



# ALGORITMO *PARTICLE SWARM OPTMIZATION* PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DA PODUÇÃO JOB-SHOP FLEXÍVEL

CCO-727 – Otimização Inteligente de Sistemas Produtivos

Diego Luiz Cavalca

# TÓPICOS

- **Introdução**
- Definição do FJSP
- Objetivos
- Conceitos Gerais
- Trabalhos Relacionados
- Proposta
- Considerações Finais

# PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

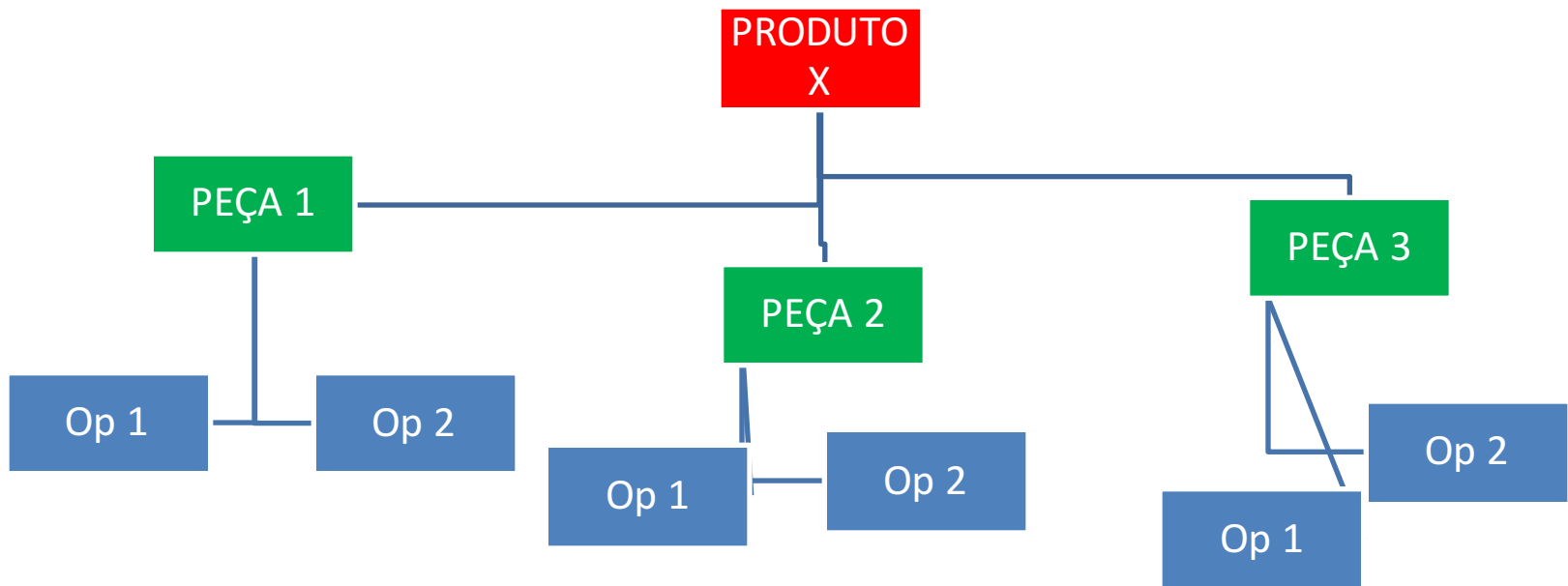
- Consiste em uma área da manufatura;
- O objetivo principal dá-se **tanto no planejamento** quanto no controle dos recursos do processo produtivo.

# PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

- **Ideia:** processar  $n$  tarefas em  $m$  recursos produtivos (máquinas) em **tempo viável**, com o intuito de obter um produto com o menor tempo e custo de programação possível, respeitando as restrições.
- **Exemplos:** Montagem de automóveis, construção de aparelhos de eletrodomésticos, indústria têxtil, construção civil, etc.

# PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

- **Desafio:** como otimizar a programação com os recursos disponíveis, diminuindo custos e maximizando o lucro produtivo?



# MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

- Antes de resolver, é preciso modelar de maneira eficiente, de acordo com o contexto estudado;
- Existem alguns modelos de programação, os quais cabe destacar: **Flow-shop Scheduling (FS)**, **Job-shop Scheduling (JS)**, **Open-shop Scheduling (OS)** e **Flexible Job-shop Scheduling (FJSP)**.

# MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

- **Flow-shop Scheduling (FS):** cenário em que existem  $m$  recursos e  $n$  *jobs*, sendo que cada *job* apresenta um **conjunto de operações (estágios de processamento) pré-ordenadas** e as sequências de execução nos recursos disponíveis são as mesmas para todos os *jobs* envolvidos;
- **Job-shop Scheduling (JS):** tal forma de produção difere do anterior pelo fato de que, nesse caso, **cada *job* apresenta uma sequência própria de execução de suas operações** nos recursos produtivos disponíveis, podendo o recurso ser ou não compartilhado por outro *job* do sistema considerado;
- **Open-shop Scheduling (OS):** este tipo de produção pode ser interpretado como um caso particular do JS, onde os *jobs* verificados não apresentam restrições internas de ordenamento de operações, ou seja, suas operações não possuem relações de precedência pré-estabelecidas.

# TÓPICOS

- Introdução
- **Definição do FJSP**
- Objetivos
- Conceitos Gerais
- Trabalhos Relacionados
- Proposta
- Considerações Finais



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

- **Generalização** que respeita as premissas do modelo base (JS), porém possui complexidades complementares;
- Imposição de se processar  $n$  *jobs* utilizando  $m$  recursos produtivos;
  - **Cada recurso** está contido em um conjunto de recursos  $M$  que processa este determinado *job*;
- Quando submetido à programação, um *job* pode optar por um recurso produtivo **dentre todos os disponíveis** em seu conjunto de opções, respeitando as condições atuais do recurso;
  - Este cenário aumenta significativamente o **número de soluções factíveis**.

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

- **Característica:** pelo menos uma operação do problema ser processada por dois ou mais recursos (flexível);
- Neste caso, dada uma Operação  $O_{ij}$ , os recursos possuem as mesmas aptidões, sendo **factíveis** para esta tarefa, porém podem variar seus tempos de processamento (ou não).

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

- **Exemplo FJSP-3x3:** deve-se construir um produto, levando em conta as seguintes variáveis:
  - 3 Jobs devem ser executados;
  - **Cada *Job(i)*** é composto de 3 operações;
  - 3 recursos produtivos (máquinas) estão disponíveis para processar as operações.

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

job	$O_{i,j}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1: FJSP-3x3 (ARANHA, 2016)

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)


job	$O_{i,j}$	$M_1$	<del><math>M_2</math></del>	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1

Roteamento Job 1:

$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$
M1	...	...

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)




job	$O_{i,j}$	$M_1$	<del><math>M_2</math></del>	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3



Tabela 1

Roteamento Job 1:

$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$
M1	M1	...



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)





job	$O_{i,j}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1

Roteamento Job 1:

$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$
M1	M1	M3



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

job	$O_{i,j}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1

Roteamento Job 2:

$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$
M2	...	...



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)



job	$O_{i,j}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1

Roteamento Job 2:

$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$
M2	M1	...

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)





job	$O_{i,j}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{1,1}$	2	0	3
	$O_{1,2}$	6	0	9
	$O_{1,3}$	8	7	7
2	$O_{2,1}$	3	2	6
	$O_{2,2}$	2	2	3
	$O_{2,3}$	5	2	4
3	$O_{3,1}$	2	0	1
	$O_{3,2}$	4	6	5
	$O_{3,3}$	0	1	3

Tabela 1

Roteamento Job 2:

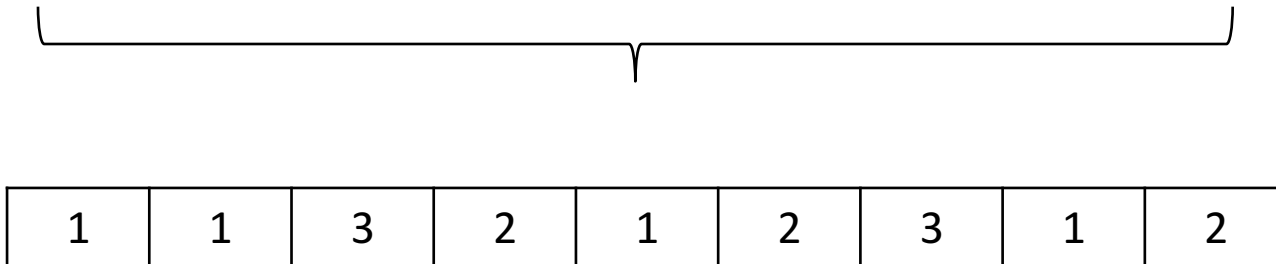
$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$
M2	M1	M2



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

... E assim para o **Job 3**, resultando em:

JOB 1			JOB 2			JOB 3		
$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$	$O_{3,3}$
1	1	3	2	1	2	3	1	2



Roteamento das operações

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

	JOB 1			JOB 2			JOB 3		
	$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$	$O_{3,3}$
	1	1	3	2	1	2	3	1	2
Índice ( $O_{ij}$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor (M)	1	1	3	2	1	2	3	1	2

Roteamento das operações

- Este **roteamento** determina os caminhos que as operações percorrerão através dos recursos:
  - Índices das colunas representam **cada operação**  $O_{i,j}$ ;
  - Valores representam **o recurso** que irá processar a operação  $O_{ij}$ .

# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

JOB 1			JOB 2			JOB 3		
$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$	$O_{3,3}$
1	1	3	2	1	2	3	1	2

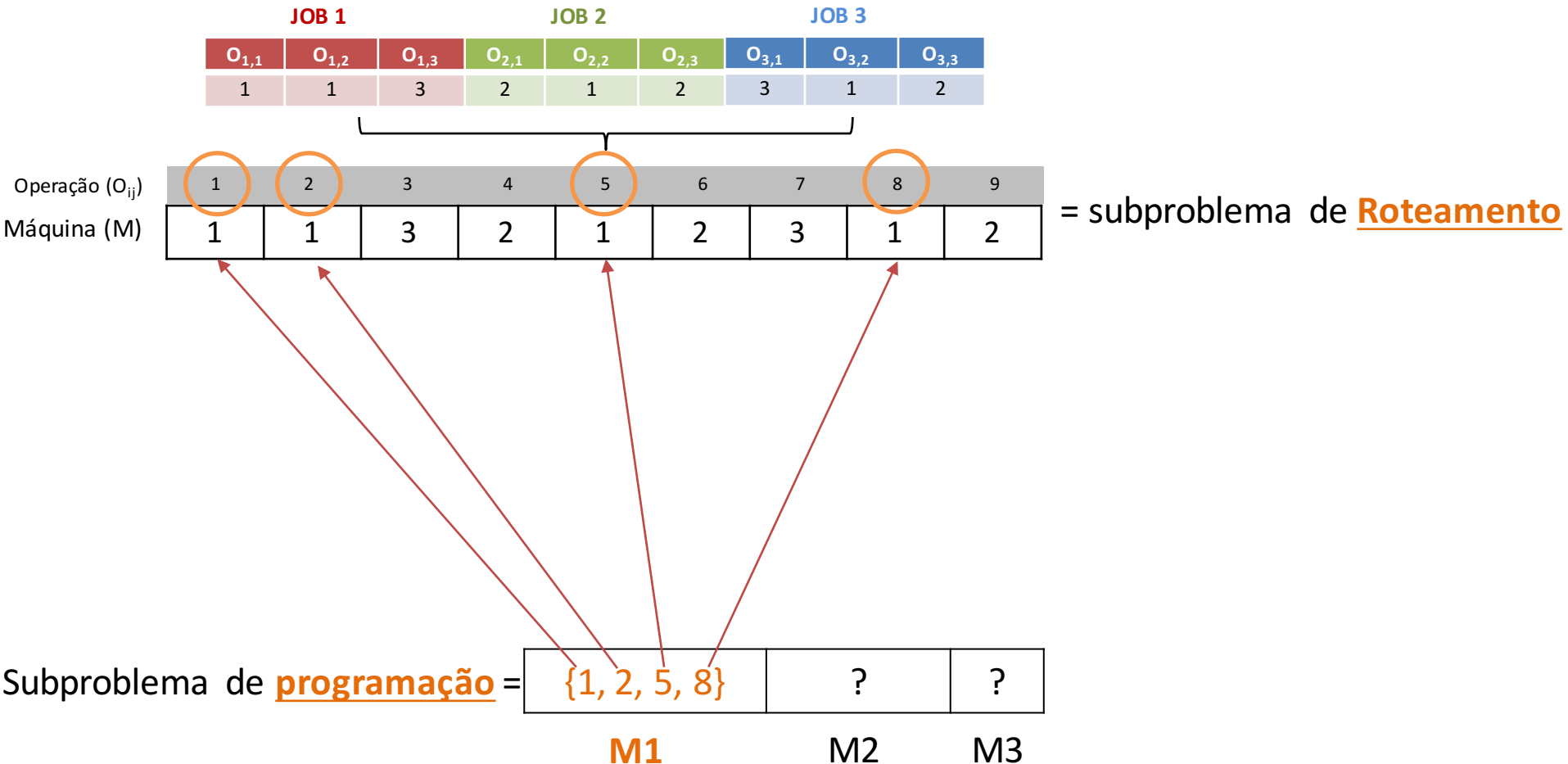


Operação ( $O_{ij}$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	= subproblema de <u>Roteamento</u>
Máquina (M)	1	1	3	2	1	2	3	1	2	

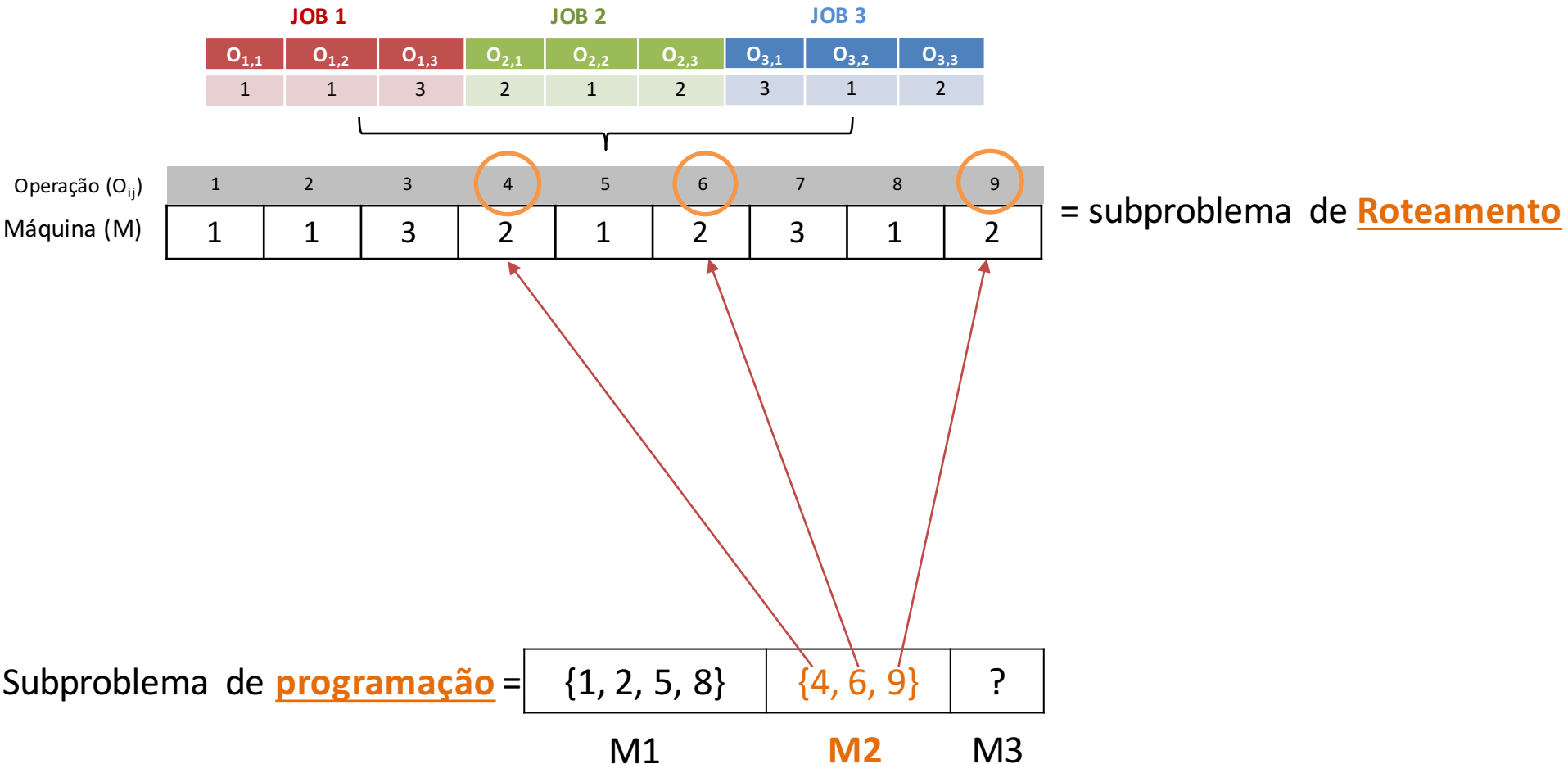
Subproblema de <u>programação</u> =	M1	M2	M3
	?	?	?

A partir do Roteamento, podemos extrair a programação!

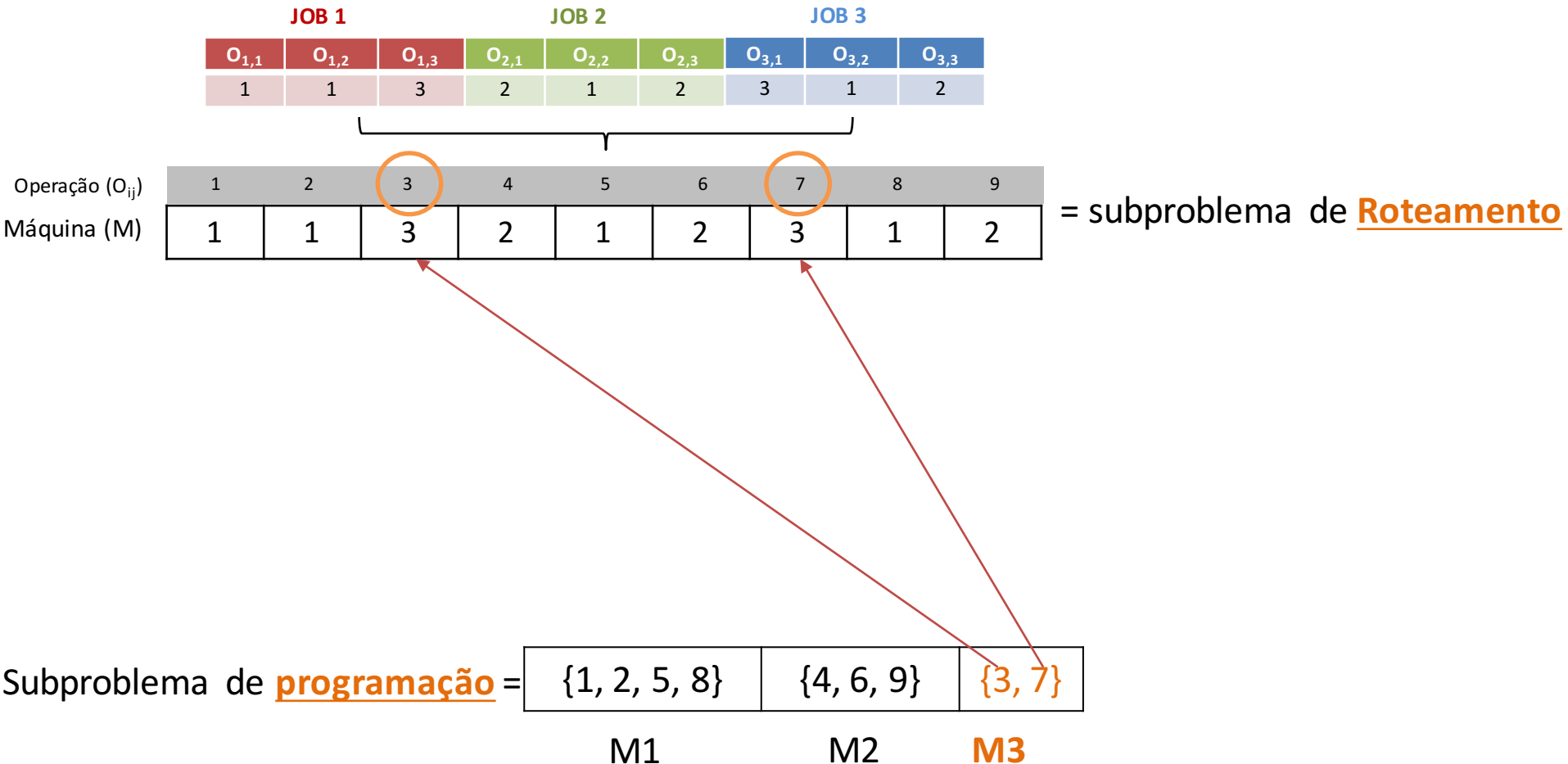
# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)



# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)





# FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (FJSP)

Subproblema de Roteamento

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

= É o MELHOR Roteamento?

Subproblema de programação

{1, 2, 5, 8}	{4, 6, 9}	{3, 7}
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>

= Dado o Roteamento, é a MELHOR ordem de programação?

Otimização através de representação hierárquica!

# TÓPICOS

- Introdução
- Problema
- **Objetivo da Pesquisa**
- Conceitos Gerais
- Trabalhos Relacionados
- Proposta
- Considerações Finais

# OBJETIVOS DA PESQUISA

- Resolução do *FJSP* através da aplicação do algoritmo ***Enxame de Partículas (PSO)*** combinado com a utilização do mecanismo de busca local ***Arrefecimento Simulado (do inglês Simulated Annealing - SA)***;
- Critério de minimização do problema: **tempo de completude do roteiro de programação (*maskepan*)**.

# TÓPICOS

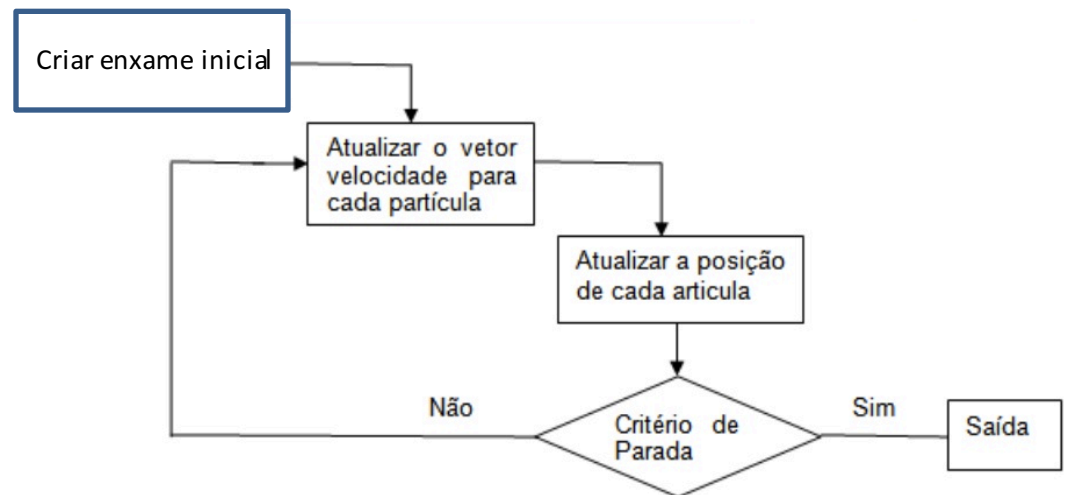
- Introdução
- Problema
- Objetivos
- **Conceitos Gerais**
- Trabalhos Relacionados
- Proposta
- Considerações Finais

# ENXAME DE PARTÍCULAS

- Otimiza um problema **iterativamente** ao tentar melhorar a solução candidata com respeito a uma dada medida de qualidade;
- Utiliza o conceito de **inteligência de enxame** para resolver um problema de maneira heurística;
- Mimetiza o comportamento e mecanismos de sobrevivência de animais (aves, peixes, lobos, etc.)

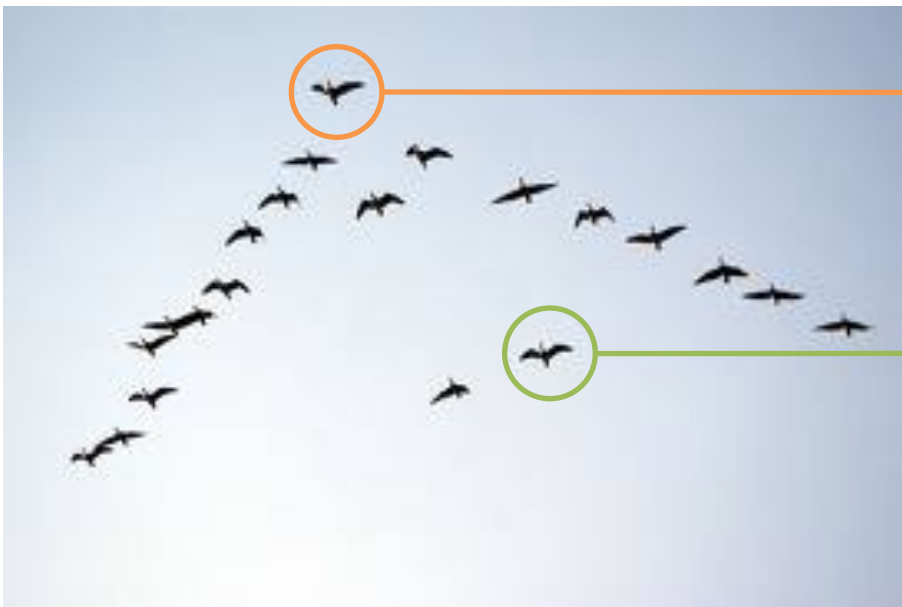
# ENXAME DE PARTÍCULAS

- **Particle Swarm Optimization (PSO)**: algoritmo baseado em um modelo simplificado da teoria de enxames (Swarm Theory);
- Considera um **grupo de agentes** (enxame ou nuvem) em deslocamento pelo espaço de busca, considerando que nesse 'voo' cada partícula é independente (Goldbarg et. al, 2016).
- Regido por experiência pessoal ( $Pbest$ ), experiência global ( $Gbest$ ) e o movimento individual atual para decidir as posições seguintes no espaço de busca.



# ENXAME DE PARTÍCULAS

- O movimento das partículas (nuvem) é regido por 2 funções:
  - (1a) Velocidade:  $V_{t+1} = w * V_t + c1 * r1 * (pBest - P_t) + c2 * r2 * (gBest - P_t)$
  - (1b) Posição:  $P_{t+1} = P_t + V_{t+1}$



Ótimo **global** = *gBest*

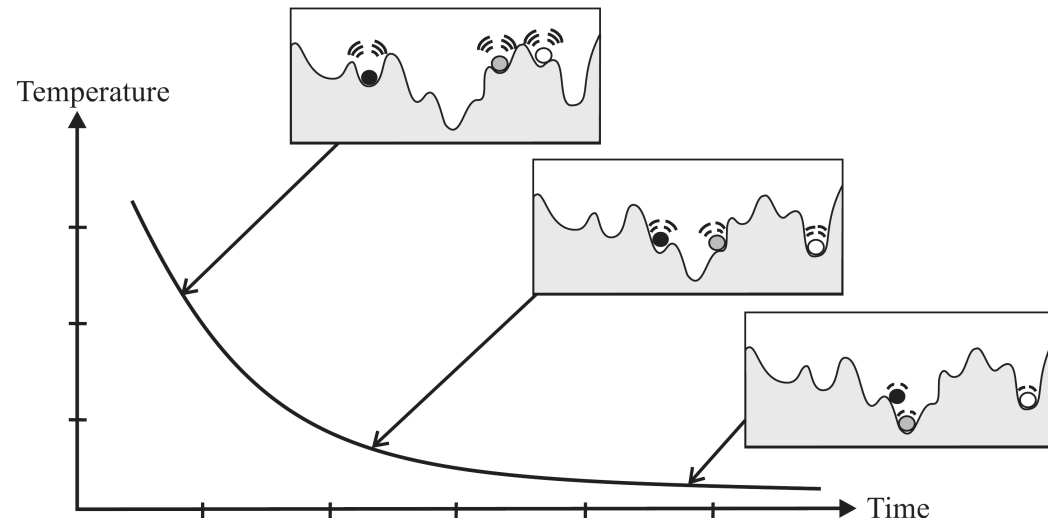
Ótimo **local** = *pBest*

# SIMULATED ANNEALING (SA)

- Meta-heurística para **otimização** que consiste numa técnica de busca local;
- Inspirada no processo de **arrefecimento industrial** (aquecimento e controle de resfriamento) a fim de melhorar uma solução inicial;

checar a variação de cada iteração:  
 $\Delta = f(S') - f(S)$

Em caso de piora:  
Se  $\Delta < 0$  então  $S = S'$   
Senão  $\exp(-\Delta/T)$





# TÓPICOS

- Introdução
- Problema
- Objetivos
- Conceitos Gerais
- **Trabalhos Relacionados**
- Proposta
- Considerações Finais

# TRABALHOS RELACIONADOS

- A pesquisa foi apoiada nos trabalhos de:

## **XIA; WU; (2005)**

Algoritmo PSO híbrido multiobjetivo que utiliza a abordagem hierárquica para a resolução do FJSP, apoiado no algoritmo de busca local Arrefecimento Simulado (SA) para a resolução do subproblema de programação.

## **ARANHA; G. (2016)**

Enxame de Partículas híbrido de caráter multiobjetivo que também utiliza a abordagem hierárquica para a resolução do FJSP. A fim de resolver o subproblema de programação utiliza os algoritmos de busca local Reinício Aleatório de Subida de Colina (RRHC), Arrefecimento Simulado (SA) e Busca Tabu (TS).

# TRABALHOS RELACIONADOS

- Diferenças entre trabalhos, considerando apenas SA:

ITEM	XIA, W.; WU, Z. (2005)	ARANHA, G. (2016)
Codificação estocástica	NÃO	SIM
Função de vizinhança (SA)	‘Swap’ de operações, por máquina	Caminho crítico
Controle antiestagnação	Não possui	Valida as soluções a cada iteração do PSO (amplia o espaço de busca)
Máquinas factíveis (problema flexível, 8x8)	Insere valores 9999 (‘infinito’) na matriz de tempos, inutilizando assim a máquina para operação não factível	Endereça a operação o maior nível possível na composição da solução

# RESULTADOS

NxM (dataset)	ARANHA, G. (2016)			XIA, W.; WU, Z. (2005)
	RRHC	SA	TS	
8x8	14	14	14	15
10x10	7	7	7	7
15x10	11	11	11	12

# TÓPICOS

- Introdução
- Problema
- Objetivos
- Conceitos Gerais
- Trabalhos Relacionados
- **Proposta**
- Considerações Finais

# PROPOSTA

- Desenvolver um algoritmo híbrido, utilizando:
  - Modelagem apoiada na **abordagem hierárquica** do FJSP;
    - Algoritmo **PSO** para o roteamento;
    - **SA** para a programação;

# PROPOSTA

- **Algoritmo PSO**: otimizar subproblema de **roteamento**;
  1. Inicializar **parâmetros** do PSO e SA;
  2. Gerar **nuvem de partículas** inicial estocásticamente;
  3. **Avaliar** cada partícula através do SA;
    - i. Definir ***pBest*** e ***gBest***;
  4. Enquanto n<sup>o</sup> máximo de iterações PSO não for atingido faça:
    - i. Guarda a nuvem no **registro de soluções anteriores**;
    - ii. Atualiza a nuvem de com base nas equações 1a e 1b;
    - iii. Valida as partículas geradas através do **controle de estagnação**;
    - iv. **Avaliar nuvem**:
      - Verifica a aptidão individual através do SA;
      - Define o novo ***pBest<sub>i</sub>*** e ***gBest*** por comparação aos valores conhecidos;
  5. Retorna a programação otimizada (Gantt).

# PROPOSTA

- Representação da partícula (roteamento):
  - Foi utilizado o conceito de de **partícula baseada em nível** (XIA; WU, 2005).

	JOB 1			JOB 2			JOB 3		
	$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$	$O_{3,3}$
	1	1	3	2	1	2	3	1	2
Índice ( $O_{ij}$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor (M)	1	1	3	2	1	2	3	1	2

Roteamento: partícula baseada em operações



# PROPOSTA

- Representação da partícula (roteamento):
  - Para **cada operação**, organiza-se os recursos em níveis de acordo com seus tempos relativos;

		Machine				Priority order				
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	1	2	3	⋮	4
$J1$	$O_{1,1}$	2	3	4	1	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$
	$O_{1,2}$	3	1	8	2	$M_2$	$M_4$	$M_1$		$M_3$
$J2$	$O_{2,1}$	1	4	1	2	$M_1$	$M_3$	$M_4$		$M_2$
	$O_{2,2}$	5	3	2	9	$M_3$	$M_2$	$M_1$		$M_4$
	$O_{2,3}$	3	1	1	4	$M_2$	$M_3$	$M_1$		$M_4$
$J3$	$O_{3,1}$	7	6	3	5	$M_3$	$M_4$	$M_2$		$M_1$
	$O_{3,2}$	4	5	6	2	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$



# PROPOSTA

- Representação da partícula (roteamento):

		Machine				Priority order				
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	1	2	3	⋮	4
$J1$	$O_{1,1}$	2	3	4	1	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$
	$O_{1,2}$	3	1	8	2	$M_2$	$M_4$	$M_1$		$M_3$
$J2$	$O_{2,1}$	1	4	1	2	$M_1$	$M_3$	$M_4$		$M_2$
	$O_{2,2}$	5	3	2	9	$M_3$	$M_2$	$M_1$		$M_4$
	$O_{2,3}$	3	1	1	4	$M_2$	$M_3$	$M_1$		$M_4$
$J3$	$O_{3,1}$	7	6	3	5	$M_3$	$M_4$	$M_2$		$M_1$
	$O_{3,2}$	4	5	6	2	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$

Job1		Job2			Job3	
$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$
2	1	3	2	2	4	4
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
$M_1$	$M_2$	$M_4$	$M_2$	$M_3$	$M_1$	$M_3$

Partícula baseada em níveis

Partícula baseada em operações

# PROPOSTA

- Geração estocástica de partícula:
  - Com a representação do **roteamento em níveis**, é possível gerar partículas de modo estocástico.

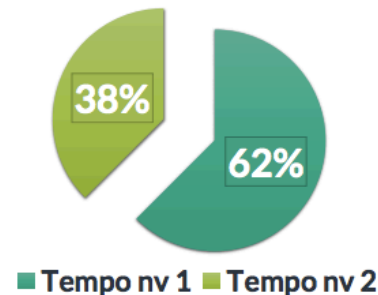
		Machine				Priority order				
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	1	2	3	⋮	4
$J1$	$O_{1,1}$	2	3	4	1	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$
	$O_{1,2}$	3	1	8	2	$M_2$	$M_4$	$M_1$		$M_3$
$J2$	$O_{2,1}$	1	4	1	2	$M_1$	$M_3$	$M_4$		
	$O_{2,2}$	5	3	2	9	$M_3$	$M_2$	$M_1$		
	$O_{2,3}$	3	1	1	4	$M_2$	$M_3$	$M_1$		
	$O_{2,4}$									
$J3$	$O_{3,1}$	7	6	3	5	$M_3$	$M_4$	$M_2$		$M_1$
	$O_{3,2}$	4	5	6	2	$M_4$	$M_1$	$M_2$		$M_3$

# PROPOSTA

- Geração estocástica de partícula:
  - Otimiza a nuvem em direção a solução ótima;

Tempo nível 1 = 3s       $1/3 = 0,333...$

Tempo nível 2 = 5s       $1/5 = 0,2$



Exemplo de roleta para inicialização da população do algoritmo PSO e troca de recurso

# PROPOSTA

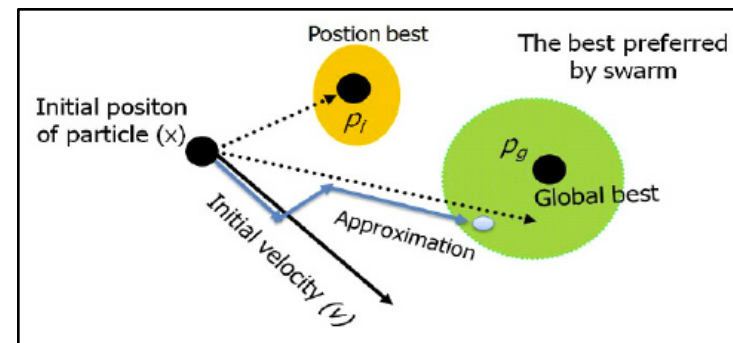
- Fator de inércia W:

- Dada a equação 1ª ( $V_{t+1}$ ), desempenha papel **importante na otimização** do PSO (XIA; WU, 2005);
  - Valores **altos**: permite explorar o espaço de busca amplamente;
  - Valores **baixos**: permite explorar espaço de maneira refinada, guiando-se pelos melhores locais ( $pBest$ ) e global ( $gBest$ );

## Equação W:

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{Iter_{max}} * Iter,$$

- $W_{max}$ : Valor máximo do fator de inércia;
- $W_{min}$ : Valor mínimo;
- $Iter_{max}$ : Número máximo de iterações do PSO;
- $Iter$ : Iteração corrente do algoritmo PSO.



*Intuição sobre o papel dos termos da equação 1a*

# PROPOSTA

- Controle antiestagnação:
- Através da equação 1a, a exploração de busca do PSO é fortemente influenciado pelos melhores valor local (pBest) e global (gBest);
  - Pode ocorrer de ambos possuírem valores similares, o movimento das partículas pode ser fortemente induzida pelo melhor local corrente.
  - Algoritmo fica viesado no mínimo local, gerando, na maioria das vezes, a mesma solução.
- Conforme ARANHA (2016), é possível implementar um controle antiestagnação;

## Controle antiestagnação simples:

- Criar um **registro de soluções**  $R$ ;
- A cada iteração do PSO, após **atualizar a nuvem de partículas**, faça
  - Se  $S_i$  **está contida em**  $R$ :
    - Enquanto  $S_i$  **ainda pertencer ao registro**  $R$  faça
      - Escolhe uma operação  $O_i$  pertencente a  $S_i$  **aleatoriamente**
      - Realiza a **troca do nível** em  $O_i$
    - Retorna **nova solução**  $S_i$ ;

# PROPOSTA

- Algoritmo SA: otimizar subproblema de **programação**;

```
procedimento  $SA(f(.), N(.), \alpha, SAmax, T_0, s)$   
1  $s^* \leftarrow s$ ; {Melhor solução obtida até então}  
2  $IterT \leftarrow 0$ ; {Número de iterações na temperatura T}  
3  $T \leftarrow T_0$ ; {Temperatura corrente}  
4 enquanto ( $T > 0$ ) faça  
5   enquanto ( $IterT < SAmax$ ) faça  
6      $IterT \leftarrow IterT + 1$ ;  
7     Gere um vizinho qualquer  $s' \in N(s)$ ;  
8      $\Delta = f(s') - f(s)$ ;  
9     se ( $\Delta < 0$ )  
10      então  
11         $s \leftarrow s'$ ;  
12        se ( $f(s') < f(s^*)$ ) então  $s^* \leftarrow s'$ ;  
13      senão  
14        Tome  $x \in [0, 1]$ ;  
15        se ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) então  $s \leftarrow s'$ ;  
16      fim-se;  
17    fim-enquanto;  
18     $T \leftarrow \alpha \times T$ ;  
19     $IterT \leftarrow 0$ ;  
20 fim-enquanto;  
21  $s \leftarrow s^*$ ;  
22 Retorne  $s$ ;  
fim  $SA$ ;
```

Subproblema de **programação**

{1, 2, 5, 8}	{4, 6, 9}	{3, 7}
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>

# PROPOSTA

- Função de vizinhança:
  - Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$

Subproblema de **programação**

{1, 2, 5, 8}	{4, 6, 9}	{3, 7}
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>



# PROPOSTA


- Função de vizinhança:
  - Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$

Subproblema de programação

{1, 2, 5, 8}	{4, 6, 9}	{3, 7}
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>

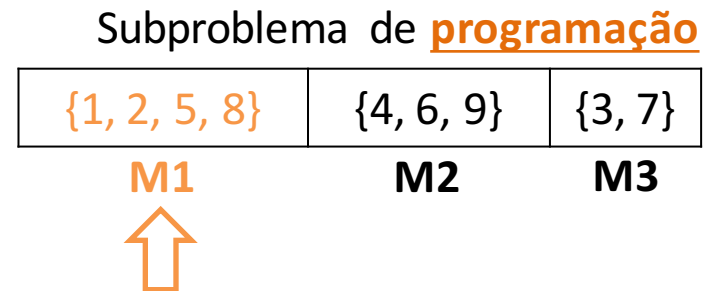


# PROPOSTA

- Função de vizinhança:
  - Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$



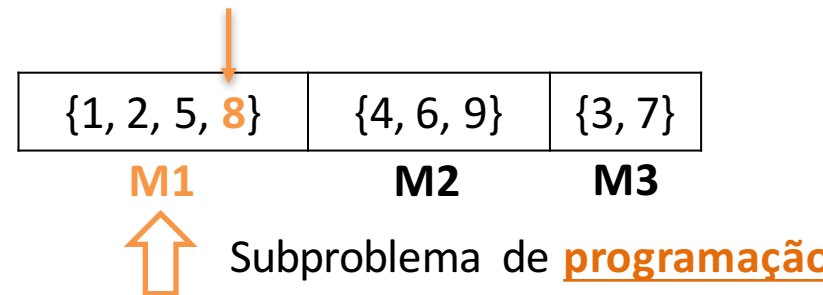
# PROPOSTA

- Função de vizinhança:

- Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$



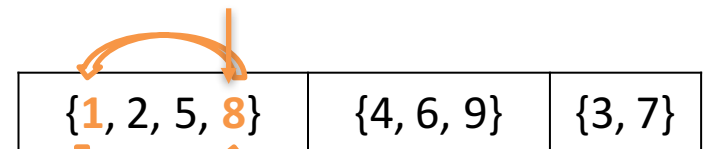
# PROPOSTA

- Função de vizinhança:

- Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto ***operações*** $(M_i) < 2$ 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- **Caso  $O_i$  seja a última operação de  $M_i$** 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$



M1

M2

M3



Subproblema de programação

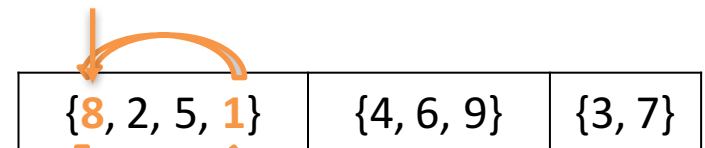
# PROPOSTA

- Função de vizinhança:

- Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- Retorna o **vetor de programação**  $M^*$



# PROPOSTA

- Função de vizinhança:
  - Papel fundamental na exploração eficiente do espaço de busca;

## Troca de 1-par por máquina aleatória:

- Recebe o **vetor de programação**  $M$
- Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Enquanto  **$operações(M_i) < 2$** 
  - Escolhe uma **máquina aleatória**  $M_i$
- Em  $M_i$ , escolhe uma **operação aleatória**  $O_i$
- Caso  $O_i$  seja a **última operação** de  $M_i$ 
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_1$
- Senão
  - $O_i$  **troca de valor** com  $O_{i+1}$
- **Retorna o vetor de programação**  $M^*$

Subproblema de **programação**

{8, 2, 5, 1}	{4, 6, 9}	{3, 7}
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>

# PROPOSTA

- Resultados:
  - Testes executados\*: 10
  - Base: KACEM

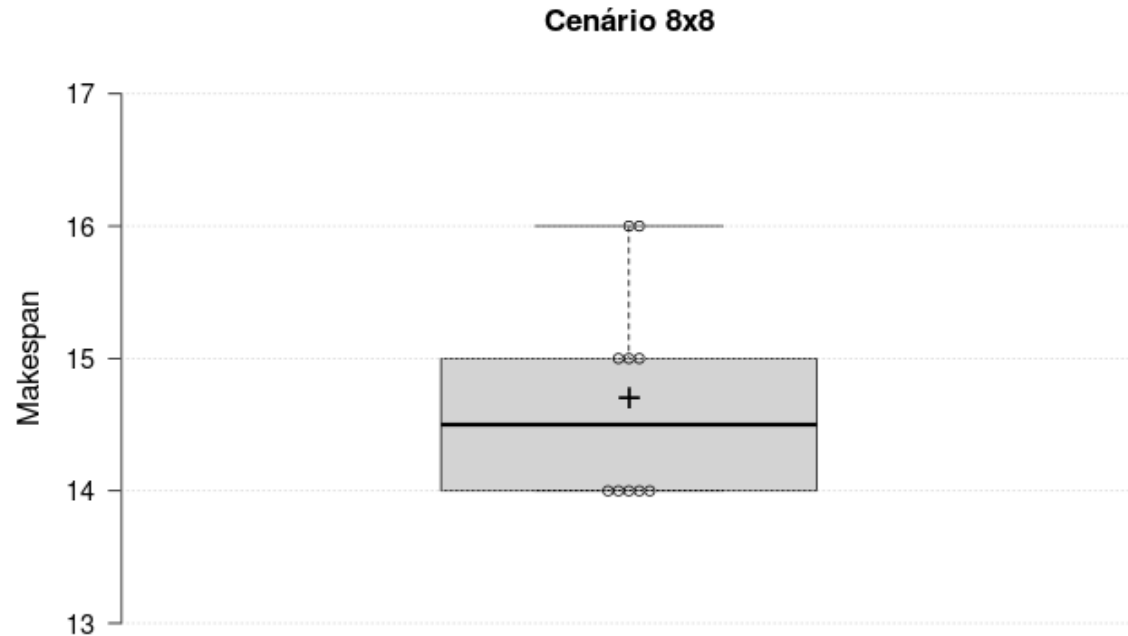
NxM (dataset)	ARANHA, G. (2016)			XIA, W.; WU, Z. (2005)	Diego Cavalca
	RRHC	SA	TS		
8x8	14	14	14	15	<b>14</b>
10x10	7	7	7	7	<b>8</b>
15x10	11	11	11	12	<b>14</b>

\* A base 15x10 não permitiu executar 10 testes a tempo da apresentação.

# PROPOSTA

- Resultado 8x8:
  - Melhor makespan: **14**
  - Atingiu o benchmark: **SIM**
  - Margem de aceite\*: **SIM**

PARÂMETRO	VALOR
(PSO) Iterações PSO	30
(PSO) Tam. da nuvem	50
(PSO) Fator inércia (w)	0.4~1.2
(PSO) C1 = C2	2
Recursos descartados	4
(SA) Temp. Inicial	3
(SA) Temp. Final	0.01
(SA) Fator de resfr.	0.9
(SA) Iter. por temp.	20

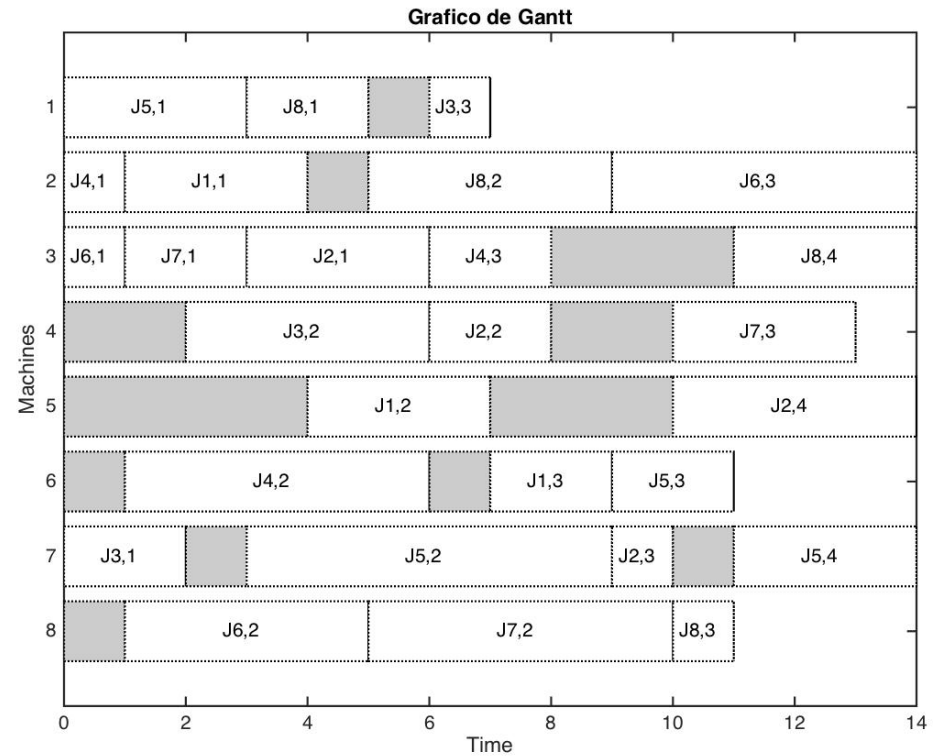
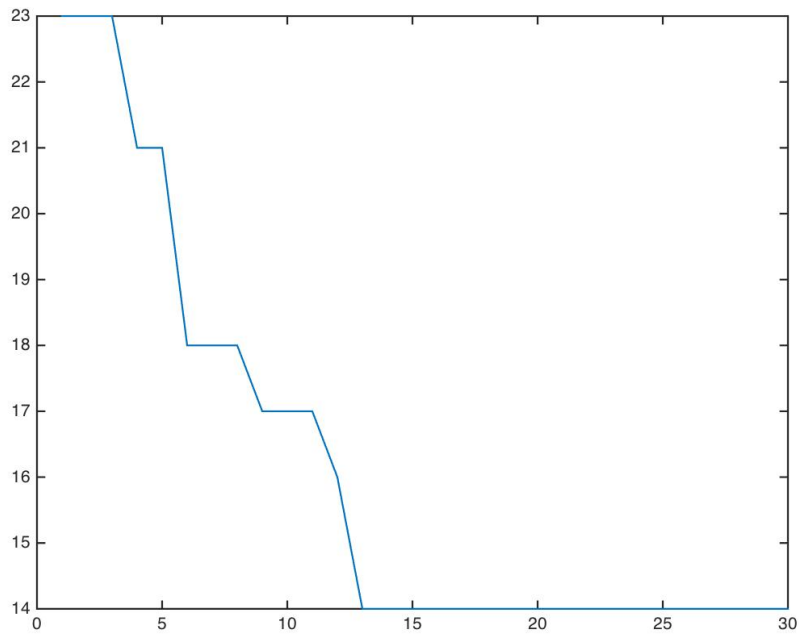


\* Valor obtido no máximo 10% acima do benchmark conhecido



# PROPOSTA

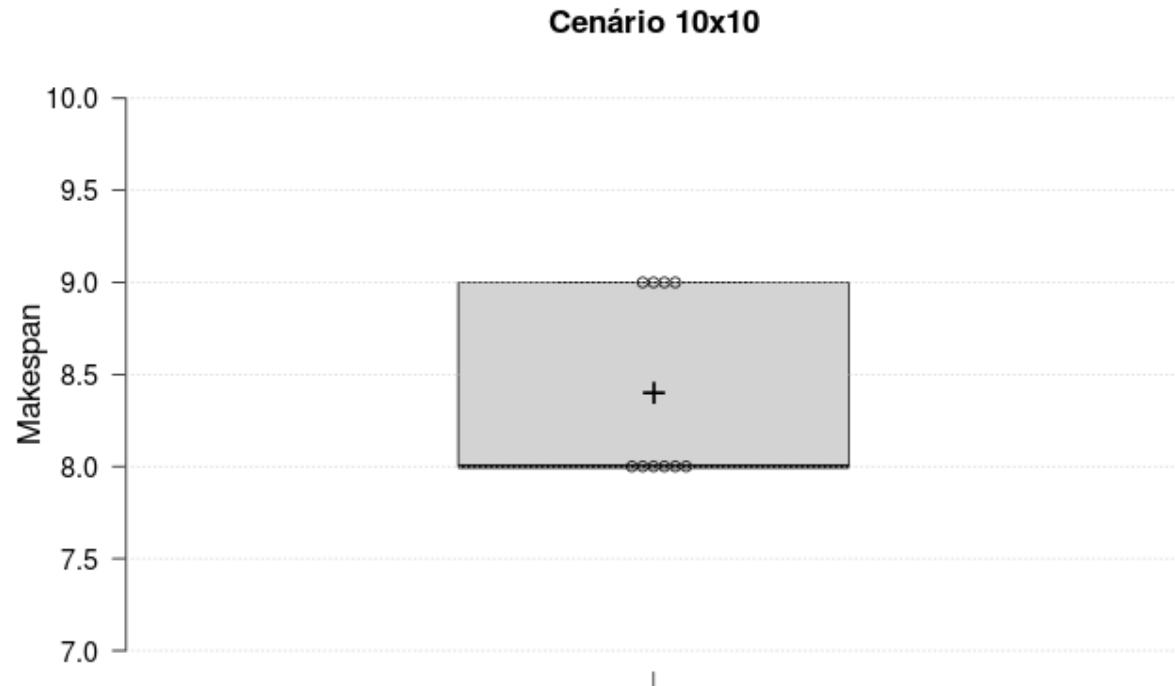
- Resultado 8x8:**



# PROPOSTA

- Resultado 10x10:
  - Melhor makespan: **8**
  - Atingiu o benchmark: **NÃO**
  - Margem de aceite\*: **SIM**

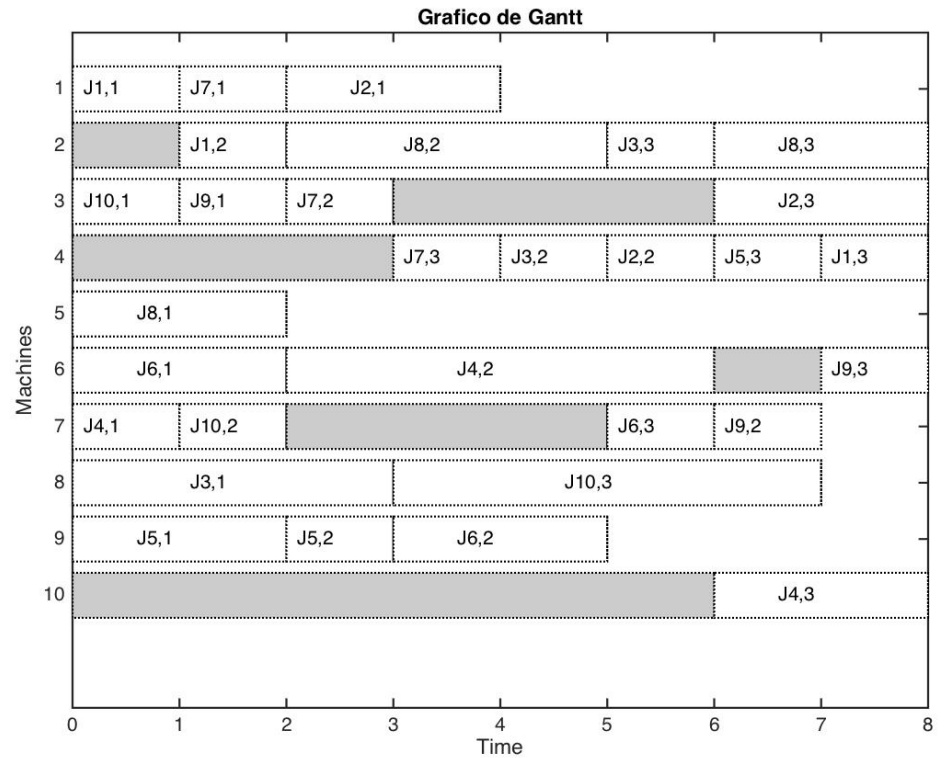
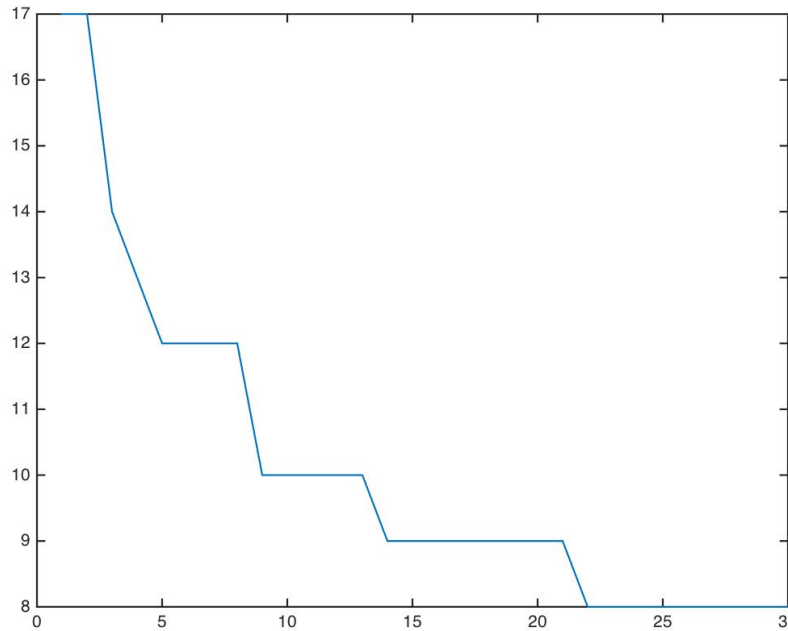
PARÂMETRO	VALOR
(PSO) Iterações	30
(PSO) Tam. da nuvem	50
(PSO) Fator inércia (w)	0.4~1.2
(PSO) C1 = C2	2
Recursos descartados	4
(SA) Temp. Inicial	5
(SA) Temp. Final	0.01
(SA) Fator de resfr.	0.9
(SA) Iter. por temp.	20



\* Valor obtido no máximo 10% acima do benchmark conhecido


# PROPOSTA

- Resultado 10x10:



# PROPOSTA

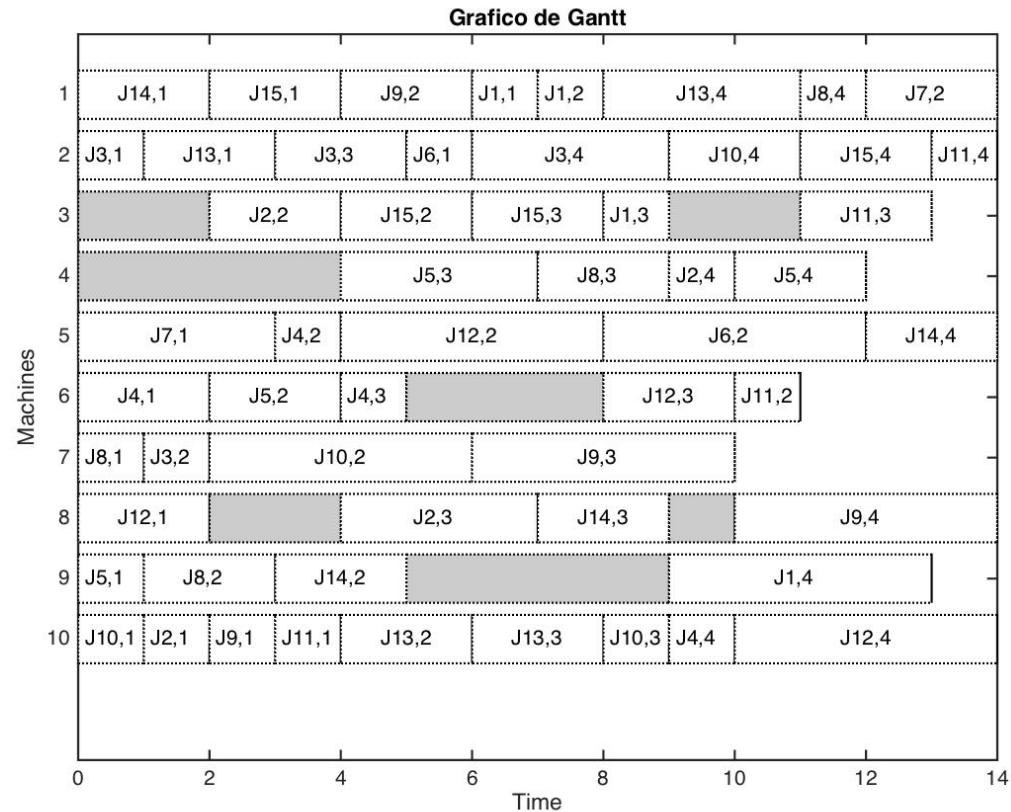
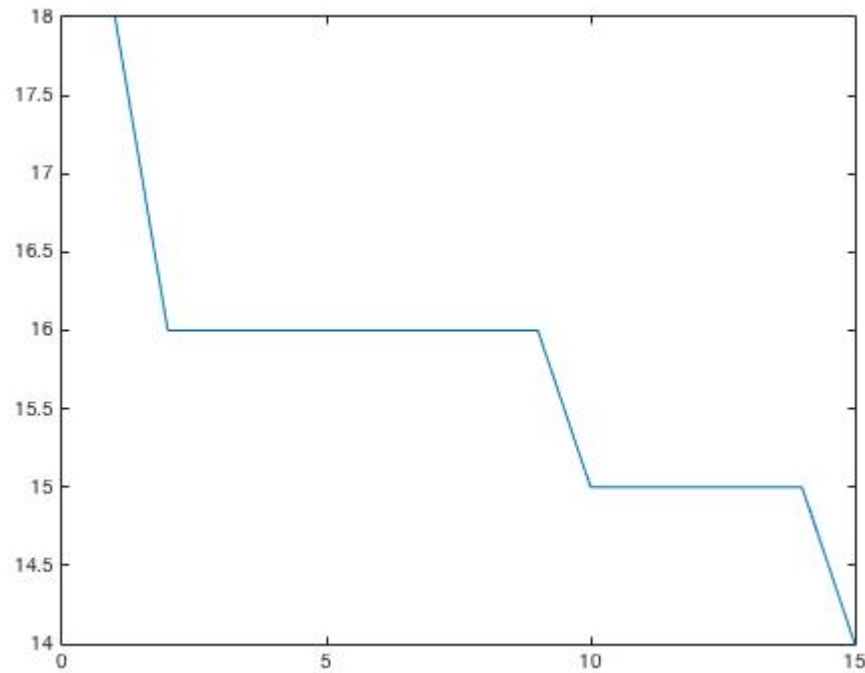
- Resultado 15x10:
  - Melhor makespan: **14**
  - Atingiu o benchmark: **NÃO**
  - Margem de aceite\*: **NÃO**
    - ~16% Xia; Wu (2005)
    - ~27% Aranha (2016)

PARÂMETRO	VALOR
(PSO) Iterações	15 
(PSO) Tam. da nuvem	100
(PSO) Fator inércia (w)	0.4~1.2
(PSO) C1 = C2	2
Recursos descartados	4
(SA) Temp. Inicial	10
(SA) Temp. Final	0.01
(SA) Fator de resfr.	0.95
(SA) Iter. por temp.	20

\* Valor obtido no máximo 10% acima do benchmark conhecido

# PROPOSTA

- Resultado 15x10:



# TÓPICOS

- Introdução
- Problema
- Objetivos
- Conceitos Gerais
- Trabalhos Relacionados
- Proposta
- **Considerações Finais**

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

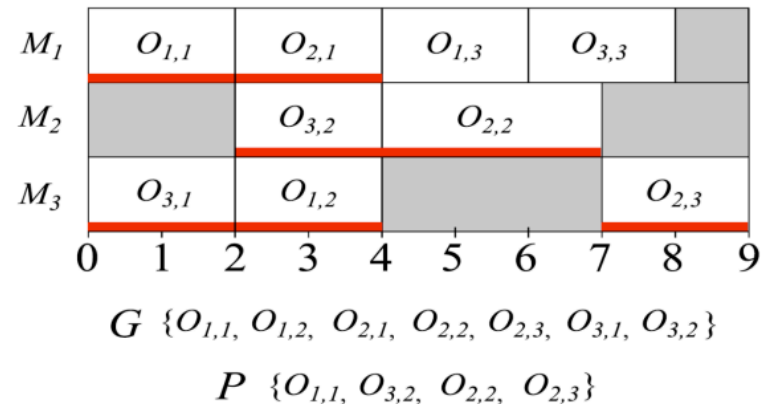
- **Algoritmo PSO proposto:**
  - Teve desempenho aceitável no que tange a função objetivo (*makespan*) para as 3 bases consideradas;
    - Atingiu benchmark na base 8x8;
    - Ficou dentro da margem de aceite estabelecida para o *dataset* 10x10 e próximo desta métrica no 15x10;
  - Computacionalmente custoso;
    - Código não otimizado (paralelismo);
    - Busca local e **função de vizinhança** tem um papel fundamental neste quesito;

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Trabalhos futuros:

- Função de **Vizinhança**;

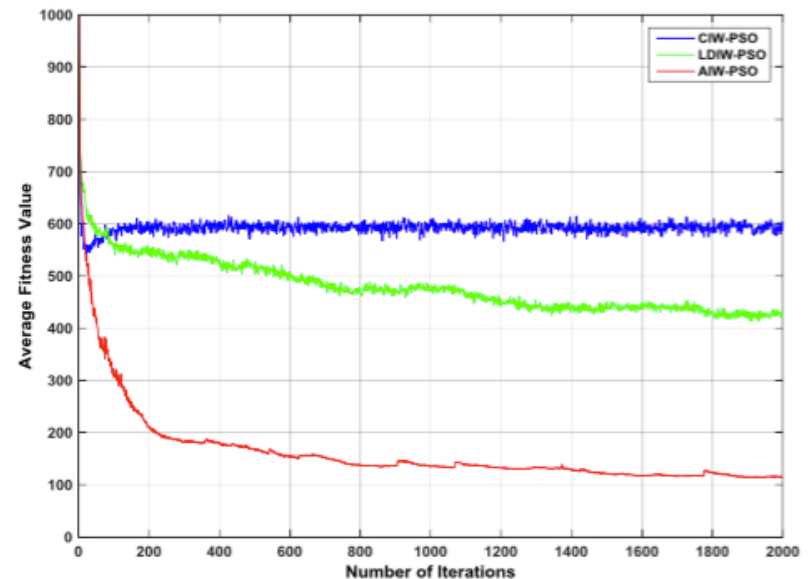
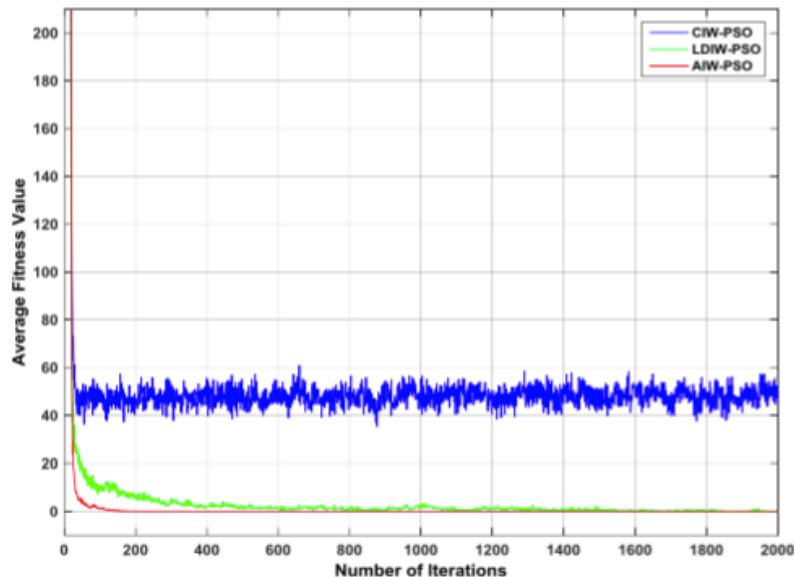
- Swap de **1-par de operações** por máquina aleatória se mostra computacionalmente pouco eficiente;
  - Exige em média **800~1.000 iterações** do SA para um resultado aceitável (melhoria da solução original);
- Alternativa:
  - Vizinhança baseada em **caminho crítico** (Mastrolilli e Gambardella, 2000);





# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Trabalhos futuros:
  - Fator de Inércia Adaptativo Individual (AIW-PSO);
    - Peso de Inércia Baseado nos **Melhores, Piores e Aptidão Individual** da Nuvem de Partículas.
    - Otimiza a **convergência** do PSO;
    - Proposto para **problemas contínuos** (SPAVIERI et. al, 2015);

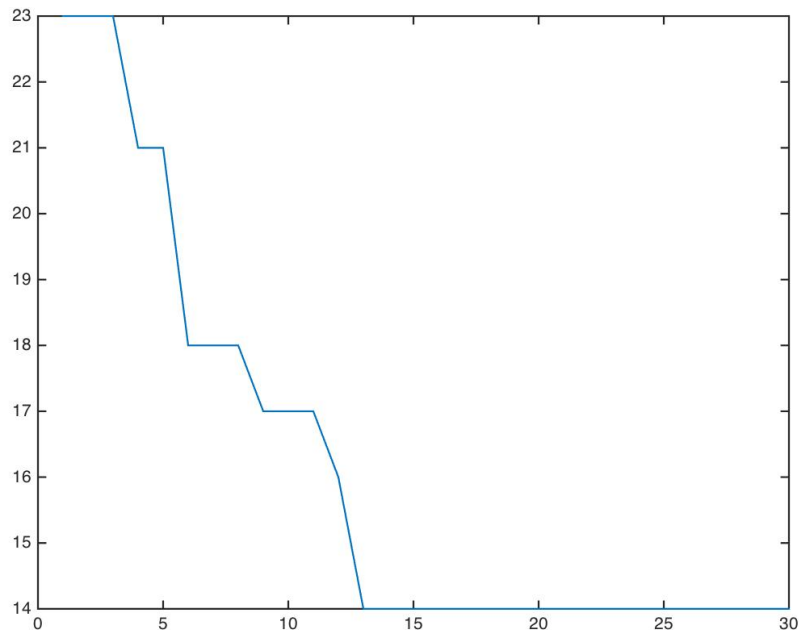


# Fator de Inércia Adaptativo Individual (AIW-PSO);

*CENÁRIO FJSP-8x8*

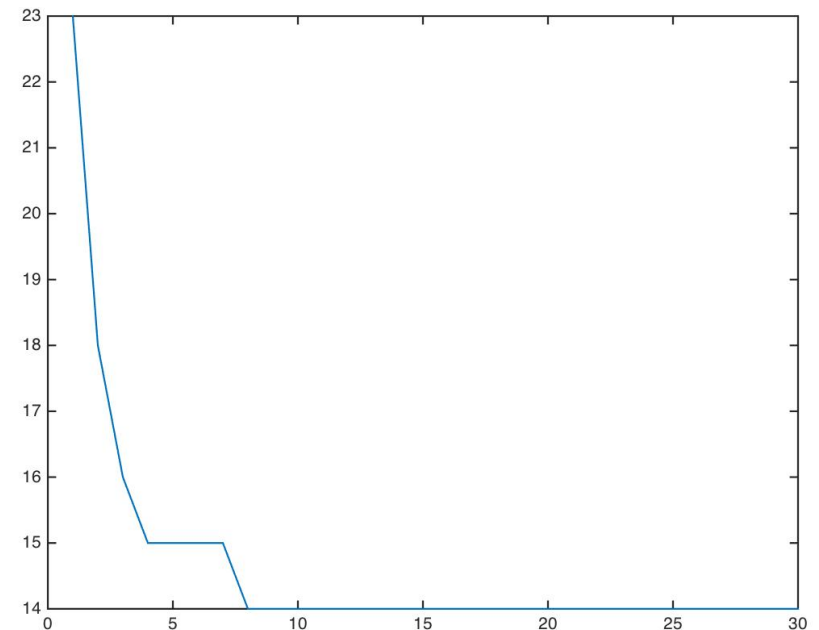
XIA; WU (2005)

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \text{iter}_i$$



SPAVIERI et. al (2015)\*

$$\omega_i^{k+1} = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{(f_i^k - f_{\text{worst}}^k)}{(f_{\text{best}}^k - f_{\text{worst}}^k)}$$



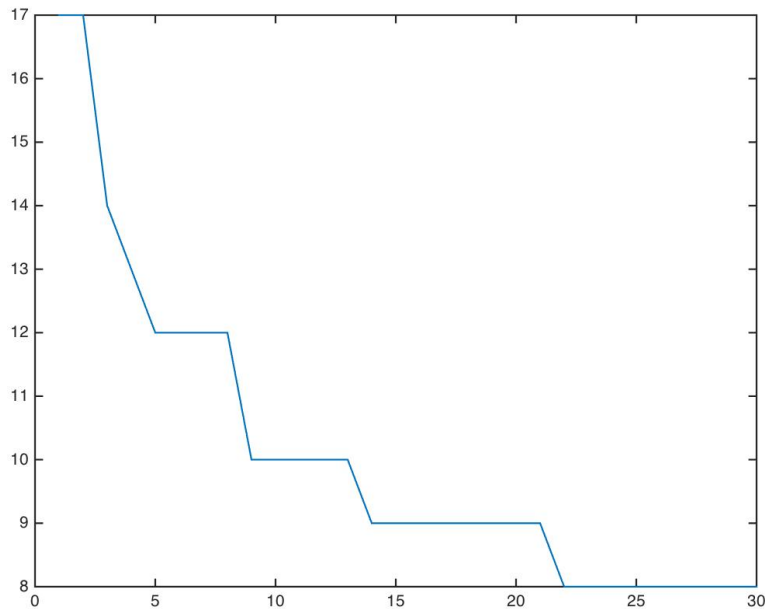
\* Adaptado ao contexto discreto do FJSP

# Fator de Inércia Adaptativo Individual (AIW-PSO);

*CENÁRIO FJSP-10x10*

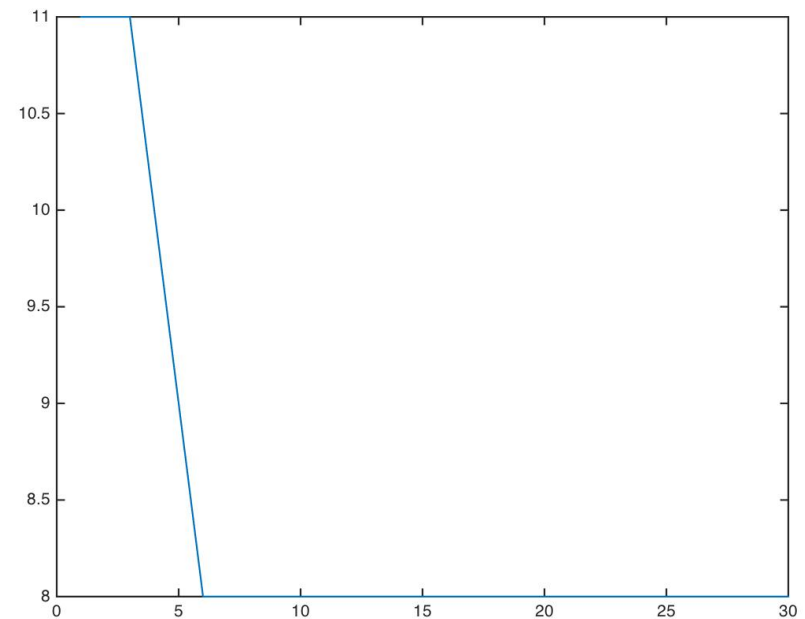
XIA; WU (2005)

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \text{iter}_i$$



SPAVIERI et. al (2015)\*

$$\omega_i^{k+1} = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{(f_i^k - f_{\text{worst}}^k)}{(f_{\text{best}}^k - f_{\text{worst}}^k)}$$



\* Adaptado ao contexto discreto do FJSP

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Trabalhos futuros:

- **Otimização** do algoritmo;

- Controle antiestagnação;
    - Validação de operações iterativas;
    - Paralelismo;
    - Ajuste de parâmetros de acordo com a sensibilidade dos testes;
    - Etc.

# Referências

- Xia, Weijun, and Zhiming Wu. *"An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems."* *Computers & Industrial Engineering* 48.2 (2005): 409-425.
- G. Aranha, *"Algoritmo de enxame de partículas para resolução do problema da programação da produção Job-Shop Flexível multiobjetivo,"* M.S. thesis, Dept. Comp. Science, Federal Univ. of Sao Carlos, SP, 2016.
- Goldbarg, Goldbarg and Luna. *"Otimização combinatória e Meta-heurísticas: algoritmos e aplicações,"* 1st ed. City of Rio de Janeiro, Brazil: Elsevier, 2016.
- Kacem, Imed, Slim Hammadi, and Pierre Borne. *"Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems,"* *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 32.1 (2002): 1-13.

Obrigado.