

# Métricas de redes complexas para caracterizar a escalabilidade de programas paralelos

Marcos Paulo Bispo Magueta<sup>1</sup>, Denise Stringhini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)  
Av. Cesare M. Giulio Lattes, 1201 – 12247-014 – São José dos Campos – SP – Brasil

**Abstract.** *This work presents a study on potential scalability indicators of parallel programs to be defined by methodological analysis, based on metrics of complex dynamic networks and time series. Communication events are extracted from an execution trace and a communication graph is generated in order to extract metrics from complex networks. The metrics are then presented on a graph over a period of time, resulting in a time series, where statistical measures can be applied. The objective is to characterize the parallel programs from these time series so that scalability indicators related to the communication pattern can be obtained.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um estudo sobre potenciais indicadores de escalabilidade de programas paralelos a serem definidos por análise metodológica, baseando-se em métricas de redes complexas dinâmicas e séries temporais. Os eventos de comunicação são extraídos de um traço de execução e um grafo de comunicação é gerado de forma que se possa extrair métricas de redes complexas. As métricas são então apresentadas em um gráfico ao longo de um período de tempo, resultando em uma série temporal, onde medidas estatísticas podem ser aplicadas. O objetivo é caracterizar os programas paralelos a partir destas séries temporais tal que se possa obter indicadores de escalabilidade relacionados ao padrão de comunicação.*

## 1. Introdução

Este estudo se refere ao comportamento de padrões de comunicação de programas paralelos, utilizando traços de execução sob a observação em um período de tempo. Em especial, a necessidade de se realizar uma análise da escalabilidade de tais programas desponta como um fator importante para inferir indicadores acerca da execução em número crescente de processos, observando o impacto em ganho ou perda de desempenho. Por escalabilidade de um algoritmo paralelo (em arquitetura paralela), se entende uma medida da sua capacidade de utilizar efetivamente um número crescente de processos, tendo como relação alguma métrica de desempenho que favoreça o incremento. Portanto, estudar a execução de um programa implica em identificar fatores que resultem em afirmações sobre um possível benefício ao se utilizar um paradigma de paralelismo em larga escala.

É possível representar o padrão de comunicação de programas paralelos que se comunicam por troca de mensagens como um grafo onde os processos representam vértices e arestas representam as comunicações entre processos. Com a estruturação em grafos, medidas de redes complexas podem ser extraídas, gerando séries temporais em frequência irregular, visto que o registro de eventos e seus marcadores de tempo (*timestamps*) é feito em tempos distintos pelos processos. Com isso, destaca-se que as medidas extraídas

de uma rede complexa podem ser obtidas pontualmente, gerando uma relação entre a variável observada e o tempo. Assim, o interesse deste estudo é elaborar uma metodologia de caracterização de fatores de escalabilidade utilizando métodos geo-estatísticos (para séries temporais irregulares). Com isso se busca oferecer uma extensão para análises de desempenho clássicas, possibilitando a assertividade em relação a melhorias de desempenho.

## 2. Ferramentas e desenvolvimento

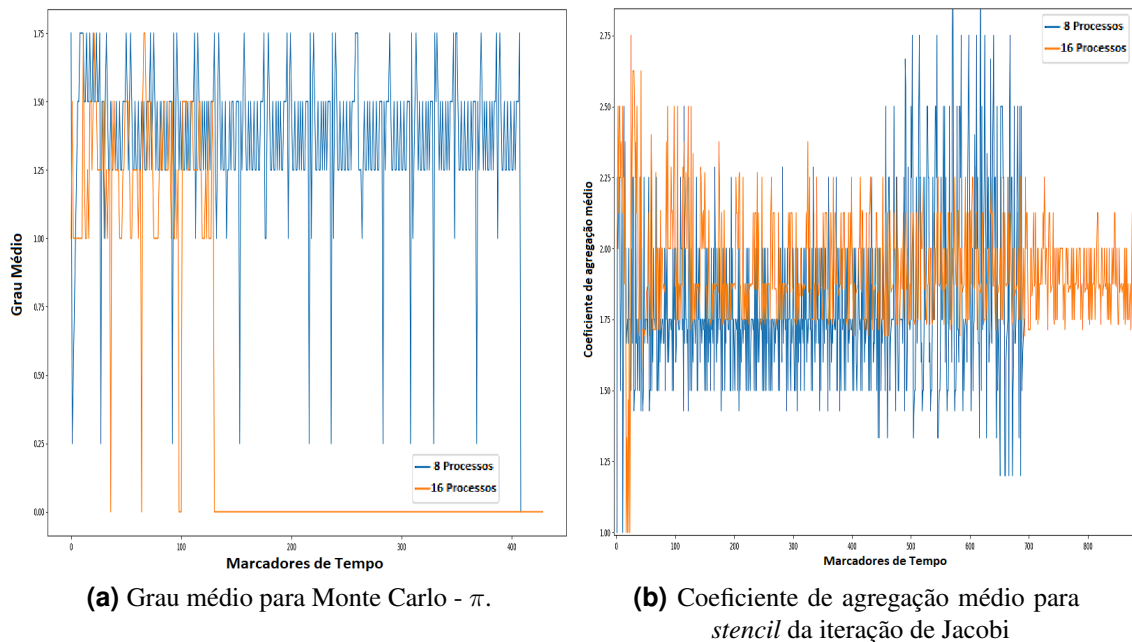
O processo metodológico compreende a execução de programas paralelos utilizando MPI [Snir et al. 1998] já possuindo posições assertivas acerca da sua escalabilidade de forma a poder comparar novos dados com parâmetros já conhecidos. A execução é observada pela biblioteca *Score-P* [Score-P Developer Community 2019], gerando um arquivo de traço, onde então os eventos de envio e recepção MPI são filtrados e é gerada uma rede complexa dinâmica, isto é, uma rede complexa com alteração constante da conectividade entre vértices em uma base de tempo, utilizando a biblioteca Python-NetworkX [Schult 2008], onde os marcadores de tempo dos eventos orientam a dispersão e amostragem instantânea do grafo.

Após a criação do grafo, as medidas são obtidas pontualmente utilizando a biblioteca Python-NetworkX, como por exemplo, o grau médio, coeficiente de aglomeração, correlação de grau, entre outras, a depender da análise a ser realizada sobre a rede. Estes dados são armazenados e então projetados sob uma série temporal irregularmente espaçada, para cada configuração. As séries são então analisadas de forma a observar similaridades estatísticas entre os dados, fazendo projeções de inferência sobre o seu fator de escalabilidade.

## 3. Resultados e discussão

Num primeiro momento, utilizou-se programas paralelos simples para se ter uma ideia do fluxo de transformação das informações e também dos tipos de métricas e suas relações. Uma série temporal irregularmente espaçada não contempla o uso dos mesmos *frameworks* de análise que uma regularmente espaçada, porém, alguns modelos de correlação podem ser aplicados sem realizar conversão para intervalos iguais (que potencialmente resultam em viés), utilizando cruzamento de variogramas [Cressie and Wikle 1998] e utilizando estimadores apresentados em [Hayashi and Yoshida 2005].

O modelo de correlação utilizado busca pontos de semelhança maximais entre diferentes projeções de quantidades de processos par a par. Neste processo, calcula-se a maior covariância e correlação entre zonas de ambas as séries, já que as séries podem possuir tamanhos diferentes e marcadores de tempo diferentes para áreas semelhantes, como as operações de redução (*reduction*) e difusão (*broadcast*), por exemplo. A covariância neste contexto é importante pois é o artifício probabilístico utilizado para descrever a variabilidade conjunta entre duas variáveis aleatórias, isto é, apresentar linearidade entre as dispersões de duas variáveis de forma positiva ou negativa; se positiva, as variáveis tendem a mostrar um comportamento similar em proporção (valores maiores da variável  $X$  representam maiores da variável  $Y$  e vice-versa); se negativo, as variáveis tendem a mostrar uma relação inversa em proporção (valores menores da variável  $X$  representam



**Figura 1. Séries temporais irregulares suavizadas com 8 e 16 processos.**

maiores da variável  $Y$  e vice-versa). Nota-se que, quando se fala de "maior covariância", se observa o valor absoluto de tal, uma vez que estes valores apontam as relações significativas a serem observadas. A Figura 1a mostra uma série suavizada (isto é, em forma não discreta) obtida pela execução de um algoritmo Monte Carlo para cálculo do número  $\pi$ , utilizando 8 e 16 processos, mensurando o grau médio da rede.

O algoritmo Monte Carlo apresenta natureza de comunicação centralizada, evidenciada pela operação de redução. Este fator denota zonas de acoplamento entre as duas séries discretas 1a, tomadas em proporção temporal, sendo o tempo sobreposto de forma relativa, dado o tempo de término diferente. Observa-se uma seção de pico de envio inicial de mensagens (área de covariância positiva). As zonas de redução sobrepostas não apresentam correlação significativa e covariância positiva, evidenciando a sua independência topologicamente. Ademais, os *picos* da série em geral representam eventos de comunicação com o *rank0* para operações de redução intermediárias.

A Figura 1b destaca a execução de uma versão paralela de um programa que segue o padrão de execução matricial do tipo *stencil* (comunicações locais entre vizinhos). Neste exemplo, não aparecem zonas comutativas, ou seja, áreas que se igualam em graus de covariância. Vale destacar que existe uma enorme presença de anomalias quando se trata do grau a depender da topologia, assim a observação da série deve ser feita por estimadores (neste caso a média), avaliando a estacionalidade e destacando as zonas de término da execução. Isto resulta da percepção da ausência de zonas de convergência da série, neste caso isso pode ser demonstrado pela aproximação dos quantis (decaimento gradual da variação do distanciamento).

## 4. Conclusão

A utilização de redes complexas e a consequente extração de medidas demonstram peculiaridades acerca da convergência dos problemas, podendo demonstrar a eficiência de diferentes topologias de algoritmos paralelos, sobretudo de observações sobre escalabilidade [Stringhini and Fazenda 2015]. De forma preliminar é possível afirmar que a formulação estatística apresentada demonstra-se satisfatória, sobretudo tendo como base a utilização de métodos geo-estatísticos, por utilizarem séries temporais irregulares em seus modelos. Ademais, a aproximação de medidas de análise estatística/probabilística apresentam formalização do grupo de dados, além de representarem um modelo sistemático de análise com potencial de replicação para diferentes problemas. Assim, pretende-se contribuir fortemente para o destaque assertivo de características de escalabilidade em um número gradual de processos, a partir da definição de modelos de inferência e estimadores adequados para previsão, de maneira a apontar afirmações acerca da escalabilidade de programas paralelos. Dando continuidade ao trabalho, pretende-se investigar o comportamento de algoritmos já conhecidos tais como os *benchmarks* NAS-SP-MZ e NAS-BT-MZ [Bailey et al. 1995].

## Referências

- Bailey, D., Harris, T., Saphir, W., Van Der Wijngaart, R., Woo, A., and Yarrow, M. (1995). The nas parallel benchmarks 2.0. Technical report, Technical Report NAS-95-020, NASA Ames Research Center.
- Cressie, N. and Wikle, C. K. (1998). The variance-based cross-variogram: You can add apples and oranges. *Mathematical Geology*, 30(7):789–799.
- Hayashi, T. and Yoshida, N. (2005). On covariance estimation of non-synchronously observed diffusion processes. *Bernoulli*, 11(2):359–379.
- Schult, D. A. (2008). Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. In *In Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy)*, pages 11–15.
- Score-P Developer Community (2019). Scalable performance measurement infrastructure for parallel codes (Score-P).
- Snir, M., Otto, S., Huss-Lederman, S., Walker, D., and Dongarra, J. (1998). *MPI-The Complete Reference, Volume 1: The MPI Core*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2nd. (revised) edition.
- Stringhini, D. and Fazenda, A. (2015). Characterizing communication patterns of parallel programs through graph visualization and analysis. pages 565–576.