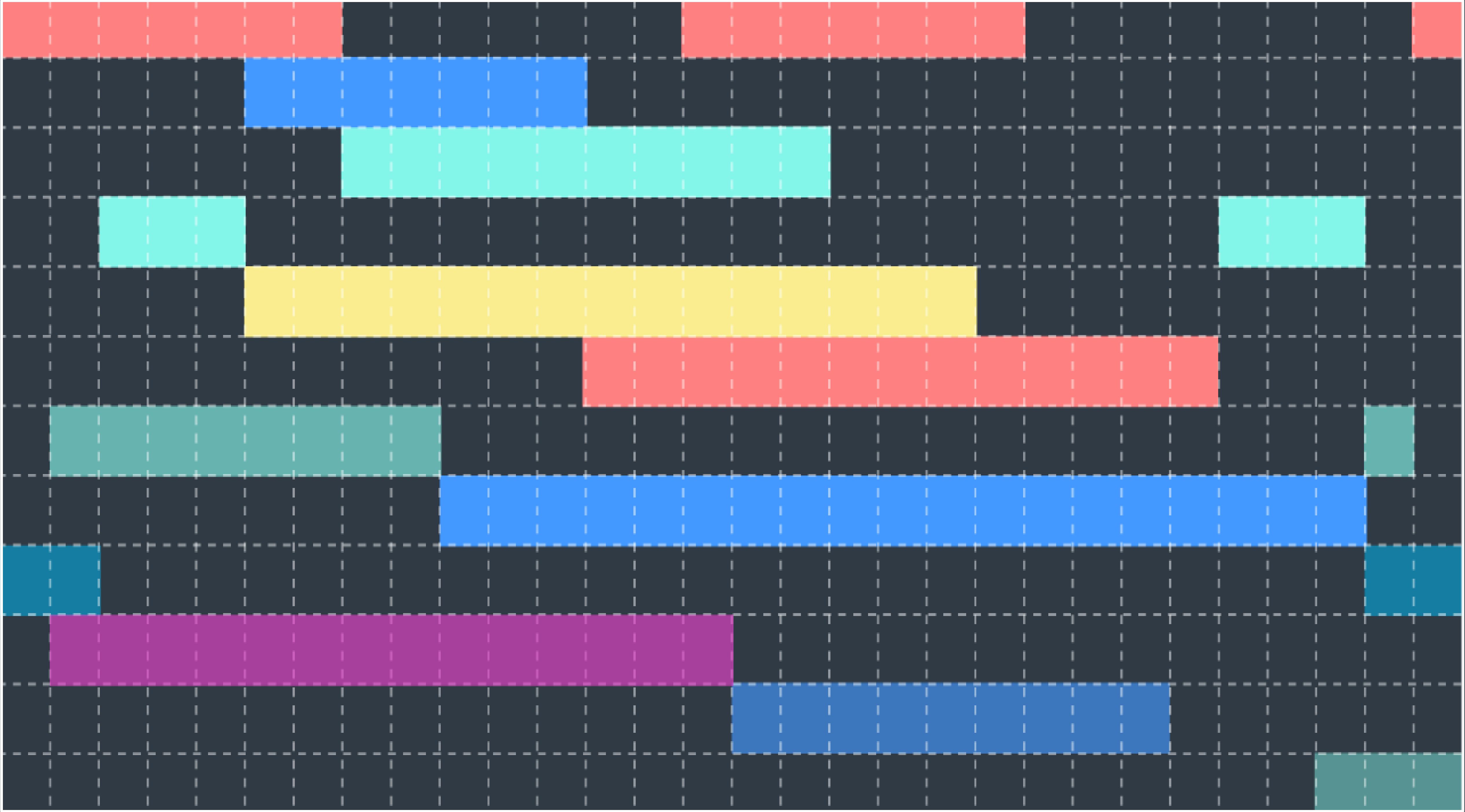


Programação da Produção II
(Aula 19)

Programação e Controle da Produção

Prof. Daniel de Oliveira Mota
Dep. Engenharia de Produção

Agenda

- Programação da Produção

APLICAÇÃO DO BALANCEAMENTO DE LINHA

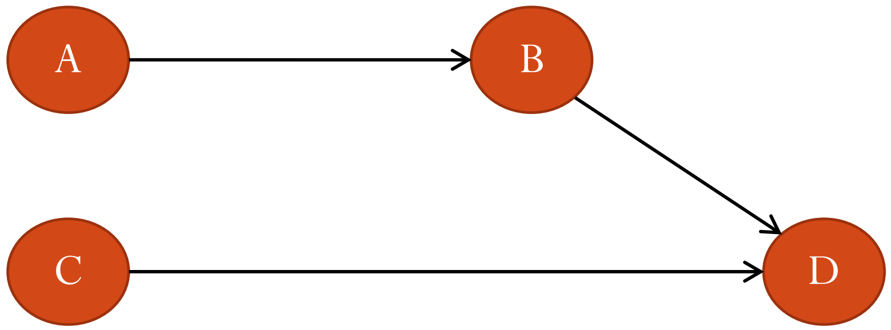
- Supondo uma empresa de fabricação de bolas de gude, que produza 320 bolinhas por dia;
- Cada dia possui 8 horas produtivas de trabalho;

Uma determinada bolinha depende de 4 processos para que esteja pronta e cada tarefa demanda um tempo mínimo:

- LISTA DE PROCESSOS e TEMPO DE EXECUÇÃO

- A) Corte do material (1,0 min); A
- B) Raspagem do material (0,7 min); B
- C) Estufa de molde (0,5 min); C
- D) Polimento (0,2 min). D

Diagrama de precedências

- 

Relação de precedência

Tarefa	Tempo (min)	Depende
A	1,0	-
B	0,7	A
C	0,5	-
D	0,2	C,D
	2,4	

Tempo de Ciclo

- Tempo de ciclo = $\dfrac{\text{Tempo total disponível}}{\text{Número de produtos produzidos}}$

- Tempo de ciclo = $\dfrac{\text{(8 horas x 60 minutos)}}{\text{320 bolinhas}}$

- Tempo de ciclo = $\dfrac{\text{480 minutos}}{\text{320 bolinhas}}$ $\boxed{= \text{1,5 minuto por bolinha}}$

Número Mínimo de Estações de Trabalho

- Mínimo número de estações de trabalho, depende do tempo de ciclo envolvido e da quantidade de trabalho necessária para completar um produto, processo ou serviço (Slack, 1997);

- Quanto maior o conteúdo de trabalho e menor o tempo de ciclo = Teremos necessidade de mais Estações de Trabalho

Número Mínimo de Estações de Trabalho

- $$\text{Número Mín. de Estações de Trabalho} = \frac{\text{Tempo total do processo}}{\text{Tempo de ciclo}}$$

- $$\text{Número Mín. de Estações de Trabalho} = \frac{2{,}4}{1{,}5} = 1{,}6$$

- **Número Mín. de Estações de Trabalho = 1,6 ≈ 2 estações de trabalho**

- *O arredondamento sempre será feito para maior, caso contrário não será possível concluir todos processos no tempo de ciclo apresentado.

Alocação de Tarefas

- Alocação das tarefas nas estações de trabalho:

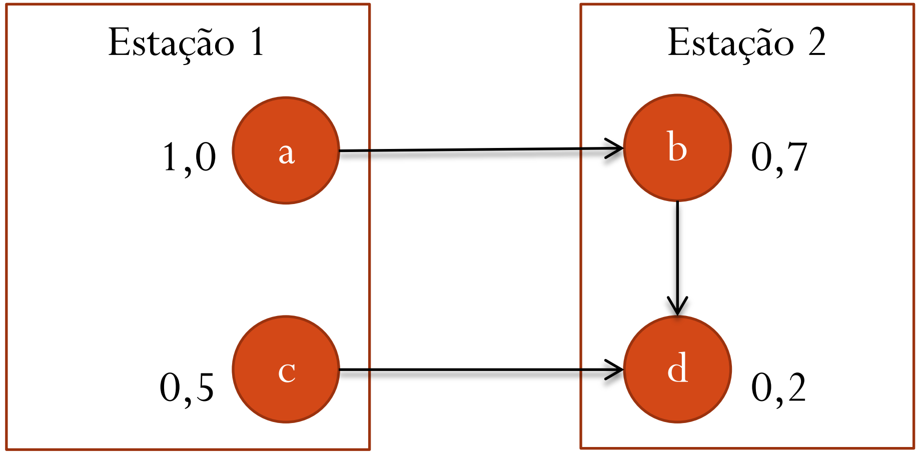
- Neste caso, duas regras Heurísticas serão aplicadas (Slack, 1997):

1. Simplesmente escolha a maior tarefa que caiba no tempo remanescente daquela estação;

2. Escolha a tarefa com maior número de atividades subsequentes, ou seja, aquela tarefa com maior número de tarefas que só poderão ser alocadas depois dela.

Alternativa 1 de alocação de tarefas a estações de produção

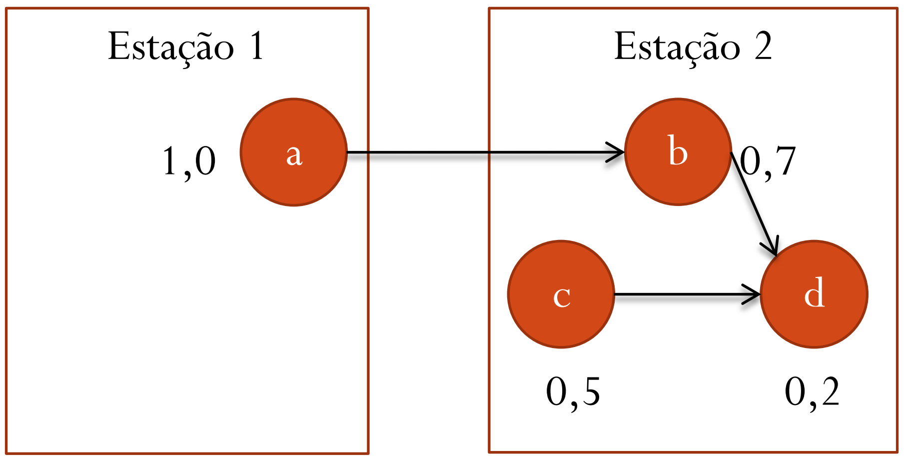
- Alternativa 1



- Tempo de processo na estação 1,5 min 0,9 min
- Tempo ocioso 0,0 min 0,6 min

Alternativa 2 de alocação de tarefas a estações de produção

- Alternativa 2



Tempo de processo na estação	1,0 min	1,4 min
Tempo ocioso	0,5 min	0,1 min

Melhor Balanceamento de Linha

Alternativa 1: Tempo de ciclo = 1,5 min

Alternativa 2: Tempo de ciclo revisado = 1,4 min

A alternativa melhor balanceada, é aquela que apresenta menor tempo ocioso:

Tempo Ocioso

- % Tempo ocioso = $\dfrac{\text{Tempo ocioso total por ciclo}}{\text{Número de estações x tempo de ciclo}}$

- T. O. Alternativa 1 = $\dfrac{(0 + 0{,}6)}{2 \times 1{,}5} = 0{,}2 = 20\%$

- T. O. Alternativa 2 = $\dfrac{(0{,}5 + 0{,}1)}{2 \times 1{,}4}$ $= 0{,}14 = 14\%$

Modelos para Balanceamento de Linhas

Neste texto trataremos do Modelo Simples Determinístico que, ainda que simples, é um problema NP-hard.

Segundo a bibliografia especializada, a primeira colocação formal do problema de balanceamento de linhas foi efetuada em 1954 por Benjamin Bryton, em sua tese de mestrado.

O primeiro modelo matemático linear para este problema foi desenvolvido por Salveson (1955) com um problema de programação linear, entretanto este modelo permitia a quebra de tarefas quando alocadas nas estações, o que poderia gerar soluções infactíveis.

Em seguida, Jackson (1956) foi o primeiro a utilizar a notação de árvore para este problema, onde cada caminho denota uma solução factível e cada arco representa uma estação. O Método de Jackson não requer a geração de todas as sequências factíveis, mas ainda assim utiliza uma busca exaustiva para as possibilidades analisadas.

Bowman (1960) foi o primeiro a formular um problema de programação inteira com variáveis binárias, fornecendo uma restrição de não-divisibilidade para as tarefas. Desde então, diversas abordagens de resolução vêm sendo desenvolvidas. Tais estudos para tratar o problema incluem métodos exatos, para problemas relativamente pequenos, e métodos heurísticos, determinísticos e probabilísticos, para problemas de porte maior.

O problema de balanceamento de linha é combinatório, de grande porte, mesmo para redes com número pequeno de operações, e matematicamente falando é NP-hard. Assim, os modelos viáveis para problemas de porte médio são heurísticos.

Os modelos otimizantes baseiam-se em programação inteira, "goal programming", programação dinâmica, técnica de "branch and bound", métodos de caminho mais curto e mais longo em redes.

No curso de PCP propõe-se uma aula-atividade chamada "Linha de Montagem de um Produto", em que os alunos são convidados a produzir um delicioso sanduíche segundo uma antiga receita do professor. A tabela relaciona as tarefas necessárias para a elaboração e as regras de precedência necessárias.

Por exemplo, a tarefa B ("espalhar requeijão no lado do corte de X") leva 5 s e só pode ser feita após a tarefa A ("cortar o pão") ter sido realizada.

Tarefa	Descrição	Dur. (s)	Antecedente
A	Cortar o pão em 3 fatias (X, Y, Z) de mesma espessura	20	–
B	Espalhar requeijão no lado do corte de X	5	A
C	Espalhar maionese no lado do corte de Z	5	A
D	Acomodar a fatia de queijo em X	3	B
E	Acomodar a fatia de presunto em Z	3	C
F	Acomodar duas fatias de tomate em X	5	D
G	Acomodar a folha de alface em Z	3	C
H	Espalhar uma pitada de sal em Z	2	G
I	Montar X e Y	4	F
J	Montar X/Y e Z	4	I, H
K	Transvasar 2 palitos (um em cada terço extremo)	3	J
L	Cortar o sanduíche na diagonal	4	K
M	Acomodar os pedaços, juntos, no prato de papel	4	L
N	Encaixar guardanapo entre os dois pedaços	2	M
O	Tirar prato da bandeja e acomodar no balcão	5	N
P	Transferir bandeja para início da operação	10	O

Em cada aula devem ser elaborados 30 sanduíches em 5 minutos, o que significa que em um fluxo contínuo e após a produção do primeiro sanduíche, a cada 10 segundos um novo sanduíche deverá sair da linha de montagem. Este tempo é denominado *tempo de ciclo*. Em uma *linha de montagem*, como a que é criada para esta aula, uma ou mais tarefas devem ser realizadas em *estações de trabalho* durante o processo de manufatura de um item. O tempo combinado de todas as tarefas atribuídas a cada estação não pode exceder o tempo de ciclo: em caso contrário, a taxa de produção não seria tal que houvesse um intervalo de tempo de 10 s entre um sanduíche e outro, no caso do nosso exemplo. Ajude o professor e seus alunos esfomeados construindo um modelo matemático que minimize o número de estações de trabalho necessárias, consistente com a restrição de tempo de ciclo e com as restrições de precedência.

1. Como a duração da tarefa A (20 segundos) é maior do que o tempo de ciclo, devem existir duas estações (A' e A'') realizando a tarefa, cada uma com duração de 10 s. Esta substituição garante que, a cada 10 s, uma tarefa A será concluída;

1. Variáveis de decisão

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \ (i = A, A', B, \ldots, P) \text{ for executada na estação } j \ (j = 1, \ldots, 17) \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a estação } j \ (j = 1, \ldots, 17) \text{ for aberta} \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

2. Função objetivo

Minimizar o número de estações abertas

$$\min \ z = \sum_{j=1}^{17} y_j$$

3. Restrições

3.1. Tempo máximo de operação por estação

Estação 1: $10x_{A1} + 10x_{A'1} + 5x_{B1} + 5x_{C1} + 3x_{D1} + \ldots + 5x_{O1} + 10x_{P1} \leq 10y_1$

Estação 2: $10x_{A2} + 10x_{A'2} + 5x_{B2} + 5x_{C2} + 3x_{D2} + \ldots + 5x_{O2} + 10x_{P2} \leq 10y_2$

$\vdots$

$\sum_{i=A}^{P} t_i x_{ij} \leq 10y_j$, para $j = 1, \ldots, 17$, sendo t_i = tempo de execução (em segundos) da tarefa i $(i = A, A', B, \ldots, P)$

3.2. Garantia de execução de todas as tarefas

Tarefa A: $x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} + \ldots + x_{A16} + x_{A17} = 1$

Tarefa A': $x_{A'1} + x_{A'2} + x_{A'3} + \ldots + x_{A'16} + x_{A'17} = 1$

$\vdots$

$\sum_{j=1}^{17} x_{ij} = 1$, para $i = A, A', B, \ldots, P$

3.3. Relações de precedência

Tarefa B: $\sum_{j=1}^{17} jx_{Bj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{Aj}$; $\quad \sum_{j=1}^{17} jx_{Bj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{A'j}$

Tarefa C: $\sum_{j=1}^{17} jx_{Cj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{Aj}$; $\quad \sum_{j=1}^{17} jx_{Cj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{A'j}$

Tarefa D: $\sum_{j=1}^{17} jx_{Dj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{Bj}$

Tarefa E: $\sum_{j=1}^{17} jx_{Ej} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{Cj}$

$\vdots$

Tarefa P: $\sum_{j=1}^{17} jx_{Pj} \geq \sum_{j=1}^{17} jx_{Oj}$

Modelagem Matemática Otimizante

Neste trabalho estamos interessados em, dado o tempo do ciclo, encontrar o balanceamento que minimiza o número de estações de trabalho, ou, minimiza a folga de balanceamento nas estações de trabalho. A quantidade de tarefas, suas durações em tempo e suas precedências são conhecidas.

Sejam:

- $J_1, J_2, ..., J_N$ **: conjunto de tarefas**
- $t_1, t_2, ..., t_N$ **: tempos de execução das tarefas J_j, j=1,...,N.**
- **M: número de estações.**
- **Tc: tempo de ciclo que deve ser maior ou igual que o maior t_j, j=1,...,N**

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ se a tarefa } J_j \text{ for designada para a estação } A_i \text{ , } i = 1,...,M \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Restrições:

Restrições que asseguram que cada tarefa será realizada em uma única estação:

$$\sum_{i=1}^{M} x_{ij} = 1 \ , \quad j = 1,\ldots,N$$

Estas restrições também garantem que todas as tarefas serão realizadas.

Restrições que garantem a relação de precedência entre as tarefas. Sem perda de generalidade podemos supor que as tarefas estão numeradas em ordem crescente obedecendo suas precedências de forma que se J_p precede J_q então p<q. Logo, as equações a seguir garantem que a solução obedeça às relações de precedência.

$$x_{qk} \le \sum_{i=1}^{k} x_{pi} \ , \ \mathrm{k} = 1,\ldots,\mathrm{M} \ \mathrm{e} \ (p,q) \in \Re \ ,$$

$$\text{onde } \Re = \{(\mathrm{p},\mathrm{q}) / \ \text{o elemento } \mathrm{J_p} \text{ precede imediatamente o elemento } \mathrm{J_q}\}$$

Restrições que garantem que os tempos totais de cada estação não superam o Tempo do Ciclo

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij} * t_j \leq Tc \ , \quad i = 1, ..., M$$

O número mínimo de estações de trabalho pode ser expresso por:

$$M_{min} = \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^{N} t_j}{Tc} \right\rceil$$

Função Objetivo

O objetivo do problema tratado é minimizar a folga das estações. A folga de uma estação i é dada por:

$$\text{folga}_i = \text{Tc} - \sum_{j=1}^{N} x_{ij} * t_j \quad , \quad \textbf{para j} \in \textbf{i}$$

A folga total de um balanceamento com M estações será

$$\text{Folga Total} = \text{M.Tc} - \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} x_{ij} * t_j$$

considerando-se a soma com todas as tarefas j da rede

Dessa forma, minimizar o número de estações equivale a minimizar a folga total e o problema pode ser formulado como:

$$Min \sum_{i=1}^{M} \text{folga}_i$$

$$s.a.: \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{M} x_{ij} = 1 \ , \quad j = 1,\dots, N \\ \displaystyle x_{qk} \leq \sum_{i=1}^{k} x_{pi} \ , \ \text{k} = 1,\dots,\text{M e } (p,q) \in \Re \\ \displaystyle\sum_{j=1}^{N} x_{ij} * t_j \leq Tc \ , \ \ i = 1,\dots, M \\ x_{ij} \in \{0,1\} \\ \Re = \{(\text{p, q}) / \ \text{o elemento } \text{J}_\text{p} \text{ precede imediatamente o elemento } \text{J}_\text{q}\} \end{cases}$$

Condições Adicionais aos Modelos Simples Determinísticos

- Operações mais lentas do que o tempo do ciclo
- Operações com mais do que uma pessoa de mesma qualificação
- Operações fixas e inflexíveis
- Operações com tempo de deslocamento
- Operadores com posicionamento fixo e orientação dos produtos
- Grupamentos por zoneamento de operações ou especialização.
- Não aditividade dos tempos
- Tempos e quebras aleatórios => estudo do comportamento de paradas versus estoques intermediários e teste de uso de coringas.

- Problemas fisiológicos:
  - ritmos individuais x distribuição das folgas e balanceamento com folga nula
  - metabolismo x controle de velocidade
  - distribuição e dimensionamento de paradas
  - posição de trabalho dos operadores
  - curvas de aprendizado e treinamento (parte ou todas as operações)
- Problemas psicológicos:
  - "pressão" de trabalho x absenteísmo, licenças e giro de mão de obra
  - tempo do ciclo reduzido x "job enlargement"
  - linha única x linha dupla
- operações com pessoas de qualificação diferente
- modelo múltiplo
- Forma física da linha

Comentários finais sobre Balanceamento de Linhas

Linha de Produção, Célula Flexível e Sistema Flexível de Manufatura

Aplicação e aplicabilidade de Modelos de Balanceamento de Linhas

Exercício proposto

- Suponha uma empresa de fabricação de carrinhos de bebê, que trabalha 8 horas por dia, produzindo 400 carrinhos por dia;
- Devem ser executadas 5 tarefas ao longo de seu processo de montagem:

Atividade	Tempo (minutos)	Dependência
Montagem da Almofada	1,5	-
Acoplagem da almofada	0,5	A
Montagem das rodinhas	1,0	-
Verificação de Segurança	0,5	C
Calibragem do Carrinho	1,0	B,D

Calcule:

Tempo de Ciclo;

Número Mínimo de Estações;

Tempo ocioso da operação.