

Avaliação de Desempenho da Equação do Calor: Uma Análise Comparativa entre Python e Julia

ENZO LISBÔA PEIXOTO, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

NATHAN MATTES, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

PEDRO SCHOLZ SOARES, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Este trabalho apresenta uma análise de desempenho comparativa entre as linguagens Python e Julia na resolução numérica da Equação do Calor utilizando o Método das Diferenças Finitas em 1D, 2D e 3D. O estudo foi conduzido em um ambiente controlado utilizando contêineres Docker e isolamento de recursos de hardware (CPU Pinning) para garantir a reprodutibilidade. Os resultados demonstram a superioridade de desempenho da linguagem Julia em tarefas intensivas de CPU, com speedups significativos em relação à implementação pura em Python, embora com um consumo de memória superior. A análise estatística, incluindo regressão linear e gráficos de estabilidade, valida o comportamento assintótico esperado dos algoritmos e destaca a importância do controle de ruído do sistema operacional em benchmarks de computação.

CCS Concepts: • **General and reference** → **Measurement; Empirical studies.**

Additional Key Words and Phrases: Equação do Calor, Diferenças Finitas, Python, Julia, Benchmarking, Docker

ACM Reference Format:

Enzo Lisbôa Peixoto, Nathan Mattes, and Pedro Scholz Soares. 2025. Avaliação de Desempenho da Equação do Calor: Uma Análise Comparativa entre Python e Julia. *J. ACM* 1, 1, Article 1 (November 2025), 4 pages. <https://doi.org/XXXXXXX.XXXXXXX>

1 Introdução

A simulação numérica de fenômenos físicos, como a difusão de calor, é uma tarefa computacionalmente intensiva que exige eficiência tanto do hardware quanto do software. Historicamente, linguagens compiladas como C e Fortran dominam este cenário. No entanto, linguagens de alto nível como Python e Julia ganharam popularidade pela facilidade de desenvolvimento. Este trabalho investiga o trade-off entre facilidade de uso e desempenho, comparando implementações iterativas da Equação do Calor nas duas linguagens.

2 Metodologia

2.1 O Problema Computacional

A Equação do Calor foi discretizada utilizando o Método das Diferenças Finitas (FDM)[3] com esquema explícito no tempo. Foram implementados três dimensões:

- **1D:** Complexidade $O(L)$, onde L é o tamanho do domínio linear.

Authors' Contact Information: Enzo Lisbôa Peixoto, elpeixoto@inf.ufrgs.br, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil; Nathan Mattes, nmattes@inf.ufrgs.br, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil; Pedro Scholz Soares, pssoares@inf.ufrgs.br, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than the author(s) must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from permissions@acm.org.

© 2025 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM.

Manuscript submitted to ACM

- **2D:** Complexidade $O(L^2)$, representando uma malha quadrada.
- **3D:** Complexidade $O(L^3)$, representando um volume cúbico.

2.2 Design Experimental

Foi utilizado um projeto fatorial completo considerando os fatores:

- **Linguagem:** Python vs. Julia.
- **Dimensão:** 1D, 2D, 3D.
- **Tamanho do Problema (L):** Três níveis (Low, Mid, High) ajustados para cada dimensão para manter tempos de execução mensuráveis.

Cada configuração foi executada 30 vezes ('REPLICACOES = 30') para garantir significância estatística e permitir a análise de variabilidade[1][2].

3 Ambiente e Ferramentas

3.1 Hardware e Controle de Ruído

Para minimizar a interferência do Sistema Operacional e garantir resultados determinísticos, foram aplicadas as seguintes técnicas de controle de ambiente:

- **CPU Pinning:** Os experimentos foram isolados em um núcleo físico específico ('-cpuset-cpus="0"') via Docker.
- **Frequency Governor:** O governador da CPU foi fixado em performance para evitar oscilações de *clock*.
- **Turbo Boost:** Desativado para mitigar variações térmicas (*thermal throttling*).
- **Inibição de Sistema:** Utilização de `systemd-inhibit` para prevenir suspensão ou hibernação durante a execução.

3.2 Software e Automação

O fluxo de trabalho foi totalmente automatizado para garantir reprodutibilidade ("*One script to rule them all*"):

- **Docker:** Contêineres isolados garantiram que as versões das linguagens e bibliotecas fossem idênticas em todas as execuções.
- **Orquestração:** Um makefile que gerenciou a construção da imagem, a geração do plano de execução aleatorizado e a coleta de dados.
- **Análise:** Scripts em R foram utilizados para processar os logs brutos e gerar visualizações estatísticas.

4 Resultados Finais

4.1 Tempo de Execução

Os resultados indicam uma diferença expressiva de desempenho. A Figura 1 apresenta a distribuição do tempo de execução para as três dimensões.

Fig. 1. Painel Comparativo de Tempo de Execução (Python vs Julia) para 1D, 2D e 3D.

Os experimentos demonstram que o Julia oferece tempos de resposta substancialmente menores que o Python para a mesma lógica algorítmica. A validação estatística apresentada na Tabela 1 confirma a consistência dos dados: o alto valor de R^2 em todos os casos indica que a variação do tempo é explicada quase integralmente pelo aumento do tamanho do problema (L), seguindo a complexidade polinomial teórica.

Tabela 1. Coeficiente de Determinação (R^2) para Regressão Linear do Tempo de Execução.

Linguagem	Dimensão	R^2	R^2_{adj}
Python	1D	0.9631	0.9627
Python	2D	0.9720	0.9717
Python	3D	0.9773	0.9771
Julia	1D	0.9924	0.9923
Julia	2D	0.9760	0.9758
Julia	3D	0.9675	0.9671

4.2 Consumo de Memória

A análise de memória revela o custo do desempenho. A Figura 2 e a Tabela 2 mostram que o Julia consome consistentemente mais memória RAM que o Python.

Fig. 2. Perfil de consumo de memória para Julia em 3D, evidenciando a alocação estática.

Tabela 2. Regressão Linear: Pico de Memória ($R^2 \approx 1.0$ indica comportamento determinístico).

Linguagem	Dimensão	R^2
Python	3D	0.9661
Julia	3D	0.9667

5 Discussão

5.1 Compilação JIT vs Interpretação

A vantagem massiva do Julia deve-se à sua compilação *Just-In-Time* (JIT) baseada em LLVM. Ao encontrar um laço for tipado, o Julia gera instruções de máquina otimizadas, similares a C/C++. O Python, por sua vez, realiza a verificação de tipos ('type checking') e o dispatch de métodos dinamicamente a cada iteração do laço, o que introduz um overhead massivo em algoritmos numéricos iterativos ($O(N)$ verificações).

5.2 Trade-off Memória-Velocidade

Confirmou-se que não existe opção perfeita. O desempenho superior do Julia exige uma alocação de memória mais agressiva para manter as estruturas de dados e o código compilado. Para sistemas com restrição severa de memória, uma implementação Python otimizada (via C-extensions) poderia ser preferível, apesar da complexidade de desenvolvimento.

6 Conclusão

Este estudo demonstrou que, para computação científica baseada em simulações iterativas, a linguagem Julia oferece uma combinação superior de produtividade (sintaxe de alto nível) e desempenho (velocidade de execução), superando Python.

Do ponto de vista metodológico, o trabalho evidenciou que a medição precisa de desempenho em sistemas modernos exige um controle rigoroso do ambiente. O isolamento de processos via Docker e o controle de frequência da CPU foram fundamentais para reduzir o ruído experimental e obter dados consistentes e homoscedásticos.

Recomenda-se para trabalhos futuros a exploração de paralelismo (multithreading e GPU) para avaliar se a lacuna de desempenho pode ser reduzida.

Referências

- [1] Perf Schnorr 2025. Perf. Analysis: Análise de Desempenho (CMP223 / INF01146). <https://github.com/schnorr/perf>.
- [2] SMPE Schnorr 2025. SMPE: Scientific Methodology and Performance Evaluation for Computer Scientists. <https://github.com/schnorr/SMPE>.
- [3] REAMAT UFRGS. 2025. *Cálculo Numérico: Um Livro Colaborativo*. UFRGS. <https://github.com/reatmat/CalculoNumerico>