

# Análise do Consumo Energético de uma Aplicação de Alto Desempenho em Dinâmica de Fluidos

Cristian M. Weber, Lucas R. de Araujo  
Fernando E. Puntel, Andrea S. Charão, João Vicente F. Lima

<sup>1</sup> Laboratório de Sistemas de Computação  
Universidade Federal de Santa Maria

***Resumo.** Com o progresso do desempenho de supercomputadores ao longo dos anos, o consumo energético passou a ser um aspecto muito relevante. O presente trabalho visa verificar a eficiência energética do Incompact3D, um software importante da área de dinâmica de fluidos. Os dados foram coletados a partir de diferentes configurações de execução da aplicação, retratando um comportamento de consumo energético até então desconhecido para o Incompact3D.*

## 1. Introdução

Durante muito tempo, a comunidade de *High Performance Computing* (HPC) manteve foco na obtenção de um maior poder de processamento, destacando como motivos de tal melhora o aumento de *clock* e uso da tecnologia de múltiplos processadores. No entanto, estes fatores são contribuintes de um conseqüente aumento de gasto energético. Dessa forma, os sistemas HPC passaram a ser avaliados não só pelo desempenho, mas também pela eficiência de consumo de energia, assim ampliando a discussão e a quantidade de estudos a respeito da relação entre esses dois aspectos.

Uma área de aplicação de computação de alto desempenho que está em grande expansão é a área de dinâmica de fluidos, que envolve o desafiador problema de física clássica de fluxos turbulentos, caracterizado por movimentos complexos e desordenados em uma ampla escala de tempo e espaço [Laizet e Li 2011]. Neste cenário, o *software* Incompact3D é uma importante ferramenta que provê a possibilidade de estudo da área.

Devido à complexidade do problema a ser tratado por este *software*, é essencial o uso da aplicação em sistemas multiprocessados, a fim de evitar um gasto elevado de tempo de execução. Para este tipo de aplicação, o uso de máquinas com arquitetura do tipo *cluster* e servidores é recomendado. De fato, o Incompact3D é fortemente beneficiado por uma paralelização baseada no padrão *Message Passing Interface* (MPI) para comunicação entre processos, já tendo sido executado em até  $O(10^5)$  núcleos [Laizet e Li 2011] distribuídos em um grande *cluster*.

Embora já existam análises de desempenho do Incompact3D, seu consumo energético ainda não foi alvo de investigações. Assim, neste contexto, será apresentado e comparado neste trabalho o impacto sobre o consumo energético de diferentes situações e configurações da execução do Incompact3D em um sistema de múltiplos núcleos.

## 2. Trabalhos Relacionados

A importância do estudo da relação entre eficiência energética e HPC é reafirmada pela variedade de pesquisas neste tema. Fora do contexto de dinâmica de fluidos, em

[Bez et al. 2015] foi analisado o consumo energético de uma aplicação com alto custo de processamento em um *cluster* não convencional, na área de simulação de eventos geofísicos. Os resultados se mostraram favorecidos ao usar *flags* de otimização *energy to solution*, com uma redução de consumo de mais de 50%.

Em [Shafik et al. 2015] é explorada a interface de programação multiprocessada OpenMP juntamente com a aplicação de *Dynamic Voltage and Frequency Scaling*, a fim de alcançar uma minimização de energia consumida. Através da abordagem inovadora proposta por este trabalho, foi verificado que é possível alcançar uma economia de energia de até 17% em relação as abordagens já existentes.

### 3. Incompact3D

O estudo sobre o comportamento de escoamentos é de interesse de diversas áreas. Na prática, a física desses escoamentos é inconsistente e desordenada e tem aspecto comportamental turbulento, dependente de tempo e espaço. Dessa forma, a ampliação de conhecimento de tal aspecto é muito importante para entender os resultados que são afetados. O escoamento de um fluido é descrito pelas equações diferenciais de Navier Stokes. Para resolver tais equações é exigido uma alta capacidade de processamento de cálculos, ainda mais em casos turbulentos. Assim, o Incompact3D é uma poderosa ferramenta capaz de realizar a simulação de casos de escoamentos altamente complexos através de um grande nível de paralelização. Esta ferramenta utiliza como método a simulação numérica direta (DNS), que compõe uma solução numérica precisa e se baseia na resolução das equações que descrevem a dinâmica de fluidos.

A alta paralelização da solução do problema permitida no uso do Incompact3D, assim como a decomposição da malha do plano cartesiano 3D, é alcançada através da integração com a biblioteca de comandos de decomposição 2D e uma interface de Transformações Rápidas de Fourier (2DECOMP&FFT) [Li e Laizet 2010]. Assim, os passos *convection/diffusion*, *velocity divergence* e *pressure gradient* [Laizet e Li 2011] da resolução das equações de Navier Stokes se beneficiam de rotinas de transposição que envolvem a comunicação entre processos, disponibilizadas por essa biblioteca auxiliar.

### 4. Materiais e Métodos

A máquina utilizada para a coleta de dados é uma NUMA SGI UV2000 de arquitetura com 48 núcleos de processamento (Intel® Xeon® CPU E5-4617 @ 2.90GHz) e 512GB de memória RAM. As execuções paralela realizadas usam MPI com a versão 2.0.2 da distribuição OpenMPI. A coleta de dados a respeito do gasto energético foi feita utilizando o LIKWID [Treibig et al. 2010] na versão 4.2.1.

A escolha do LIKWID como instrumento de monitoramento se dá pelo fato de ser fácil de ser utilizado, além de apresentar uma portabilidade considerável. Núcleos múltiplos podem ser medidos simultaneamente e é adequado tanto para arquiteturas de processadores x86 Intel como AMD, em um ambiente Linux. Dentre as diversas ferramentas de monitoramento disponíveis a partir do LIKWID, foi usado neste trabalho a *likwid-powermeter*. Essa ferramenta permite consultar a energia total consumida no período de execução monitorado através de contadores RAPL disponíveis a partir da criação pela Intel da arquitetura *SandyBridge*. Além disso, é possível definir os *sockets* a serem utilizados pela aplicação.

Os testes visaram a comparação em diferentes situações de execução. Em relação ao Incompact3D, foram utilizados valores distintos das variáveis relativas à dimensão da malha do plano cartesiano 3D para diferentes complexidades do problema. Além disso, também variou-se a quantidade do número de processos a serem utilizados pelo MPI.

## 5. Resultados e Discussão

Em um primeiro momento, foi realizada a coleta de dados do consumo energético a partir de diferentes número de processos, a fim de examinar o comportamento da aplicação em diferentes situações de paralelização. Os valores analisados em cada um dos oito experimentos feitos para cada situação de execução se aproximaram suficientemente das médias calculadas, tornando-se desprezível a apresentação das variabilidades em relação a média final. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 1 e são referentes a uma média aritmética de cada um dos oito *sockets* da máquina utilizada. A partir destes dados, é possível verificar uma diminuição na energia consumida por *socket* e do tempo de execução baseados no aumento do uso dos núcleos disponíveis para a aplicação do Incompact3D. Além disso é importante destacar o aumento da potência consumida que, no entanto, se opõe à redução do gasto energético, a qual é preservada devido à compensação da diminuição do tempo de execução da aplicação com a exploração do uso de mais núcleos. É notável também, a estabilização da energia consumida verificada a partir do uso de 32 processos, que, porém, possui um consumo de potência inferior ao consumo da quantidade máxima de processos usados neste experimento.

Número de Processos	Energia Consumida (Joules)	Potência Consumida (Watt)	Tempo de execução (Segundos)
8	2549,47	41,91	60,83
12	1899,32	46,03	41,26
24	1579,15	57,06	27,67
32	1398,04	64,70	21,61
48	1395,90	75,02	18,60

**Tabela 1. Energia e potência consumida referente ao número de processos utilizados**

O Incompact3D permite ao usuário configurar o tamanho da malha do problema a ser resolvido. Dessa forma, foram realizados testes com o objetivo de verificar o impacto dessas alterações no gasto energético. Novamente, os dados representam uma média de cada um dos 8 *sockets* em uma execução de 48 processos. A partir dos resultados obtidos em duas configurações distintas, que se encontram na Tabela 2, foi verificado que, ao ser feito um aumento de aproximadamente 13,46 vezes do volume da malha da configuração 1 para a configuração 2, a variação do consumo energético não se mostra proporcional. De fato, foi constatado um crescimento de mais de 15.7 vezes da energia consumida ao modificar os valores das variáveis de dimensão  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$ .

## 6. Considerações Finais

A partir dos testes realizados neste trabalho, pôde-se observar um comportamento de consumo energético do Incompact3D, que até então não havia sido investigado. Tais resultados reforçam a ideia de que o usuário deve estar ciente do efeito negativo sobre

	Dimensões (nx, ny, nz)	Nós da malha 3d	Energia Consumida (Joules)
Configuração 1	128, 257, 128	4.210.688	1395,9
Configuração 2	256, 865, 256	56.688.640	22010,2

**Tabela 2. Relação da energia consumida e o tamanho da malha de duas configurações**

o consumo de energia ao simular problemas com larga escala da malha cartesiana ao aproveitar o benefício de uso de supercomputadores na resolução de tais problemas. Em trabalhos futuros, poderão ser explorados métodos para otimização do gasto energético que não apresentem efeitos negativos consideráveis no desempenho, principalmente visando a utilização de malhas maiores.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERGS-CNPQ PRONEX pelo financiamento provido para a realização do trabalho.

## Referências

- Bez, J., Bernart, E., dos Santos, F., Schnorr, L., e Navaux, P. (2015). Análise da eficiência energética de uma aplicação hpc de geofísica em um cluster de baixo consumo.
- Laizet, S., Lamballais, E., e Vassilicos, J. (2010). A numerical strategy to combine high-order schemes, complex geometry and parallel computing for high resolution dns of fractal generated turbulence. *Computers & Fluids*, 39(3):471 – 484.
- Laizet, S. e Li, N. (2011). Incompact3d: A powerful tool to tackle turbulence problems with up to  $O(10^5)$  computational cores. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67:1735–1757.
- Li, N. e Laizet, S. (2010). 2decomp & fft-a highly scalable 2d decomposition library and fft interface. In *Cray User Group 2010 conference*, pages 1–13.
- Shafik, R. A., Das, A., Yang, S., Merrett, G., e Al-Hashimi, B. M. (2015). Adaptive energy minimization of openmp parallel applications on many-core systems. In *Proceedings of the 6th Workshop on Parallel Programming and Run-Time Management Techniques for Many-core Architectures*, PARMA-DITAM '15, pages 19–24, New York, NY, USA. ACM.
- Treibig, J., Hager, G., e Wellein, G. (2010). Likwid: A lightweight performance-oriented tool suite for x86 multicore environments. In *Proceedings of PSTI2010, the First International Workshop on Parallel Software Tools and Tool Infrastructures*, San Diego CA.