

Busca Tabu Aplicada ao Sequenciamento de Tarefas com o Tempo Dependente de Sequência em Sistemas de Manufatura Flexível

Gabriel Carvalho Domingos da Conceição

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

22 de agosto de 2024



Sistema de Manufatura Flexível

Definição

Pode ser entendido como um sistema composto por uma rede de máquinas interconectadas e controladas por um sistema automatizado.



Smith, Johnson e Brown, 2018

Descrevem a necessidade de pintar veículos com diferentes cores em uma linha de produção automotiva, levando em consideração as demandas e preferências dos clientes.



Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

Versão uniforme do SSP

- ▶ Uma única máquina;
- ▶ Ferramentas de tamanho igual;
- ▶ Ferramentas ocupando apenas um compartimento no *magazine*;
- ▶ Trocas de ferramentas não ocorrem simultaneamente;
- ▶ Tempos de trocas são constantes;
- ▶ Não são considerados desgastes ou quebras das ferramentas;
- ▶ Crama (1994) provou que o SSP é um problema *NP*-difícil.

SSP com o tempo dependente de sequência

- ▶ Os tempos de trocas entre pares de ferramentas não são constantes e dependem do par específico de ferramentas a serem trocadas.

Definição do SSP com o tempo dependente de sequência

Definição

Modelling a tool switching problem on a single nc-machine. Journal of Intelligent Manufacturing (Privault e Finke, 1995).

Estado da arte

A two-stage heuristic for the sequence-dependent job sequencing and tool switching problem. Computers & Industrial Engineering, Elsevier (Rifai, Mara e Norcahyo, 2022).

Sistema de Manufatura Flexível

Exemplo de instância do problema, com $C = 5$:

	Tarefas					
	0	1	2	3	4	
[1]	0	0	0	0	1	
[2]	1	1	0	0	1	
[3]	0	0	1	0	1	
[4]	0	1	0	0	0	
[5]	1	1	0	0	0	
[6]	0	1	0	0	0	
[7]	1	0	1	0	0	
[8]	0	0	1	0	0	
[9]	1	0	0	1	0	
[10]	1	0	0	1	0	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	5	2	1	4	5	1	4	2	2
2	4	0	5	4	5	2	2	1	5	4
3	2	2	0	3	4	2	4	5	3	1
4	4	3	1	0	4	3	2	3	4	3
5	4	4	2	1	0	3	3	5	3	2
6	2	2	4	4	3	0	4	4	1	2
7	2	2	5	4	2	1	0	4	5	5
8	1	3	5	1	5	2	3	0	1	3
9	1	1	5	1	1	2	2	3	0	4
10	1	5	1	5	4	3	5	4	5	0

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

$$J = [1, 4, 2, 3, 0]$$

$$T_1 = [2, 4, 5, 6]$$

Tarefas	Magazine	Custo
1	{ 1 , 2, 4, 5, 6}	18

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

$$J = [1, 4, 2, 3, 0]$$

$$T_4 = [1, 2, 3]$$

Tarefas	Magazine	Custo
1	{1, 2, 4, 5, 6 }	18
2	{1, 2, 3 , 4, 5}	22

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

$$J = [1, 4, 2, 3, 0]$$

$$T_2 = [3, 7, 8]$$

Tarefas	<i>Magazine</i>	Custo
1	{1, 2, 4, 5, 6}	18
2	{ 1 , 2, 3, 4 , 5}	22
3	{2, 3, 5, 7 , 8 }	26

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

$$J = [1, 4, 2, 3, 0]$$

$$T_3 = [9, 10]$$

Tarefas	Magazine	Custo
1	{1, 2, 4, 5, 6}	18
2	{1, 2, 3, 4, 5}	22
3	{2, 3, 5, 7, 8}	26
4	{2, 5, 7, 9, 10}	28

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

$$J = [1, 4, 2, 3, 0]$$

$$T_0 = [2, 5, 7, 9, 10]$$

Tarefas	<i>Magazine</i>	Custo
1	{1, 2, 4, 5, 6}	18
2	{1, 2, 3, 4, 5}	22
3	{2, 3, 5, 7, 8}	26
4	{2, 5, 7, 9, 10}	28
5	{2, 5, 7, 9, 10}	28

Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (SSP)

Definição

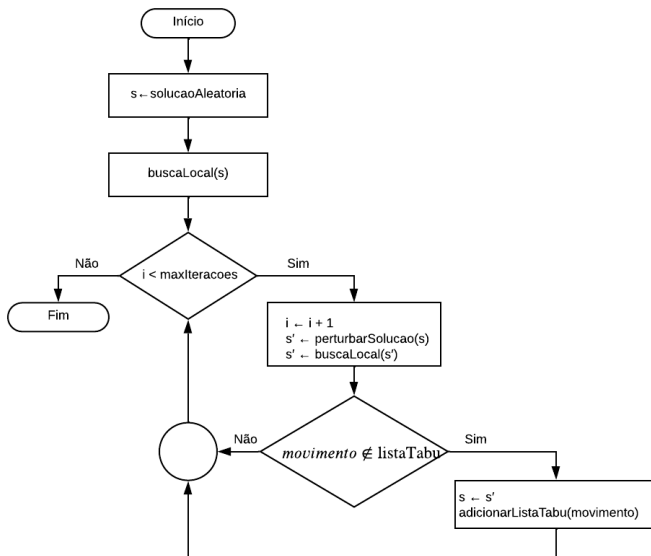
Introduzido por Tang e Denardo (1988), SSP pode ser dividido em dois subproblemas:

- ▶ Problema de sequenciamento das tarefas (SP)
 - ▶ *NP*-Difícil.
- ▶ Problema de alocação das ferramentas (TP)
 - ▶ P.

Metodologia

- ▶ Problema de sequenciamento das tarefas (SP)
 - ▶ Busca tabu.
- ▶ Problema de alocação das ferramentas (TP)
 - ▶ Problema de atribuição linear.

Busca tabu



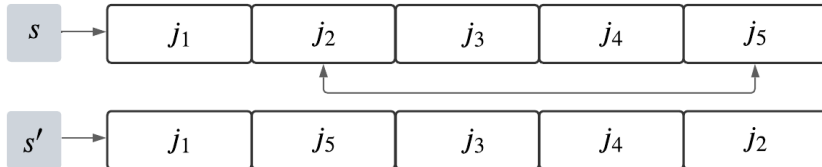
Busca tabu aplicada ao problema de sequenciamento das tarefas

Definição

- ▶ Difícil se locomover entre diferentes soluções;
- ▶ Armazenar soluções com melhoras, Woodruff and Zemel (1993);
- ▶ Heurística Construtiva;
- ▶ *Hash*: pesquisa $O(\log(n))$.

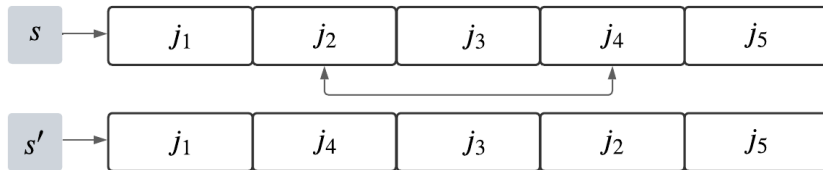
Definição

Consiste em selecionar um par de tarefas e efetuar a troca. Neste exemplo ilustrado, o par j_2 e j_5 .



Definição

Consiste em selecionar um intervalo na solução proposta e inverter a ordem dos elementos contidos nesse intervalo, conforme ilustrado, da tarefa j_2 a j_4 .



Problema de alocação das ferramentas

Definição

Neste subproblema específico, há a necessidade de realizar trocas entre ferramentas a serem retiradas e ferramentas a serem instaladas, sendo que cada troca possui um custo associado

- ▶ Problema de atribuição linear em grafos;
- ▶ Classificado como P ;
- ▶ Método exato;
- ▶ Busca local.

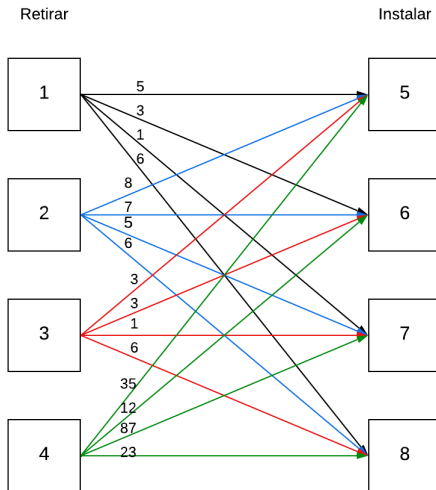
Problema de atribuição linear aplicado ao problema de trocas de ferramentas

Definição

Modelando o problema de atribuição linear em grafos bipartidos, o grafo $G = (V, A)$ é definido com V representando o conjunto de vértices, que neste caso são as ferramentas disponíveis para atribuição

- ▶ O conjunto V é então dividido em dois;
- ▶ V_i representando as ferramentas a serem retiradas;
- ▶ V_{i+1} , representando as ferramentas a serem instaladas;
- ▶ A , descrevem as possíveis trocas entre as ferramentas;
- ▶ Cada arco $(u, v) \in A$ possui capacidade de uma unidade.

Problema de atribuição linear aplicado ao problema de trocas de ferramentas



Definição

Para resolver esse problema, pode-se utilizar o algoritmo *cost-scaling push-relabel*

- ▶ $O(|V||A| \log(|V| \max_d));$
- ▶ \max_d representa o maior valor de um arco do grafo;
- ▶ *Math-heuristic*.

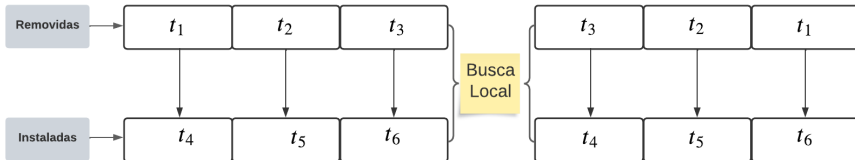
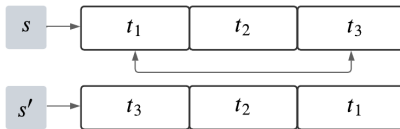
Definição

- ▶ A primeira tarefa é orientada pelo menor custo de *setup*;
- ▶ As similaridades entre as tarefas, calculadas a partir do custo aproximado das trocas de ferramentas entre elas;
- ▶ Arestas artificiais, cujos pesos correspondem aos custos de *setup* das ferramentas em questão.

Busca local

Definição

Neste exemplo ilustra um possível movimento na busca local, no qual a ordem de remoção das ferramentas é trocada.



Definição dos parâmetros.

- ▶ Busca local: *swap*;
- ▶ Perturbação: 2-opt;
- ▶ Iterações: 100;
- ▶ β : 100;
- ▶ α : 45;
- ▶ Lista Tabu: 200.

Experimentos computacionais

Ambiente computacional

- ▶ Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz;
- ▶ 16GB RAM DDR4 3200MHz;
- ▶ Ubuntu 22.04.1 LTS;
- ▶ Linguagem C++, GCC versão 11.3.0;
- ▶ Flags de otimização -O3 e *-march=native*.

Tempo e componentes de aleatoriedade

- ▶ Limite de tempo para execução de 600 segundos;
- ▶ 10 execuções por instância, devido aos componentes de aleatoriedade.

Instâncias

- ▶ 10 conjuntos com 4 instâncias.

Comparação com o estado da arte - Método exato

5 minutos

- ▶ *Gap* médio de -21,60%;
- ▶ *Gap* mínimo de -3,98%;
- ▶ *Gap* máximo de -41,69%;
- ▶ Desvio padrão médio: 0,67.

10 minutos

- ▶ *Gap* médio de -22,70%;
- ▶ *Gap* mínimo de -8,20%;
- ▶ *Gap* máximo de -42,26%;
- ▶ Desvio padrão médio: 0,05.

Comparação com o estado da arte

- ▶ *Gap* médio de -28,81%;
- ▶ *Gap* mínimo de -15,82%;
- ▶ *Gap* máximo de -44,43%;
- ▶ Desvio padrão médio: 0,01;
- ▶ Tempo médio: 6.439,10 segundos.

Comparação com o estado da arte

- ▶ *Gap* médio de -28,80%;
- ▶ *Gap* mínimo de -14,68%;
- ▶ *Gap* máximo de -41,45%;
- ▶ Desvio padrão médio: 0,02;
- ▶ Tempo médio: 43,45 segundos.

Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*

Confirma a hipótese nula de que os resultados de ALNS, BT + busca local e BT + exato podem ser modelados de acordo com uma distribuição normal.

Método paramétrico *Student's t-test*

- ▶ Há diferença significativa entre os resultados de cada método;
- ▶ Tanto o BT + exato quanto o BT + busca local demonstraram ser estatisticamente superiores ao método ALNS;
- ▶ BT + exato apresenta um desempenho melhor que BT + busca local.

Artigo completo aceito

- ▶ CONCEIÇÃO, G. C. D & CARVALHO, M. A. M. (2023). **Busca Tabu Aplicada ao Sequenciamento de Tarefas com o Tempo Dependente de Sequência em Sistemas de Manufatura Flexível.** Aceito como artigo completo no LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

