

# Sequenciamento de tarefas e minimização de trocas de ferramentas em máquinas paralelas não-idênticas

## Autor

Pedro Lucas Damasceno  
Universidade Federal de Ouro Preto, BR

## Orientador

Marco Antonio Moreira de Carvalho  
Universidade Federal de Ouro Preto, BR

**Resumo:** Nesse projeto de pesquisa, um novo método é idealizado com o objetivo de produzir soluções mais próximas da otimalidade para o problema de sequenciamento de tarefas e minimização de trocas de ferramentas em máquinas paralelas não-idênticas. Dado um conjunto  $T$  de tarefas, no qual cada uma requer um conjunto  $F$  de ferramentas para serem produzidas, existem  $M$  máquinas paralelas capazes de fabricá-las. O tempo necessário para a finalização das tarefas pode diferir entre as máquinas que as realizam. Aplicações do problema podem ser encontradas, por exemplo, na siderurgia ou na manufatura de semicondutores, onde as tarefas requerem diferentes conjuntos de ferramentas para serem executadas.

**Palavras-chave:** máquinas paralelas; sequenciamento de tarefas; minimização de trocas

## Introdução

Companhias de manufatura estão enfrentando inúmeros desafios desde o início da transformação do mercado consumidor e o interesse crescente por produtos customizados [4]. Segundo o modelo fabril tradicional, uma nova linha de produção seria necessária para cada produto; todavia, além dos entraves logísticos e financeiros envolvidos, a volatilidade com que os interesses do mercado se alteram [2] também inviabilizam esse formato. Dessa forma, para se adaptar à nova realidade socioeconômica e se manterem competitivas no mercado, as fábricas têm adotado o modelo de manufatura flexível, fato que deu origem aos conceitos de 'indústria 4.0' e 'smart factories' [9].

As principais características das 'smart factories' são a alta flexibilidade, a automação na produção, a coleta e análise de dados em tempo real [9] e a utilização de máquinas flexíveis de manufatura (*Flexible Manufacturing System* - FMS) [6]. Uma FMS é caracterizada pela união de máquinas flexíveis através de uma linha de produção automatizada. Cada máquina é equipada com um *magazine* de capacidade limitada, que deve suportar ferramentas o suficiente para a realização de qualquer tarefa individualmente. Entretanto, comumente é impossível comportar simultaneamente todas as ferramentas necessárias para a produção de um conjunto de tarefas, o que faz necessário a interrupção das máquinas para a realização das trocas necessárias a fim de dar sequência ao processo. Na maioria dos sistemas reais de manufatura, a troca de ferramentas e/ou componentes é o processo que consome mais tempo [11] e deve ser evitada

sempre que possível, dadas as grandes implicações financeiras decorrentes de uma linha de produção em pausa.

Com o propósito ordenar a execução das tarefas de forma a minimizar as trocas necessárias, [10] definiram o *Minimal Tool Switch Problem* (MTSP), também conhecido por *Job Sequencing and Tool Switching Problem* (SSP), um problema da classe NP-difícil, dada sua natureza combinatória e a inexistência de um algoritmo capaz de solucioná-lo em tempo polinomial. Conforme a definição de [3], considere um ambiente produtivo em que se tem um conjunto de tarefas  $T = \{1, \dots, N\}$  a serem processadas sequencialmente e sem interrupção em uma única máquina flexível de manufatura e um conjunto de ferramentas  $F = \{1, \dots, M\}$ . Seja  $T_f$  o conjunto de tarefas que requerem a ferramenta  $f \in F$ . Cada tarefa  $t \in T$  requer um subconjunto de ferramentas  $F_t$  e só é possível processá-la quando todo este subconjunto de ferramentas está na máquina. Uma troca de ferramentas consiste em remover uma ferramenta da máquina e incluir outra em seu lugar. No exemplo a seguir, considere 3 como a capacidade do *magazine*.

Ferramenta	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4
A	X	X	X	X
B	-	X	-	X
C	-	-	X	-
D	X	X	X	-

Tabela 1: Sequenciamento com 3 trocas necessárias

Ferramenta	Tarefa 2	Tarefa 4	Tarefa 1	Tarefa 3
A	X	X	X	X
B	X	X	-	-
C	-	-	-	X
D	X	X	-	X

Tabela 2: Sequenciamento ótimo com apenas 1 troca necessária

Várias derivações surgiram em decorrência do problema base definido por [10], tais como as que consideram sequências dependentes de máquina ou o desgaste de ferramentas. Esse trabalho aborda a variação de múltiplas máquinas em paralelo, realidade muito comum em ambientes fabris da atualidade [8]. Diferentemente do problema base, são consideradas mais de uma máquina não-idênticas, ou seja, podem possuir diferentes capacidades de *magazine*, comportar diferentes ferramentas e o tempo para efetuar a mesma tarefa também difere entre as máquinas. Ademais, a quantidade de cópias da mesma ferramenta é limitada, dadas as restrições financeiras de um contexto real, e a função objetivo deve avaliar também o tempo total para conclusão das tarefas e o tempo de espera durante as trocas, caracterizando o problema como multiobjetivo.

O atual estado da arte sobre o problema em questão é da autoria de [1], que complementa o problema definido anteriormente por [5], e que se vale da utilização de heurísticas construtivas em conjunto à metaheurística *Iterated Local Search* (ILS) [7] para obter soluções aproximadas. A hipótese desse trabalho consiste na possibilidade de superar o método em questão através do desenvolvimento de um novo método de aproximação e/ou da combinação de outros já existentes, preferencialmente mais específicos em relação ao problema.

## Objetivos

### Linguagem de Programação & Estruturas de Dados

[1] utiliza a linguagem R, conhecida pelos recursos destinados a manipulação, análise e visualização de dados, o que a torna significativamente mais lenta. Esse trabalho será desenvolvido em C++, amplamente utilizada em circunstâncias de competição devido à sua rapidez e pelos recursos da *Standard Template Libraries* (STL). Definir as estruturas de dados a serem utilizadas também é fundamental para a eficiência do algoritmo, o que está diretamente relacionado a uma maior exploração do espaço de soluções. Para defini-las, é importante revisar métodos já existentes e optar pelas que melhor se encaixam ao problema e suas restrições.

### Instâncias do Problema

O atual estado da arte compartilha publicamente as instâncias utilizadas nos testes, o que facilita eventuais comparações de resultados. Todavia, as instâncias em questão foram geradas de maneira completamente aleatória, sem qualquer embasamento em circunstâncias práticas. Ademais, as instâncias são relativamente pequenas, principalmente em relação ao número de máquinas paralelas. Dessa forma, uma possível contribuição nesse trabalho será a elaboração de instâncias maiores e mais condizentes com a realidade.

### Heurística Construtiva *Multi-Start-Random* (MSR)

Outra possibilidade de melhoria em relação a [1] é a substituição da MSR, heurística construtiva utilizada sob o pretexto de propiciar uma exploração maior do espaço de soluções. O problema com esse método é a baixa velocidade com que converge para uma solução ótima, mesmo que local. Além disso, não há qualquer tratamento que impeça a revisitação de soluções; ou seja, o algoritmo gera diversas soluções iniciais de forma aleatória, mas nada impossibilita que todas confluem na mesma direção após poucas iterações de busca local.

### Perturbação e Resultados da *Iterated Local Search* [7]

A estratégia utilizada por [1] para perturbar soluções e explorar novas vizinhanças considera trocas de tarefas em cada máquina individualmente. Isso facilita a exploração de soluções viáveis, mas restringe significativamente o espaço de busca. Ademais, as porcentagens de melhora provenientes da ILS em relação à solução inicial são menores do que o esperado (12% em instâncias maiores), indicando que há margem para melhora.

## Referências

- [1] CALMELS, D. An iterated local search procedure for the job sequencing and tool switching problem with non-identical parallel machines. *European Journal of Operational Research* 297, 1 (2022), 66–85.
- [2] CAMPBELL, J. Y., AND MANKIW, N. G. Consumption, income, and interest rates: Reinterpreting the time series evidence. *NBER macroeconomics annual* 4 (1989), 185–216.
- [3] CHAVES, A. A., SENNE, E. L. F., AND YANASSE, H. H. Uma nova heurística para o problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção* 19 (2012), 17–30.

- [4] FOGLIATTO, F., DA SILVEIRA, G., AND BORENSTEIN, D. The mass customization decade: An updated review of the literature. *International Journal of Production Economics* 138 (07 2012), 14–25.
- [5] GÖKGÜR, B., HNICH, B., AND ÖZPEYNIRCI, S. Parallel machine scheduling with tool loading: a constraint programming approach. *International Journal of Production Research* 56, 16 (2018), 5541–5557.
- [6] KULATILAKA, N. Valuing the flexibility of flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on engineering management* 35, 4 (1988), 250–257.
- [7] LOURENÇO, H. R., MARTIN, O. C., AND STÜTZLE, T. Iterated local search. In *Handbook of metaheuristics*. Springer, 2003, pp. 320–353.
- [8] PINEDO, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, 3rd ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- [9] SHROUF, F., ORDIERES, J., AND MIRAGLIOTTA, G. Smart factories in industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the internet of things paradigm. In *2014 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (2014), IEEE, pp. 697–701.
- [10] TANG, C. S., AND DENARDO, E. V. Models arising from a flexible manufacturing machine, part i: minimization of the number of tool switches. *Operations research* 36, 5 (1988), 767–777.
- [11] VAN HOP, N. The tool-switching problem with magazine capacity and tool size constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 35, 5 (2005), 617–628.