

# 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

1 de setembro de 2025



# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Problema de indexação de ferramentas
- 3 Trabalhos relacionados
- 4 Revenimento Paralelo
- 5 Desenvolvimento
- 6 Resultados e comparação
- 7 Conclusão
- 8 Próximos passos

## 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.

## Sistema de manufatura flexível

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

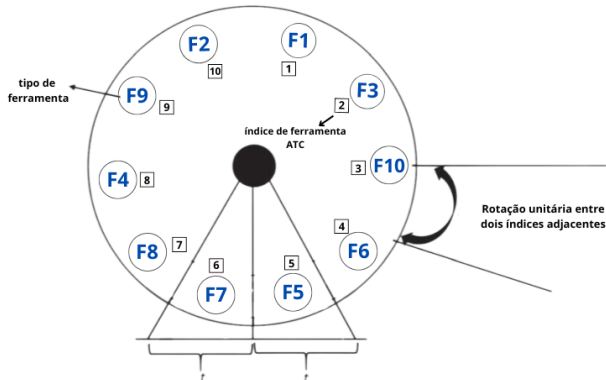
- ▶ Cada ferramenta é posicionada em um *slot*, sendo identificadas pelo **índice da ferramenta**;
- ▶ O ATC realiza **rotações unitárias** na torreta para que ocorra a troca de ferramentas, assim obtém-se o **tempo de indexação da ferramenta**;
- ▶ Ao automatizar esse processo, o ATC reduz o **tempo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

## 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.

## Classificação

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

## Baykasoğlu, Atabay e Günay (2024)

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



## Fundamentos dos métodos

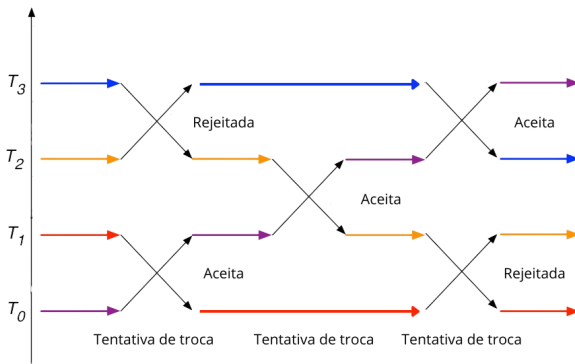
- ▶ **Amostragem estatística:** faz a extração de um subconjunto equilibrado de dados para estimar propriedades específicas da distribuição;
- ▶ **MCMC:** combina Cadeias de Markov para gerar soluções sucessivas com critérios probabilísticos de Monte Carlo para sua aceitação;
- ▶ **Metropolis-Hastings:** 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;
- ▶ Realiza tentativas periódicas de troca de temperatura entre réplicas vizinhas, aceitas por uma probabilidade que depende do contraste entre suas qualidades e do espaçamento térmico;
- ▶ **Energia**: medida de qualidade da solução; no TIP, corresponde ao custo total de indexação a ser minimizado;
- ▶ **Estado**: configuração corrente da torreta; no TIP, o arranjo das ferramentas nos *slots*.

## 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.



## Integração com a API

Todos os elementos foram concebidos para integrar-se à arquitetura da API paralela do método PT desenvolvida por Almeida (2025).

## Codificação e decodificação

- ▶ Codificação:
  - ▶ Representação vetorial unidimensional;
  - ▶ Comprimento  $n_f$  ( $n^o$  de ferramentas distintas);
  - ▶ Exemplo:  $[f_3, f_2, f_5, f_1, f_4]$  em  $C = 8$  slots.
- ▶ Decodificação:
  - ▶ Converte a codificação em posições da torreta;
  - ▶ Necessária para calcular custo e lidar com simetria rotacional;
  - ▶ Slots excedentes  $\rightarrow$  vazios;
  - ▶ Exemplo:  $f_3 \rightarrow$  posição 1,  $f_2 \rightarrow$  posição 2.

## Solução inicial aleatória

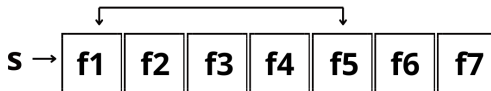
- ▶ Em todas as réplicas, as ferramentas são embaralhadas por permutação aleatória, garantindo configurações viáveis e distintas.

## Solução inicial mista

- ▶ Em duas réplicas específicas (menor temperatura e temperatura intermediária) são agrupadas lado a lado as ferramentas com maior frequência de ocorrência, formando blocos de alta interação e, nas demais réplicas é utilizado a aleatoriedade.

## Estruturas de vizinhança

- ▶ **Troca:** permuta o conteúdo de dois *slots* selecionados;
- ▶ **Inserção:** remove uma ferramenta de sua posição e a insere em outra, deslocando as intermediárias;
- ▶ **Inversão:** inverte a ordem de um segmento contínuo delimitado por duas posições;
- ▶ **Combinação estocástica:** a cada iteração escolhe aleatoriamente um dos três operadores anteriores, com igual probabilidade.



## Ajuste de Parâmetros com *irace*

- ▶ Configuração escolhida:
  - ▶ **Temperatura inicial:** 0,01;
  - ▶ **Temperatura final:** 20,0;
  - ▶ **Comprimento da cadeia de Markov:** 400 iterações por réplica;
  - ▶ **Distribuição de temperaturas:** linear inversa;
  - ▶ **Tipo de estrutura de vizinhança:** combinação estocástica;
  - ▶ **Ajuste dinâmico:** igualar taxas de aceitação entre réplicas vizinhas;
  - ▶ **Frequência de ajuste de temperatura:** a cada 1/4 do *ptl*;
  - ▶ **Solução inicial:** mista.

## Parâmetros fixos

- ▶ **PTL:** 2200 propostas de troca no total;
- ▶ **Número de threads:** núcleos físicos da máquina -1;
- ▶ **Número de réplicas:** núcleos físicos da máquina -1.

## Conjuntos $o$ e $s$

- ▶ **Perfil:**  $n_f$  pequeno e  $C$  baixo;
- ▶ **Tempo:**  $< 1,3$  s;
- ▶ **Gap:** nulo em todas as instâncias;
- ▶ **Desvio médio:** 0,0%;
- ▶ **Convergência (ciclo PTL):** média 25,94.



## Conjuntos *anhos* e *y*

- ▶ **Perfil:** instâncias de porte moderado;
- ▶ **Tempo:** entre 0,6 e 14 s;
- ▶ **Gap:** estável, no conjunto *y* houve casos com gap *negativo* (melhor que a referência);
- ▶ **Desvio médio:** máx. 0,29% (*anhos*) e 0,07% (*y*);
- ▶ **Convergência (ciclo PTL):** média 175,06.

## Conjunto *sko*

- ▶ **Perfil:** instâncias maiores;
- ▶ **Tempo:** até 24,95 s;
- ▶ **Gap:**  $\leq 0,03\%$  (com dois resultados melhores);
- ▶ **Desvio médio:** máx. 0,56%;
- ▶ **Convergência (ciclo PTL):** média 623,38.

## Comparação com literatura

- ▶ Em 92,3% das instâncias, os resultados igualaram ou superaram os considerados estado da arte;
- ▶ O tempo de execução das instâncias é considerado baixo, com máximo observado de 24,9 s;
- ▶ Considerando todas instâncias, a convergência média ocorreu no ciclo 195,3 do PTL;
- ▶ Nas instâncias menores, parcela expressiva atingiu o melhor resultado já no ciclo 0.

## Conclusão

- ▶ O trabalho formalizou o TIP, destacou sua importância prática;
- ▶ Implementou-se e avaliou-se o PT aplicado ao TIP;
- ▶ Os experimentos igualaram ou superaram os valores de referência em grande parte das instâncias;
- ▶ A robustez foi confirmada pelo baixo gap e desvio médio entre execuções;
- ▶ Os achados indicam boa relação entre desempenho computacional e qualidade de solução, configurando o método como alternativa viável e escalável frente aos existentes.

## Próximos passos

- ▶ Expandir o conjunto de instâncias avaliadas;
- ▶ Compilar o estudo no formato de artigo científico;
- ▶ Desenvolver uma versão multiobjetivo da abordagem proposta;
- ▶ Tratar cenários com mais ferramentas do que *slots* disponíveis;
- ▶ Incorporar a duplicação de ferramentas e analisar impactos em custo e robustez.



# 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.; LIMA, J. de C.; CARVALHO, M. A. M.

Revisiting the parallel tempering algorithm: High-performance computing and applications in operations research.

\*Computers & Operations Research, v. 178, p. 107000, 2025. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107000>.