

Metaheurística aplicada ao planejamento da produção em sistemas de manufatura flexível

Mateus Filipe Moreira Silva

Departamento de Computação
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
Universidade Federal de Ouro Preto

13 de maio de 2025



Sumário

- 1 Introdução
- 2 Revisão Bibliográfica
- 3 Desenvolvimento
- 4 Experimentos
- 5 Conclusão e Próximas Atividades

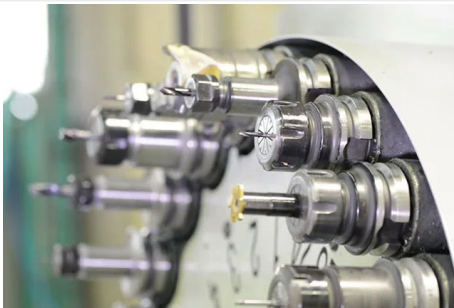
Motivação

- ▶ A crescente demanda do mercado por uma variedade maior de produtos em pequenos volumes tem gerado novos desafios;
- ▶ Esse cenário é conhecido como manufatura **High-Mix Low-Volume** (HMLV);
- ▶ A adaptação das indústrias a essa realidade é crucial para sua competitividade;
- ▶ O problema abordado nesta monografia tem papel fundamental para essa adaptação, propondo soluções para otimizar a produção HMLV.

Introdução - Job Sequencing and Tool Switching Problem

Definições

- ▶ **Tarefa:** Conjunto de operações necessário para fabricar um produto;
- ▶ **Conjunto de ferramentas:** Ferramentas que devem estar presentes no *magazine* da máquina para processar a tarefa;
- ▶ **Máquina:** Equipamento onde as tarefas são processadas, limitado pelo número de *slots* disponíveis no *magazine*.



SSP

Possui como objetivo definir a sequência de tarefas que minimize o número de trocas de ferramentas, pode ser dividido em dois subproblemas:

- ▶ Sequenciamento das tarefas;
- ▶ Plano de trocas (quais ferramentas devem estar no *magazine* da máquina para o processamento de cada tarefa).

Diferentes especificidades

A revisão de Calmels 2019 categoriza os diversos trabalhos a respeito do SSP, de acordo com suas especificidades:

- ▶ Número de máquinas;
- ▶ Tempo de configuração do *magazine*;
- ▶ Objetivos;
- ▶ Tamanho das ferramentas e capacidade do *magazine*;
- ▶ Desgaste de ferramentas.

Versão abordada

- ▶ A versão específica do SSP considerada só foi tratada em um único trabalho, por Dang et al. 2023;
- ▶ Estudo realizado em parceria com indústria real;
- ▶ Modelo de programação inteira e algoritmo genético para resolver o problema.

Características

Múltiplas máquinas: 2 ou 6;

Horizonte de planejamento: 7 dias;

Período de produção não supervisionado: 12 últimas horas do dia;

Trocas de ferramentas: custo associado de 1 unidades;

Instancias de troca: custo associado de 10 unidades;

Tarefas prioritária: custo associado de 30 unidades;

Tarefas finalizadas: lucro associado de 30 unidades;

Tarefas reentrantes: divisão entre tarefa e operação;

Capacidade do *magazine*: 80 ferramentas.

Versão abordada

São disponibilizados:

- ▶ 3 arquivos contendo informações sobre tarefas: não há informações sobre prioridade e reentrância;
- ▶ 1 arquivo contendo 3464 conjuntos de ferramentas.

Análise e resultados

- ▶ Redução de reduções de 80%, 81% e 84,7% nos conjuntos de tarefas originais após filtragem.
- ▶ Os métodos utilizados fazem uso extensivo de agrupamentos por super conjunto de ferramentas;
- ▶ Resultados indicam que para algumas instâncias nenhuma troca foi feita.

Novas Instâncias

- ▶ Conjunto de 33 novas instâncias, baseadas nos conjuntos de ferramentas filtrados;
- ▶ Operações que compõem uma mesma tarefa utilizam o mesmo conjunto de ferramentas;
- ▶ As taxas de reentrância e de tarefas prioritárias são definidas com base nos dados especificados pelos autores.

Parallel Tempering

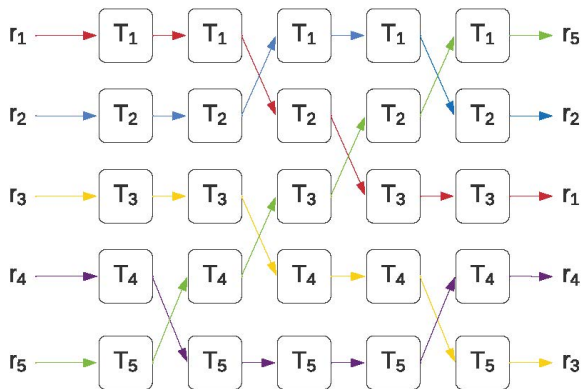
Método de resolução

- ▶ Determina a sequência das tarefas.
- ▶ Método a ser utilizada para resolução do problema é o PT.
- ▶ Já obteve sucesso em outros trabalhos para resolução de problemas de manufatura flexível.

Histórico

- ▶ Método baseado em amostragem estatística.
- ▶ Tem suas raízes em princípios da física.

Parallel Tempering



API e Modificações

- ▶ Implementação por meio de uma API (Almeida, de Castro Lima e Carvalho 2025).
- ▶ Algumas modificações feitas para obter dados estatísticos.

¹<https://github.com/ALBA-CODES/PTAPI/>

²<https://github.com/mateus2k2/PTAPI/>

Pré-processamento

- ▶ Agrupar as operações de uma mesma tarefa;
- ▶ Considera-se uma única tarefa cujo tempo de processamento corresponde à soma dos tempos individuais de ambas as operações;
- ▶ Redução drasticamente o número de tarefas a serem alocadas pelo método.

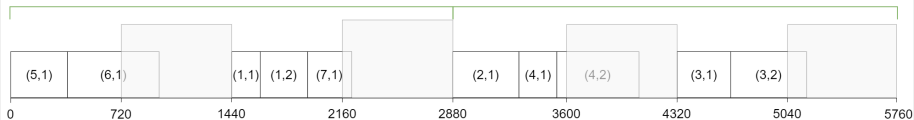
Codificação e Decodificação

(5,1)	(6,1)	(1,1)	(1,2)	(7,1)	(2,1)	(4,1)	(4,2)	(3,1)	(3,2)
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



Máquina 1

Máquina 2



Solução inicial aleatória

Vetor de tarefas construído aleatoriamente.

$$[(1, 1), (6, 1), (1, 2), (7, 1), (2, 1), (4, 1), (4, 2), (3, 1), (3, 2)]$$

Solução inicial heurística

Heurística de solução inicial onde tarefas prioritárias são alocadas todas no início.

Função de avaliação

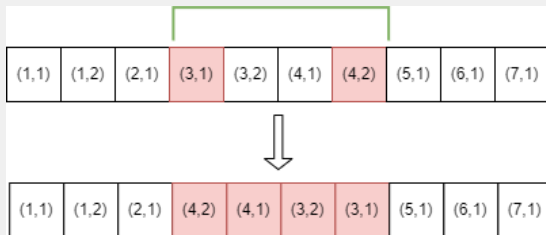
KTNS: *Keep Tool Needed Soonest;*

GPCA: *Greedy Pipe Construction Algorithm.*

Adaptações no KTNS

- ▶ Horizonte de planejamento;
- ▶ Tempo deve ser acumulado para verificar o período não supervisionado e horizonte de planejamento.

Estrutura de vizinhança



lrace

Temperatura inicial: 0.1

Temperatura final: 5

N_{kmax} : 500

Distribuição inicial de temperatura: Exponencial

Tipo de movimento: 2-opt

Tipo de solução inicial: Aleatória com prioritários primeiro

Tipo de ajuste da temperatura: 23%

Proporção para taxa de ajuste da temperatura: 3

Análise dos resultados do Irace

- ▶ Propostas de troca (qT_{emp}) definido com **600** utilizando o tempo de execução como limitante;
- ▶ O mesmo acontece para o tamanho da cadeia de Markov (N_{kmax}), definido como **500** pelo irace.

Tratamento das Tarefas Prioritárias

- ▶ Apenas 6,85% das tarefas prioritárias não foram finalizadas em média;
- ▶ PT mantém o número total de tarefas concluídas constante para cada grupo de instância, afetando prioritárias.

Qualidade das Soluções

- ▶ Solução inicial (S_0) piora com aumento de tarefas prioritárias;
- ▶ Heurística inicial não otimiza o uso dos períodos não supervisionados e minimização de trocas;
- ▶ *Gap* médio de 75,79% entre S_0 e a melhor solução S^* , mostrando eficácia do método.

Robustez do Método

- ▶ Baixo desvio padrão entre execuções, máximo de 4,35%;
- ▶ *Gap* entre solução média (S) e melhor (S^*) de apenas 2,45%, reforça a estabilidade.

Taxa de Convergência e Tempo de Execução

- ▶ Alta taxa de convergência ($> 90\%$), indica que o método pode melhorar com mais tempo;
- ▶ Tempo de execução varia entre 39s e 5822s, sendo um fator limitante;
- ▶ Paralelização do PT sugere que métodos sequenciais teriam pior desempenho.

Conclusão e Trabalhos Futuros

- ▶ Melhorar o desempenho da função de avaliação por meio de paralelização;
- ▶ Exploração de instâncias mais desafiadoras, com conjuntos de ferramentas distintos para operações da mesma tarefa;
- ▶ Implementação do modelo matemático para comparação de resultados;
- ▶ Desenvolvimento de um critério de parada adaptativo para melhorar a eficiência computacional;
- ▶ Publicação dos achados em artigo para o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

OBRIGADO

Referências I



Almeida, André Luís Barroso, Joubert de Castro Lima e Marco Antonio Moreira Carvalho (2025). “Revisiting the parallel tempering algorithm: High-performance computing and applications in operations research”. Em: *Computers & Operations Research* 178, p. 107000. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107000>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054825000280>.



Calmels, Dorothea (2019). “The job sequencing and tool switching problem: state-of-the-art literature review, classification, and trends”. Em: *International Journal of Production Research* 57.15-16, pp. 5005–5025. DOI: 10.1080/00207543.2018.1505057. eprint: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1505057>. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1505057>.



Dang, Quang-Vinh et al. (2023). “Unsupervised parallel machines scheduling with tool switches”. Em: *Computers and Operations Research* 160, p. 106361. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106361>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054823002253>.