

Revenimento Paralelo Aplicado ao Problema de Indexação de Ferramentas

Lorrayne Cristine Ferreira Santos

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

13 de maio de 2025



- 1 Introdução
- 2 Problema de indexação de ferramentas
- 3 Trabalhos relacionados
- 4 Revenimento Paralelo
- 5 Próximos passos
- 6 Conclusão

Javaid, Haleem, Singh e Suman (2022)

A indústria moderna exige cada vez mais eficiência, flexibilidade e personalização, demandando níveis crescentes de adaptação e dinamismo nos processos produtivos.

Soori, Ghaleh Jough, Dastres e Arezoo (2024)

A automação robótica integrada às máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) viabilizaram a execução de processos de usinagem com maior exatidão e menor custo, contribuindo para a construção de ambientes industriais mais adaptáveis e otimizados.

Características

Projetados para oferecer versatilidade e resposta rápida às exigências do mercado, incluindo:

- ▶ Flexibilidade em volume, variedade, mix de produção e layout; reconfiguração rápida e resposta ágil à demanda;
- ▶ Aplicação em indústrias como automotiva, aeroespacial e de eletrônicos, que demandam alta variedade e produção customizada.



Elementos-chave da usinagem

- ▶ **Sequência de operações:** ordem em que a máquina executa as etapas do processo produtivo;
- ▶ **Ferramentas:** dispositivos utilizados para realizar operações como corte, perfuração e modelagem durante o processo de usinagem;
- ▶ **Torreta:** compartimento interno da máquina CNC onde as ferramentas são armazenadas e organizadas para uso automático;
- ▶ **Slots:** espaços físicos disponíveis na torreta onde cada ferramenta é posicionada individualmente.

Automatic tool changer (ATC)

ATC e o processo de indexação

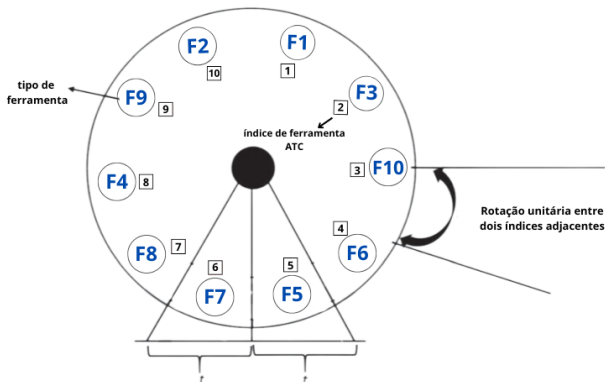
- ▶ Cada ferramenta é posicionada em um *slot*, sendo identificadas pelo **índice da ferramenta**;
- ▶ O ATC realiza **rotações unitárias** na torreta para que ocorra a troca de ferramentas, assim obtém-se o **tempo de indexação da ferramenta**;
- ▶ Ao automatizar esse processo, o ATC reduz o **tempo de ciclo**.



Tool indexing problem (TIP)

Definição

O TIP busca alocar, de forma eficiente, um conjunto de ferramentas $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ nos *slots* de uma torreta, de modo a atender uma sequência fixa de operações $O = [o_1, o_2, \dots, o_n]$, minimizando o tempo de troca entre as ferramentas.



Tool indexing problem (TIP)

Configuração do problema

- ▶ Cada operação $o_i \in O$ requer uma ferramenta específica;
- ▶ A torreta possui capacidade máxima de C slots disponíveis;
- ▶ Cada $f_j \in F$ deve ser única e alocada a um *slot* exclusivo.

<i>slot</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ferramenta	f_1	f_3	f_{10}	f_6	f_5	f_7	f_8	f_4	f_9	f_2

Tool indexing problem (TIP)

Cálculo do custo

- ▶ O deslocamento entre duas ferramentas localizadas nos *slots* i e j é dado por:

$$I_{\text{unitário}} = \min(|j - i|, |i + C - j|)$$

- ▶ O **custo total de indexação** é a soma dos custos individuais de cada transição:

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n I_i$$

Objetivo

Minimizar o tempo de indexação total, reduzindo o tempo não produtivo causado pelas trocas entre ferramentas na torreta.

Tool indexing problem (TIP)

Tabela de transições entre operações e ferramentas

sequência	operações	ferramentas	custo
1	$o_1 \rightarrow o_2$	$f_1 \rightarrow f_1$	0
2	$o_2 \rightarrow o_3$	$f_1 \rightarrow f_5$	4
3	$o_3 \rightarrow o_4$	$f_5 \rightarrow f_4$	3
4	$o_4 \rightarrow o_5$	$f_4 \rightarrow f_2$	2
5	$o_5 \rightarrow o_9$	$f_2 \rightarrow f_9$	1
6	$o_9 \rightarrow o_{10}$	$f_9 \rightarrow f_7$	3
7	$o_{10} \rightarrow o_8$	$f_7 \rightarrow f_3$	4
8	$o_8 \rightarrow o_6$	$f_3 \rightarrow f_3$	0
9	$o_6 \rightarrow o_7$	$f_3 \rightarrow f_4$	4
10	$o_7 \rightarrow o_{11}$	$f_4 \rightarrow f_9$	1
11	$o_{11} \rightarrow o_{12}$	$f_9 \rightarrow f_9$	0
12	$o_{12} \rightarrow o_{13}$	$f_9 \rightarrow f_9$	0
13	$o_{13} \rightarrow o_{14}$	$f_9 \rightarrow f_{10}$	4
14	$o_{14} \rightarrow o_{15}$	$f_{10} \rightarrow f_8$	4
15	$o_{15} \rightarrow o_{16}$	$f_8 \rightarrow f_6$	3
custo total			33

Tool indexing problem - Nova distribuição das ferramentas

slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ferramenta	f_2	f_3	f_1	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}

sequência	operações	ferramentas	custo
1	$o_1 \rightarrow o_2$	$f_1 \rightarrow f_1$	0
2	$o_2 \rightarrow o_3$	$f_1 \rightarrow f_5$	2
3	$o_3 \rightarrow o_4$	$f_5 \rightarrow f_4$	1
4	$o_4 \rightarrow o_5$	$f_4 \rightarrow f_2$	3
5	$o_5 \rightarrow o_9$	$f_2 \rightarrow f_9$	2
6	$o_9 \rightarrow o_{10}$	$f_9 \rightarrow f_7$	2
7	$o_{10} \rightarrow o_8$	$f_7 \rightarrow f_3$	5
8	$o_8 \rightarrow o_6$	$f_3 \rightarrow f_3$	0
9	$o_6 \rightarrow o_7$	$f_3 \rightarrow f_4$	2
10	$o_7 \rightarrow o_{11}$	$f_4 \rightarrow f_9$	5
11	$o_{11} \rightarrow o_{12}$	$f_9 \rightarrow f_9$	0
12	$o_{12} \rightarrow o_{13}$	$f_9 \rightarrow f_9$	0
13	$o_{13} \rightarrow o_{14}$	$f_9 \rightarrow f_{10}$	1
14	$o_{14} \rightarrow o_{15}$	$f_{10} \rightarrow f_8$	2
15	$o_{15} \rightarrow o_{16}$	$f_8 \rightarrow f_6$	2
custo total			27

Dereli, Baykasoğlu, Gindy e Filiz (1998)

- ▶ Introduziram formalmente o problema TIP e analisaram diferentes cenários:
 - ▶ considerando a duplicação de ferramentas;
 - ▶ considerando a possibilidade de um *magazine* extra;
 - ▶ não considera nem a duplicação de ferramentas nem o uso de um *magazine* adicional.

Atta, Morsy, El-Bardini e Darwish (2018)

- ▶ Utilizou o algoritmo *harmony search* para resolver o TIP;
- ▶ Considerou duplicação de ferramentas e uso de *magazine* adicional;
- ▶ O método foi considerado estado da arte à época.

Baykasoğlu, Atabay e Günay (2024)

- ▶ Utilizou o algoritmo *weighted superposition attraction* (WSA) para resolver o TIP;
- ▶ Considerado como então estado da arte, superou o (HS) em qualidade das soluções, mas com tempo de execução superior;
- ▶ Considerou duplicação de ferramentas e não considerou *magazine* adicional.

Abordando a Complexidade do TIP

Classificação

O TIP é um problema combinatório **NP-difícil**, o que inviabiliza métodos exatos para soluções boas em todas instâncias.

Abordagem proposta

Adota-se o *parallel tempering* (PT) como alternativa para equilibrar a qualidade das soluções e a viabilidade computacional em problemas combinatórios.

Contexto e Aplicações

- ▶ Surgiu na física estatística e química computacional para simulações moleculares;
- ▶ Introduzido na computação principalmente em inferência bayesiana e amostragem estatística;
- ▶ Pouco explorado para otimização combinatória.

Fundamentos probabilísticos

- ▶ **Amostragem estatística:** faz a extração de um subconjunto equilibrado de dados para estimar propriedades específicas da distribuição;
- ▶ **Monte Carlo:** gera estimativas através de simulações com dados aleatórios para problemas difíceis de resolver analiticamente;
- ▶ **Cadeia de Markov:** processo estocástico onde cada solução depende exclusivamente da solução imediatamente anterior;

Fundamentos dos métodos

- ▶ **MCMC:** combina Cadeias de Markov para gerar soluções sucessivas com critérios probabilísticos de Monte Carlo para sua aceitação;
- ▶ **Metropolis-Hastings:** algoritmo MCMC que aceita ou rejeita novas soluções com base em uma probabilidade calculada a partir da comparação entre a qualidade da solução atual e da solução candidata.

Como funciona o PT

- ▶ Utiliza múltiplas réplicas independentes que executam cadeias MCMC com Metropolis-Hastings em diferentes temperaturas;
- ▶ Cada réplica é associada a uma **temperatura**, controlando seu grau de exploração:
 - ▶ temperaturas altas favorecem aceitar soluções piores (exploração);
 - ▶ temperaturas baixas mantêm soluções boas (refinamento).

Mecanismo de troca

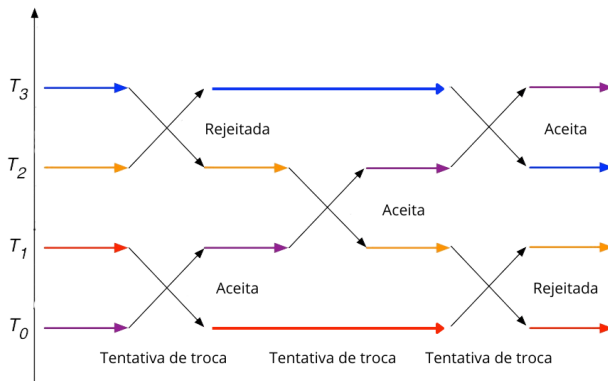
- ▶ O PT realiza tentativas de **troca de temperatura entre duas réplicas adjacentes**, com base em um critério de aceitação probabilístico:

$$P_{\text{troca}} = \min(1, \exp[(\beta_i - \beta_j)(E_i - E_j)])$$

- ▶ **Energia**: representa a qualidade de uma solução (no TIP, o tempo total de indexação);
- ▶ **Estado**: uma configuração específica da solução, (no TIP, a disposição das ferramentas na torreta).

Características da troca

- ▶ A troca de temperatura permite que uma boa solução, que antes estava em uma réplica de alta temperatura (exploratória), passe a ser refinada em uma réplica de baixa temperatura, aumentando a chance de melhorias mais precisas.



Próximas etapas

- ▶ O método será adaptado ao TIP usando uma API paralelizada, desenvolvida por Almeida (2024);
- ▶ Calibração dos parâmetros fundamentais para desempenho do método;
- ▶ Desenvolvimento de componentes específicos para integrar o PT ao TIP, incluindo codificação, função de avaliação, vizinhança e critérios operacionais;
- ▶ Execução de experimentos e comparação dos resultados obtidos com aqueles reportados na literatura, especialmente pelo então estado da arte, Baykasoglu (2024).

Síntese e Próximos Passos

- ▶ Tem-se o TIP como um problema essencial para eficiência produtiva em manufatura flexível;
- ▶ É pouco explorado na literatura e apresenta limitações nas abordagens;
- ▶ O método PT surge como alternativa para equilibrar a qualidade das soluções e eficiência computacional.



Referências



Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022).

Industry 5.0: A human-centric solution.

Sustainable Operations and Computers.



Soori, M., Ghaleh Jough, A. M., Dastres, F., & Arezoo, B. (2024).

Intelligent tool management in CNC machining using machine learning.

Journal of Manufacturing Processes.



Dereli, T., Baykasoğlu, A., Gindy, N. N. Z., & Filiz, M. (1998).

Tool selection and operation allocation in FMS using genetic algorithms.

Journal of Materials Processing Technology.



Atta, M. M., Morsy, A. H., El-Bardini, M., & Darwish, A. M. (2018).

Harmony Search Algorithm for Tool Indexing Problem.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology.



Baykasoğlu, A., Atabay, S., & Günay, M. (2024).

A Weighted Superposition Attraction Algorithm for Tool Indexing Problem.

Journal of Intelligent Manufacturing.



Almeida, A. L. B. (2024).

Revisitando o Revenimento Paralelo: Computação de Alto Desempenho e Aplicação em Pesquisa Operacional.

Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.