

Análise de Desempenho e Consumo de um Cluster Baseado em Computadores de Placa Única

Gustavo Rostirolla¹, Vinicius Facco Rodrigues¹, Rodrigo da Rosa Righi¹, Pedro Velho²

¹Prog. Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Unisinos – Brasil

²Centro Universitário Univates, Lajeado – Brasil

grostirolla1@gmail.com, viniciusfacco@live.com, rrrighi@unisinos.br
pedro.velho@univates.br

Abstract. *The power consumption of high-performance computers currently in operation exceeds 200 billion kWh, becoming the most expensive resource in an HPC. To reach the next level in performance, the exascale, an analysis and improvement of the power consumption of these machines is required. This paper aims to analyze the energy consumption of a homogeneous cluster that uses ARM processors, and the impact that keeping the idle nodes on have on the power consumption. To do so we propose a power measurement framework called GreenHPC. Results show that an economy up to 70% can be obtained.*

Resumo. *O consumo energético dos computadores de alto desempenho em funcionamento atualmente ultrapassa a marca de 200 bilhões de kWh, tornando-se o recurso mais caro em um HPC. Para atingir a próxima escala no desempenho, o exascale, é necessária a análise e melhoria do consumo destas máquinas. Este trabalho tem como objetivo analisar o consumo energético de um cluster homogêneo que utiliza processadores ARM, além do impacto que manter os nós ociosos de um cluster ligados tem no consumo energético. Para esta análise propomos um framework de medição consumo chamado GreenHPC. Os resultados mostram que uma economia de até 70% pode ser obtida.*

1. Introdução

Nos últimos anos surgiu uma forte tendência computacional que possibilitou a realização de sofisticadas simulações de fenômenos complexos, e a exploração de grandes quantidades de dados [Lyndon Evans 2008], no entanto, a realização destas simulações utilizando modelos complexos demanda cada vez mais processamento. Esta busca por desempenho não tem levado em consideração o consumo energético, fazendo com que algumas das máquinas do TOP500 consumam megawatts de energia para atingir petaflops de desempenho [Padoin et al. 2012]. Se uma destas máquinas fosse ampliada até o exascale, seriam necessários gigawatts de energia para mantê-la em funcionamento, algo equivalente ao produzido por uma usina nuclear de médio porte [Wehner et al. 2009]. Estes fatores tornaram a eficiência energética uma das principais preocupações no desenvolvimento de qualquer sistema computacional de alto desempenho, e unanimemente reconhecida como a principal limitadora do alcance ao exascale, de acordo com o relatório do DARPA [Kogge et al. 2008].

Visando atender a esta limitação, surgem novas abordagens na computação de alto desempenho, como é o caso da utilização de processadores ARM, normalmente utilizados em dispositivos móveis devido ao seu baixo consumo energético. Diversos pesquisadores vem comparando a relação consumo/desempenho (medida em

flops/watt) destes processadores com arquiteturas x86 ou entre diferentes modelos de ARM [Padoin et al. 2012, Ou et al. 2012, Kritikakos and Road 2011], utilizando benchmarks e ferramentas de medição de consumo, geralmente com baixas taxas de amostragem (1 por segundo).

Neste contexto, o trabalho proposto apresenta **GreenHPC** uma ferramenta de medição de consumo com uma alta taxa de amostragens (até 500 kS/s) e sincronização de clock. Para validar esta proposta realizamos o monitoramento do consumo um cluster composto por 10 nós que utilizam processadores ARM, executando uma aplicação HPC de simulação de sismos. Através desta avaliação serão respondidas duas questões relativas ao consumo energético em HPC como contribuições científica: (i) Qual é o impacto do desligamento dos nós ociosos durante a execução de uma aplicação? (ii) Qual é o número de nós que representam a melhor eficiência energética na execução de uma determinada aplicação?

2. Trabalhos Relacionados

A redução do consumo energético é um assunto bastante explorado, principalmente em dispositivos que dependem de bateria, ou equipamento com alto consumo. Naturalmente, diversas das ferramentas utilizadas nestes contextos são portadas para HPC, como é o caso de (i) uso de TDP (*Thermal Design Power*) para estimar o consumo de forma teórica [Rajovic et al. 2013]; (ii) utilização de multímetros e amperímetros [Ou et al. 2012, Aroca and Gonçalves 2012]; (iii) uso de medidores de consumo comerciais [Padoin et al. 2012, Xu et al. 2012, Feng and Lin 2010, Ou et al. 2012].

Diversos pesquisadores realizam a comparação do consumo energético de processadores ARM com arquiteturas como Xeon e Atom [Ou et al. 2012, Kritikakos and Road 2011] a fim de determinar qual arquitetura possui o maior número de flops/watt, no entanto, utilizam-se de ferramentas com taxas de amostragem e precisão diferentes para medição de cada plataforma. Já outros como Bergen et al. [Bergen et al. 2014] buscam traçar diferentes perfis de consumo de acordo com o tipo da aplicação (CPU Bound, I/O Bound) para escalonar as tarefas a fim de obter um melhor consumo energético, porém ressalta a falta de uma ferramenta de medição com uma melhor granularidade. Através da análise destes trabalhos observamos a falta de um framework flexível, escalável, com uma taxa de amostragem satisfatória para medição de clusters.

3. GreenHPC

O framework GreenHPC, ilustrado na Figura 1, oferece flexibilidade, alta taxa de amostragem e baixo custo na medição do consumo de clusters. Podemos dividir o GreenHPC em três componentes principais: (i) a placa com sensor, responsável por medir a corrente, e eliminar possíveis ruídos; (ii) a placa de aquisição de dados, que realiza a coleta dos dados do sensor e tensão do cluster; (iii) um *Virtual Instrument* (VI) responsável pelo processamento e visualização dos dados. Utilizando os conceitos do GreenHPC um protótipo foi desenvolvido, e será explicado em detalhes a seguir.

O protótipo desenvolvido utiliza o sensor linear de efeito Hall ACS712ELCTR-30-T¹ com sensibilidade de 66 mV/A com faixa de operação de até 30A. Este sensor foi

¹<http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>

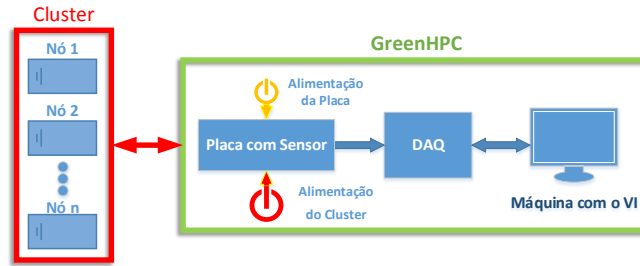


Figura 1. Componentes do GreenHPC conectados ao cluster

escolhido por prover flexibilidade para medição de apenas um nó, bem como de um rack com grande quantidade de nós [Bergen et al. 2014]. Foi realizada a confecção de uma placa de circuito impresso contendo além do sensor, um buffer e um divisor de tensão ligado a um subtrator para que o valor de saída do sensor iniciasse em 0 (por padrão inicia na metade do valor de alimentação da placa), facilitando assim a leitura. O valor medido também passa por um filtro passa-baixa Butterworth de 8ª ordem em topologia Sallen-Key com frequência de corte de 800 Hz, a fim de eliminar possíveis ruídos decorrentes do chaveamento da fonte utilizada na alimentação do cluster.

Os dados da placa com sensor são coletados por uma placa de aquisição de dados (DAQ) da National Instruments modelo PCIe-6341² com um conversor Analógico Digital (ADC) de 16 bits e taxa de amostragem de até 500 kS/s. O intervalo de medição da placa é entre 0,2V com acurácia de 60uV e 10V com acurácia de 2,19mV. Como a tensão de alimentação do cluster está dentro do deste intervalo (5V), estes valores foram coletados diretamente sem a necessidade de divisores de tensão ou optoacopladores [Englert et al. 2013].

Por fim, o terceiro componente é um Virtual Instrument (VI), desenvolvido na ferramenta LabView³. Este componente é responsável pelo processamento e gravação dos dados coleados em um arquivo de log, visualização em tempo real dos valores RMS (*Root Mean Square*) de tensão (*V*) e corrente (*A*), bem como a potência consumida (*W*), calculada através da equação $P = V \times I$. O VI desenvolvido permite a configuração da taxa de amostragem, número de amostras que serão armazenadas no buffer de coleta, além de gerar um arquivo de saída com uma referência de tempo que permite o cálculo da energia consumida para solução do problema (*energy-to-solution*) através da equação 1.

$$E = \sum_{i=1}^N P(i) \times \Delta t(i) \quad (1)$$

A medição proposta é independente de plataforma, ao contrário de [Kansal et al. 2010], não apresenta overhead na computação, como ocorre na utilização de algoritmos de estimativa de consumo [Shen et al. 2013], além de não necessitar de mudanças a nível de código da aplicação, e possuir maior escalabilidade e menor custo que medidores como o *Monsoon power monitor* utilizado por [Ou et al. 2012], limitado a 4,5 A com um custo de \$771 USD. GreenHPC pode ser escalado também para grids, onde cada um dos clusters seria monitorado por um conjunto independente de ferramentas, e posteriormente os arquivos de log gerados poderiam ser apresentados como um conjunto único de dados.

²<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/207407>

³<http://www.ni.com/labview/>

4. Metodologia de Avaliação

A primeira parte desta seção apresenta o cluster utilizado nos testes, incluindo detalhes de hardware, interconexão e alimentação. Já a segunda parte apresenta a aplicação e os testes propostos.

O cluster desenvolvido é composto por 10 computadores de placa única, modelo BeagleBone Black⁴, que possuem um processador ARM Cortex-A8, modelo AM3358 com um núcleo operando a 1 GHz, 512 MB de memória RAM DDR3L, 2 GB de disco além de uma interface de rede Fast Ethernet. Todas as placas foram interconectadas por um switch Fast Ethernet V2H124, e alimentadas utilizando uma fonte chaveada modelo FA-3050.

A aplicação escolhida foi o Ondes3D, desenvolvida pela empresa estatal francesa BRGM⁵ (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*), por ser uma aplicação HPC real, em uso atualmente para simulação de sismos. Os parâmetros desta aplicação são definidos em uma série de arquivos, sendo o parâmetro *time steps*, responsável por determinar o número de intervalos de tempo em que o software irá realizar as simulações de propagação dos sismos [Michèa and Komatitsch 2010], e portanto o utilizado para variação da carga.

Os testes utilizando esta aplicação foram realizados em três configurações, sendo que os resultados apresentados são obtidos através de uma média de 5 execuções para cada caso: (i) Apenas 1 nó, variando o número de *time steps* com o objetivo de avaliar se é possível encontrar um ponto que representa a melhor relação consumo/tempo de acordo com a carga da aplicação; (ii) Variações do número de nós processando, e medindo consumo em todos os nós, a fim de observar o aumento de consumo que os nós ociosos provocam; (iii) Variação do número de nós processando, medindo apenas os que não estiverem ociosos, a fim de analisar a economia de consumo obtida se os nós fossem ligados sob demanda, além de analisar se é possível encontrar um ponto ótimo de acordo com o número de nós para esta aplicação.

5. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos no Experimento i, no qual apenas um nó é utilizado, demonstram que existe uma forte correlação entre o tempo de execução e consumo de energia, uma vez que a aplicação utilizada explora a plataforma suficientemente a ponto de utilizar a totalidade dos recursos disponíveis. Portanto, neste contexto, o consumo energético está relacionado diretamente ao tempo de execução (i.e. número de *time steps*).

Como pode ser observado na Figura 2 (a), no Experimento ii quanto maior o número de nós processando, menor será a quantidade de energia gasta para solução do problema. Isto ocorre pois o consumo dos nós que estão ociosos também está sendo medido, mesmo não realizando processamento, cenário tipicamente encontrado em clusters.

Já no experimento iii, cujos dados obtidos podem ser observados na Figura 2 (b), é possível observar uma economia de energia de até 70,51% executando com apenas 2 nós, no entanto, para obter esta melhora no consumo foi necessário um aumento de 69,54% no tempo de execução, como pode ser observado na Figura 3 (a).

⁴<http://beagleboard.org/Products/BeagleBone+Black>

⁵<http://www.brgm.fr/>

Esta observação retoma a pergunta apresentada anteriormente – Qual é o número de nós que representa a melhor eficiência energética na execução de uma determinada aplicação? Para esta aplicação é possível determinar que o menor consumo energético para a solução do problema é obtido com a utilização de 2 nós, no entanto, existe um aumento de tempo muito expressivo. Para determinar um caso ótimo, podemos observar a Figura 3 (b), que permite determinar que para esta aplicação a melhor relação consumo/tempo pode ser obtida com a utilização de 7 nós, onde é possível obter 30,1% de economia de energia, com um aumento de apenas 26,76% do tempo.

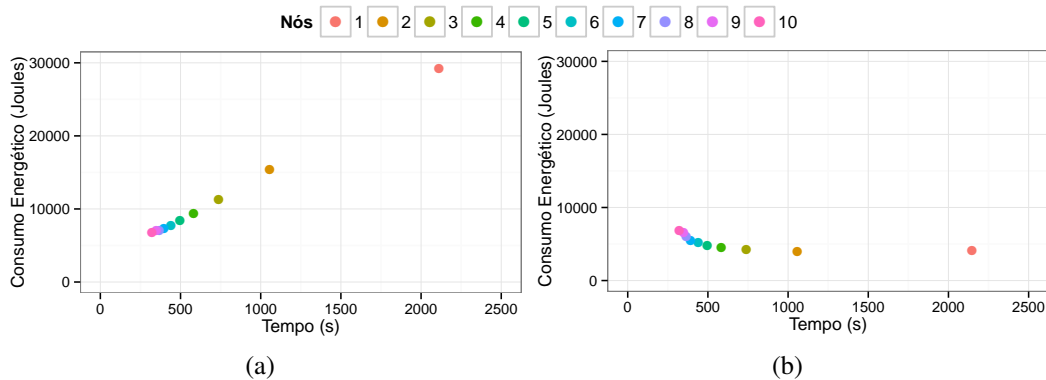


Figura 2. Relação do consumo energético e do tempo, de acordo com o número de nós processando, sendo (a) incluída a medição dos nós ociosos e (b) apenas os nós realizando processamento

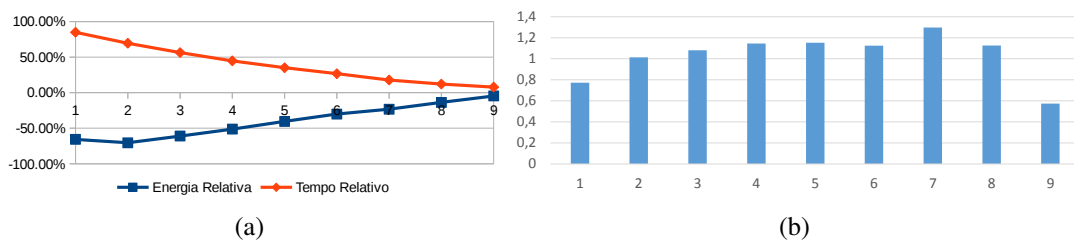


Figura 3. Análise de consumo e tempo do Experimento iii. (a) tempo e consumo de energia relativo e (b) relação entre estas medições.

6. Conclusão

Este artigo apresentou GreenHPC, um framework para medição de consumo tanto em clusters convencionais, como em plataformas com processadores ARM, uma das apostas para a obtenção do exascale. Como principais contribuições, trouxemos a análise da relação energia para solução contra o tempo para a solução utilizando uma aplicação HPC de simulação de sismos, bem como o impacto do desligamento dos nós ociosos em um cluster com processadores ARM. Analisando os dados coletados podemos concluir que é possível obter ganho de mais de 70% no consumo de energia, no entanto, também é necessário levar em conta o tempo de execução da aplicação. Traçamos uma linha relacionando estas duas variáveis, onde foi possível observar qual o ponto ideal para execução desta aplicação especificamente, no entanto, acreditamos que esta relação possa ser estendida para outras aplicações, reduzindo expressivamente o consumo energético em HPC.

Referências

- Aroca, R. and Gonçalves, L. G. (2012). Towards Green Data-Centers: A Comparison of x86 and ARM Architectures Power Efficiency. *Parallel and Distributed Computing*, 72(12):1770–1780.
- Bergen, A., Desmarais, R., Ganti, S., and Stege, U. (2014). Towards software-adaptive green computing based on server power consumption. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Green and Sustainable Software - GREENS 2014*, pg. 9–16.
- Englert, F., Schmitt, T., Reinhardt, A., and Steinmetz, R. (2013). How to Auto-Configure Your Smart Home? High-Resolution Power Measurements to the Rescue. pg. 215–224.
- Feng, W. and Lin, H. (2010). The Green500 List: Year Two. In *In 24th IEEE Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum (IPDPSW)*.
- Kansal, A., Zhao, F., and Liu, J. (2010). Virtual machine power metering and provisioning. *Proceedings of the 1st . . .*, pg. 39–50.
- Kogge, P., Bergman, K., Borkar, S., Campbell, D., Carson, W., Dally, W., and Denneau, E. A. (2008). Exascale Computing Study: Technology Challenges in achieving Exascale Systems. Technical report, DARPA IPTO.
- Kritikakos, P. I. and Road, M. (2011). Low-power high performance computing. pg. 6–9.
- Lyndon Evans, P. B. (2008). LHC Machine. *Journal of Instrumentation*, 3 (08).
- Michèa, D. and Komatitsch, D. (2010). Accelerating a Three-dimensional Finite-difference Wave Propagation Code Using GPU Graphics Cards. *Geophysical Journal International*, 182(1):389–402.
- Ou, Z., Pang, B., Deng, Y., Nurminen, J., Yla-Jaaski, A., and Hui, P. (2012). Energy-and Cost-efficiency Analysis of ARM-based Clusters. In *12th IEEE/ACM Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid)*.
- Padoin, E. L., Oliveira, D. A. G., Velho, P., and Navaux, P. O. A. (2012). Evaluating the Performance and Energy of ARM Processors for High Performance Computing. In *41st International Conference on Parallel Processing (ICPP), 1st International Workshop on Unconventional Cluster Architectures and Applications (UCAA)*, pg. 1–8. IEEE.
- Rajovic, N., Rico, A., Vipond, J., Gelado, I., Puzovic, N., and Ramirez, A. (2013). Experiences with mobile processors for energy efficient hpc. In *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, DATE '13*, pg. 464–468, San Jose, CA, USA. EDA Consortium.
- Shen, K., Shriraman, A., Dwarkadas, S., Zhang, X., and Chen, Z. (2013). Power Containers: An OS Facility for Fine-Grained Power and Energy Management on Multicore Servers. pg. 65–76.
- Wehner, M., Oliner, L., and Shalf, J. (2009). A real cloud computer. *Spectrum, IEEE*, 46(10):24–29.
- Xu, Z., Tu, Y.-C., and Wang, X. (2012). PET: Reducing Database Energy Cost via Query Optimization. In *PVLDB*, volume 5(12), pg. 1954–1957.