

REVENIMENTO PARALELO APLICADO AO SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

André Luís Barroso Almeida^{1 2}

Joubert de Castro Lima¹

Marco Antonio Moreira de Carvalho¹

Universidade Federal de Ouro Preto¹

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Ouro Preto²

LVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)

Nov 04-07, 2024



UFOP



INSTITUTO
FEDERAL
Minas Gerais

Introdução

Sistema de manufatura flexível

Um sistema de manufatura flexível (*flexible manufacturing system*, FMS) é caracterizado pela utilização de máquinas de comando numérico e um sistema automatizado de fluxo de matéria prima.

Problemas de sequenciamento de tarefas e troca de ferramentas (SSP)

O SSP tem como objetivo minimizar o número de trocas de ferramentas e consiste em geral de dois subproblemas:

- 1 Determinar a sequência ótima de execução das tarefas (*job sequencing problem*);
- 2 Determinar o *plano de trocas de ferramentas*, i.e., determinar quais ferramentas devem ser trocadas antes de uma nova tarefa ser processada (*tooling problem*, TP).

Introdução

Problemas de sequenciamento de tarefas e troca de ferramentas (SSP)

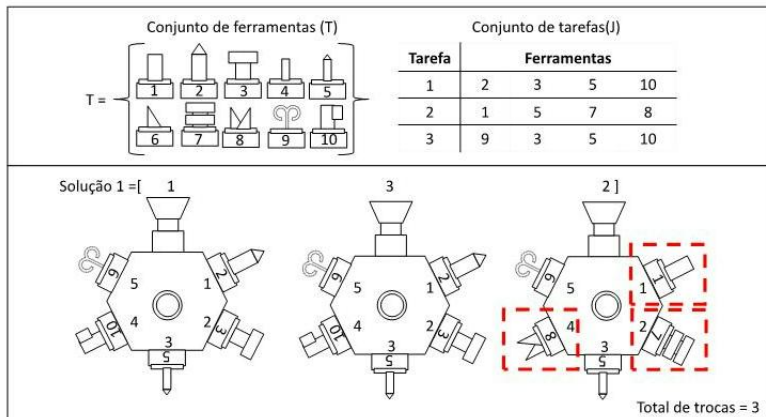


Figure: Exemplo de execução do SSP.

Introdução

Problemas de sequenciamento de tarefas e troca de ferramentas (SSP)

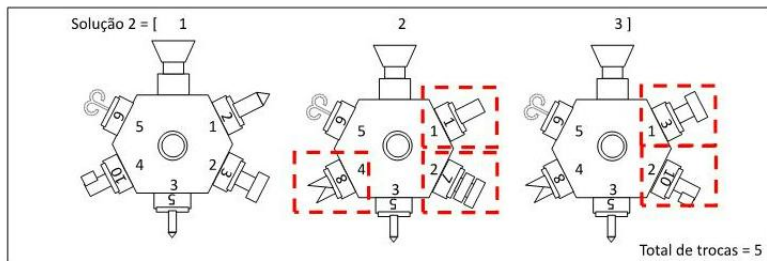


Figure: Exemplo de execução do SSP.

Revisão da literatura

- ❶ Os estudos relacionados ao SSP tiveram início na década de 80, sendo formalmente apresentado por Tang e Denardo [1988];
- ❷ Crama et al. [1994] provaram que o SSP pertence a classe NP-Difícil;
- ❸ Na indústria eletrônica, encontram-se os estudos de Tzur e Altman [2004], Raduly-Baka et al. [2005] e Hirvikorpi et al. [2006];
- ❹ Em sistemas computacionais, encontram-se os estudos de Djellab et al. [2000], Privault e Finke [2000] e Ghiani et al. [2007];
- ❺ Na indústria de bens de consumo, encontram-se os estudos de Shirazi e Frizelle [2001] e Mecler et al. [2021].

Revisão da literatura

- ① Diversos estudos adotaram métodos baseados na programação matemática para solucionar o SSP [Laporte et al., 2004; Yanasse et al., 2009; Catanzaro et al., 2015];
- ② Outros focaram na utilização de heurísticas e metaheurísticas [Salonen et al., 2006; Burger et al., 2015];
- ③ Abordagens baseadas em trajetória, incluindo a busca tabu [Al-Fawzan e Al-Sultan, 2003; Konak et al., 2008] e a busca local iterativa [Chaves et al., 2012; Paiva e Carvalho, 2017];
- ④ Abordagens baseadas em métodos populacionais como o algoritmo genético [Jäger e Molitor, 2008; Mecler et al., 2021] ou algoritmos meméticos [Amaya et al., 2008, 2013; Ahmadi et al., 2018].

Revenimento paralelo

Introdução

- 1 A origem do PT pode ser atribuída, segundo Earl e Deem [2005], ao trabalho de Swendsen e Wang [1986];
- 2 Cinco anos depois, Geyer [1991] propôs um trabalho mais completo, sendo considerado a origem do PT;
- 3 No mesmo ano, Kimura [1991] propôs o mesmo método aplicado a um problema de otimização;
- 4 Utilização em otimização combinatória é rara, sendo abordado em 10 artigos.

Revenimento paralelo

Introdução

- 1 O PT consiste na coordenação da constante T , conhecida como temperatura na distribuição de *Boltzmann*;
- 2 No algoritmo PT, réplicas ou cópias do sistema ($R = r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$) são simuladas em diferentes temperaturas, ou seja, diferentes valores de T ;
- 3 Cada réplica, a uma temperatura fixa, simula o sistema em uma quantidade predefinida de passos;
- 4 Após o processo anterior, uma troca de réplicas entre temperaturas adjacentes é proposta.

Revenimento paralelo

Princípio de funcionamento

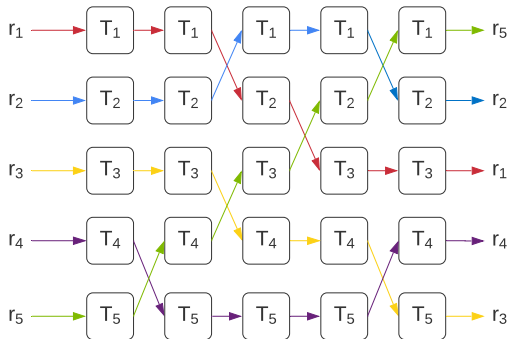


Figure: Exemplo de funcionamento do Revenimento paralelo.

Revenimento paralelo

Implementação paralela para CPU

- 1 *Coarse-grained*;
- 2 Utiliza o modelo de programação paralela *dataflow*;
- 3 Cada nó, cujas dependências tenham sido atendidas, é adicionado a uma fila que controla o fluxo de execução (*ThreadPool*);
- 4 Segundo a taxonomia de Crainic e Hail [2005], do tipo *p-control* (pC);

Revenimento paralelo

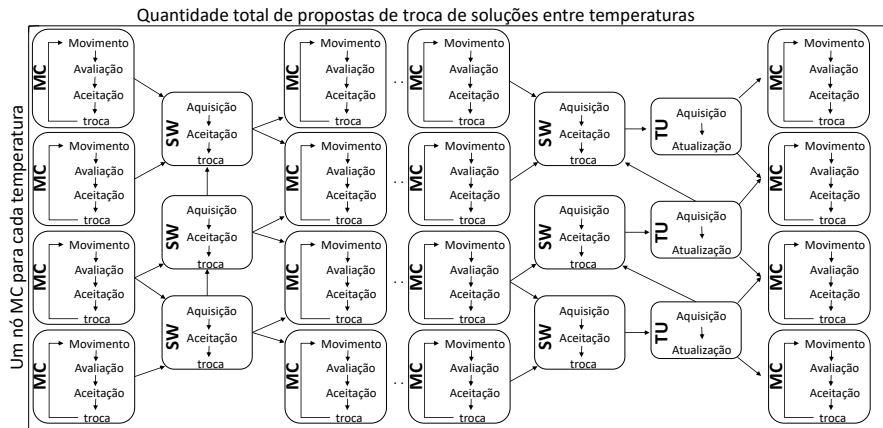


Figure: Modelo paralelo proposto.

Codificação

A codificação utilizada para representar o SSP é baseada em um vetor de n itens, em que n representa o número máximo de tarefas.

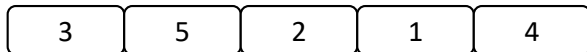


Figure: Codificação da solução.

Experimentos

Visão Geral

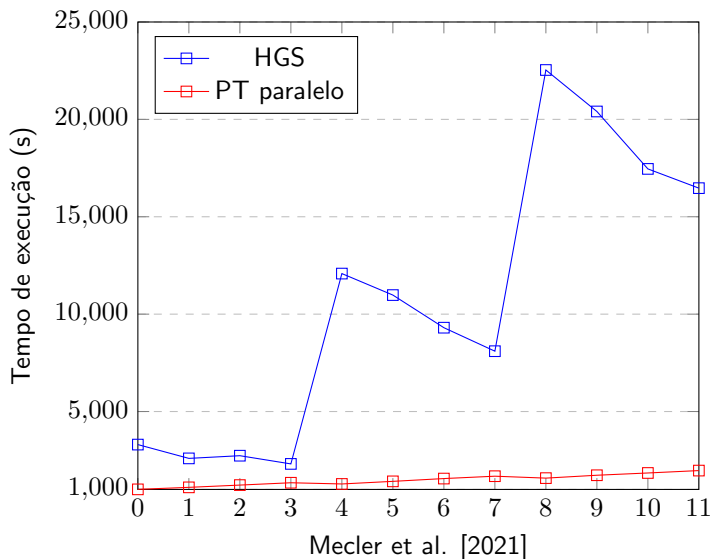
- 1 Foram utilizadas 60 instâncias desenvolvidas por Mecler, Subramanian e Vidal [2021];
- 2 O PT foi comparado com o *Hybrid Genetic Search* (HGS), o estado da arte para resolver o SSP uniforme proposto por Mecler, Subramanian e Vidal [2021].

Experimentos

Resultados

- 1 Em 7 dos 12 conjuntos de instâncias, o PT obteve resultados melhores ou similares que o HGS;
- 2 Nenhuma distância percentual chegou a ultrapassar 0,16%;
- 3 Em relação a média das 10 execuções, o PT supera o HGS em 9 dos 12 conjuntos de instâncias;
- 4 Nos 3 conjuntos de instâncias restantes, a distância percentual não ultrapassou 0,09%.

Experimentos (Tempo de execução)



Experimentos

Resultados

- 1 O PT demonstrou ser similar ao HGS em relação às melhores soluções geradas nos testes estatísticos;
- 2 Na média das soluções, o PT foi superior ao HGS nas instâncias com 50 e 60 tarefas e foi similar nas instâncias com 70 tarefas;
- 3 Em relação ao tempo de execução, o PT foi claramente superior ao HGS, com uma redução de até 92,98%;
- 4 Para uma das instâncias, o HGS demandou 7h e 30min enquanto o PT demandou 30min.

Conclusão

- ➊ Abordou-se neste estudo a aplicação do revenimento paralelo (ou *parallel tempering*, PT) para resolver *job sequencing and tool switching problem* (SSP);
- ➋ Os resultados mostram que o método proposto teve desempenho similar ao método considerado estado da arte em termos de qualidade da solução;
- ➌ O PT possui a vantagem de requerer um tempo de execução significativamente menor;
- ➍ Os resultados obtidos neste estudo motivaram outros dois estudos em problemas relacionados.

- Ahmadi, E., Goldengorin, B., Suer, G. A., e Mosadegh, H. (2018). A hybrid method of 2-tsp and novel learning-based ga for job sequencing and tool switching problem. *Applied Soft Computing*, 65:214–229.
- Al-Fawzan, M. e Al-Sultan, K. (2003). A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *Computers & industrial engineering*, 44(1):35–47.
- Amaya, J. E., Cotta, C., e Fernandez, A. J. (2008). A memetic algorithm for the tool switching problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, p. 190–202, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Burger, A. P., Jacobs, C., van Vuuren, J. H., e Visagie, S. E. (2015). Scheduling multi-colour print jobs with sequence-dependent setup times. *Journal of Scheduling*, 18(2):131–145.
- Calmels, D. (2019). The job sequencing and tool switching problem: state-of-the-art literature review, classification, and trends. *International Journal of Production Research*, 57 (15-16): 505-5025.
- Catanzaro, D., Gouveia, L., e Labbe, M. (2015). Improved integer linear programming formulations for the job sequencing and tool switching problem. *European journal of operational research*, 244(3):766–777.

- Chaves, A. A., Senne, E. L. F., e Yanasse, H. H. (2012). Uma nova heurística para o problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 19:17–30.
- Crama, Y., Oerlemans, A. G., e Spieksma, F. C. (1994). Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. In *Production Planning in Automated Manufacturing*, p. 165–195. Springer.
- Djellab, H., Djellab, K., e Gourgand, M. (2000). A new heuristic based on a hypergraph representation for the tool switching problem. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3):165–176.
- Ghiani, G., Grieco, A., e Guerriero, E. (2007). An exact solution to the tlp problem in an nc machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6):645–649.
- Hirvikorpi, M., Nevalainen, O., e Knuutila, T. (2006). Job ordering and management of wearing tools. *Engineering optimization*, 38(2):227–244.
- Jäger G. e Molitor, P. (2008). Algorithms and experimental study for the traveling salesman problem of second order. In *International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, p. 211–224, Berlin, Heidelberg. Springer.
- Laporte, G., Salazar-Gonzalez, J. J., e Semet, F. (2004). Exact algorithms for the job sequencing and tool switching problem. *IIE transactions*, 36(1):37–45.

- Mecler, J., Subramanian, A., e Vidal, T. (2021). A simple and effective hybrid genetic search for the job sequencing and tool switching problem. *Computers & Operations Research*, 127:105153.
- Paiva, G. S. e Carvalho, M. A. M. (2017). Improved heuristic algorithms for the job sequencing and tool switching problem. *Computers & Operations Research*, 88:208–219.
- Privault, C. e Finke, G. (2000). k-server problems with bulk requests: an application to tool switching in manufacturing. *Annals of Operations Research*, 96(1):255–269.
- Raduly-Baka, C., Knuutila, T., e Nevalainen, O. S. (2005). Minimising the number of tool switches with tools of different sizes. Technical Report 690, Turku Centre for Computer Science, Finland.
- Salonen, K., Smed, J., Johnsson, M., e Nevalainen, O. (2006). Grouping and sequencing pcb assembly jobs with minimum feeder setups. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(4):297–305.
- Shirazi, R. e Frizelle, G. (2001). Minimizing the number of tool switches on a flexible machine: an empirical study. *International Journal of Production Research*, 39(15):3547–3560.

- Tang, C. S. e Denardo, E. V. (1988). Models arising from a flexible manufacturing machine, part i: minimization of the number of tool switches. *Operations research*, 36(5):767–777.
- Tzur, M. e Altman, A. (2004). Minimization of tool switches for a flexible manufacturing machine with slot assignment of different tool sizes. *IIE Transactions*, 36(2):95–110.
- Yanasse, H. H., Rodrigues, R. d. C. M., e Senne, E. L. F. (2009). Um algoritmo enumerativo baseado em ordenamento parcial para resolução do problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 16(3):370–381.
- Konak, A., Kulturel-Konak, S., e Azizoglu, M. (2008). Minimizing the number of tool switching instants in flexible manufacturing systems. *International journal of production economics*, 116(2): 298–307.

Obrigado!

E-mail: andlui.eng@gmail.com