em: https://docs.banana-pi.org/en/BPI-M1/BananaPi_BPI-M1

²Especificações técnicas do Raspberry Pi 2 Model B V1.1 disponíveis em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>

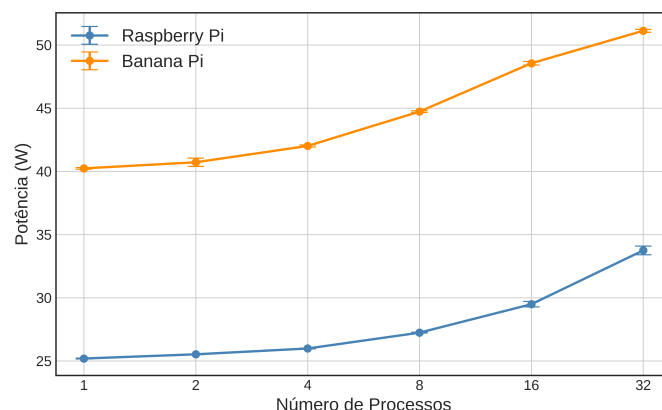


Figura 3. Potência média consumida em função do número de processos

O ponto mais crítico na comparação está no consumo total de energia. Conforme ilustrado na Figura 4 e nas Tabelas 2 e 3, o Banana Pi apresentou uma redução significativa até 8 processos, mas voltou a consumir mais energia com 16 e 32 processos, indicando um ponto de inflexão em sua eficiência energética. Em contraste, o Raspberry Pi demonstrou uma queda contínua e consistente na energia total consumida, mesmo nas configurações com maior paralelismo, sugerindo um aproveitamento mais eficiente dos recursos computacionais em termos energéticos, apesar de sua comunicação mais lenta.

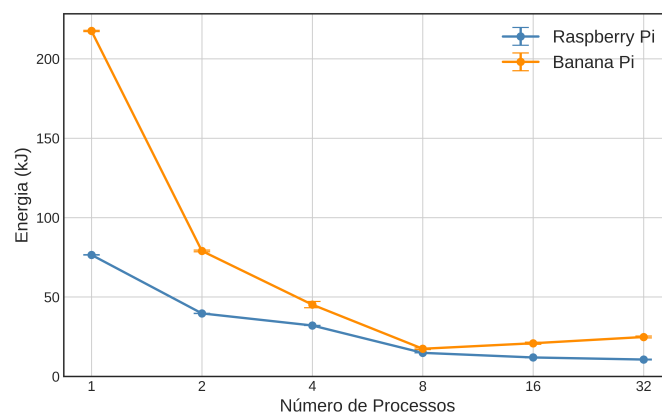


Figura 4. Energia total média consumida em função do número de processos

Assim, conclui-se que o Raspberry Pi apresentou melhor desempenho energético agregado, mantendo escalabilidade positiva e consumo reduzido mesmo com 32 processos, beneficiando-se do maior número de núcleos por placa. Por outro lado, o Banana Pi alcança seu ponto ótimo em 8 processos e sofre penalizações de consumo a partir daí, apesar de sua superioridade na transferência de dados entre os nós, o que ressalta a importância do equilíbrio entre capacidade de processamento e eficiência de comunicação em *clusters* de baixo custo.

6. Conclusão

Este estudo teve como objetivo comparar a eficiência energética e o desempenho computacional de dois *clusters* de baixo custo, baseados em Banana Pi e Raspberry Pi, por

meio da aplicação do *benchmark NAS Parallel Benchmarks* (classe CG-B). A partir de medições experimentais de tempo de execução, potência média e energia total consumida, foi possível entender o comportamento de cada arquitetura sob diferentes quantidades de processos, permitindo análises detalhadas do impacto do *hardware* nas métricas avaliadas.

Os resultados mostraram que ambos os *clusters* são capazes de tirar proveito do paralelismo até certo ponto, com ganhos significativos de desempenho ao se aumentar o número de processos de 1 para 8. No entanto, enquanto o *cluster* de Banana Pi apresentou limitações de escalabilidade a partir de 8 processos, com aumento de tempo e energia consumida, o *cluster* de Raspberry Pi manteve bons níveis de desempenho e consumo energético controlado até 32 processos, destacando-se como a opção mais eficiente do ponto de vista energético.

Conclui-se, portanto, que para aplicações semelhantes ao CG, que exigem eficiência energética e boa escalabilidade em *clusters* de baixo custo, o Raspberry Pi pode apresentar maior viabilidade, sobretudo em ambientes acadêmicos e projetos de pesquisa com restrições orçamentárias. Trabalhos futuros podem ampliar esta análise para outras cargas de trabalho, classes do NAS Benchmarks, ou mesmo utilizar modelos mais novos de SBCs para validar e expandir os resultados deste estudo.

Referências

- Basford, P. J., Johnston, S. J., Perkins, C. S., Garnock-Jones, T., Tso, F. P., Pezaros, D., Mullins, R. D., Yoneki, E., Singer, J., and Cox, S. J. (2020). Performance analysis of single board computer clusters. *Future Generation Computer Systems*, 102:278–291.
- Besimi, N., Çiço, B., Besimi, A., and Shehu, V. (2020). Using distributed raspberry pis to enable low-cost energy-efficient machine learning algorithms for scientific articles recommendation. *Microprocessors and Microsystems*, 78:103252.
- Di Pierro, B. and Hank, S. (2024). Cpu and gpu parallel efficiency of arm based single board computing cluster for cfd applications. *Computers & Fluids*, 272:106187.
- Division, N. A. S. N. (2024). Nas parallel benchmarks. <https://www.nas.nasa.gov/software/npb.html>. Acessado em 25-09-2024.
- Garcia, G. and Freitas, H. (2015). Avaliação de desempenho de um cluster raspberry pi com nas parallel benchmarks. In *Workshop de Iniciação Científica do Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho*, pages 57–62, Florianópolis.
- Qureshi, B. and Koubaa, A. (2019). On energy efficiency and performance evaluation of single board computer based clusters: A hadoop case study. *Electronics*, 8(2).
- Saffran, J., Garcia, G., Souza, M. A., Penna, P. H., Castro, M., Góes, L. F. W., and Freitas, H. C. (2017). A low-cost energy-efficient raspberry pi cluster for data mining algorithms. In *Euro-Par 2016: Parallel Processing Workshops*, pages 788–799, Cham. Springer International Publishing.
- Shao, X., Zhang, Z., Song, P., Feng, Y., and Wang, X. (2022). A review of energy efficiency evaluation metrics for data centers. *Energy and Buildings*, 271:112308.
- Silva, M. and Freitas, H. (2024). Proposta e avaliação de um cluster de banana pi single boards com nas parallel benchmarks. In *Anais Estendidos do XXV Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho*, pages 49–56, São Carlos.
- Zacarias, F. V. (2014). Uma ferramenta de benchmark para auxiliar na análise de desempenho de cluster de computadores. Trabalho de conclusão de curso de bacharelado, Universidade do Estado da Bahia (UNEB).