

PROPOSTA PARA MODELAGEM DO SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM MÚLTIPLAS EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO ENXUTA UTILIZANDO SIMULAÇÃO

Alexandre Leme Sanches

UNESP/UNIFEI - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
DPD - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, São Paulo, 12516-410, Brasil
alexandre.sanches@saofrancisco.edu.br

Fernando Augusto Marins

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
DPD - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, São Paulo, 12516-410, Brasil
fmarins@feg.unesp.br

José Arnaldo Montevechi

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá
IEPG - Av. BPS, 1303, Itajubá, Minas Gerais, 37500-903, Brasil
montevechi@unifei.edu.br

RESUMO

Linhas de montagem múltiplas de modelos mistos em ambiente de produção enxuta é uma estrutura operacional, onde vários fornecedores internos abastecem várias linhas de montagem de modelos mistos simultaneamente, de modo que todas as linhas possam receber peças ou subconjuntos de todos os fornecedores. Para otimizar este sistema, a sequência de programação deve buscar o constante consumo de peças ou subconjuntos e ainda respeitar o tempo de ciclo das linhas. Portanto, qualquer variação em qualquer linha pode desestabilizar ou parar o sistema. Baseado no clássico problema de Monden, que determina o sequenciamento de uma única linha, este trabalho desenvolve um modelo matemático teórico para a programação e sequenciamento desses sistemas de abastecimento cruzado com várias linhas, e analisa o risco de paradas utilizando simulação.

PALAVRAS-CHAVE: Linha de montagem de modelos mistos, Sequenciamento da produção, Simulação.

ABSTRACT

A mixed-model of multiple assembly lines with common suppliers in a lean manufacture environment is an operational structure where several kanbans supply several mixed-model assembly lines, so that all assembly lines can receive parts or subassembly from all suppliers. To optimize this system, the sequencing needs to keep the consumption of parts or subassembly constant and respect the Takt Time (cycle time) of the lines. Therefore, any variation in any line can destabilize or bring down the system. Based on classic Monden Problem that determines the sequencing to only one line, this paper develops a theoretical basis for scheduling and sequencing these crossed supply systems with several lines, and analyses the risk of stoppages using simulation.

KEYWORDS: Mixed-model assembly line, Production sequencing, Simulation.

1. Introdução

A acirrada competitividade entre as empresas de manufatura, presente no cenário atual, exige a busca por sistemas produtivos cada vez mais eficientes, e que estejam inseridos num ambiente de constante aprimoramento. Visando a redução de estoques, e agilidade da produção, o conceito de produção enxuta (PE), ou *lean manufacturing* (LM), em consonância com os conceitos da filosofia *Just in Time* (JIT), e do Sistema Toyota de Produção (STP), se apresenta como um conjunto de importantes ferramentas operacionais. Porém, são necessárias condições específicas, e conhecimento detalhado do processo para uma correta adequação às condições da produção enxuta. Desde que surgiram os conceitos associados à produção enxuta, vários estudos que tratam da utilização eficaz de linhas de montagem de modelos mistos - LMMM (*Mixed-Model Assembly Lines - MMAL*) se concentram no sequenciamento de tais linhas.

Este trabalho trata do sequenciamento de linhas de montagem múltiplas em ambiente de produção enxuta, uma estrutura operacional composta por várias linhas ou células de montagem destinadas a modelos diversificados, que são abastecidas por fornecedores comuns (*kanbans*).

Para que o sistema alcance um desempenho eficiente, a programação da sequência com que os diversos modelos entram na linha deve ter como objetivo, manter constante a taxa de utilização dos componentes críticos consumidos, e ainda evitar a sobrecarga dos postos de trabalho, respeitando o tempo de ciclo (*Takt Time - TT*) da linha e evitando paradas indesejadas.

Objetivo

O objetivo deste estudo é elaborar um modelo (função objetivo e restrições) para otimização do sequenciamento de linhas de montagem “múltiplas” em ambiente de produção enxuta, considerando as incertezas inerentes ao processo (modelo estocástico). Considera-se aqui que, *linhas de montagem múltiplas* são linhas de montagem de produtos semelhantes, operando simultaneamente, e abastecidas pelos mesmos fornecedores internos. O modelo de sequenciamento deve priorizar duas metas básicas alinhadas com a filosofia da produção enxuta, para proporcionar eficiência à linha de montagem: o consumo constante de componentes e o nivelamento da carga de trabalho de cada posto. Desta forma, os fornecedores internos não sofrem picos de demanda, o que permite um melhor dimensionamento dos *kanbans*, e ainda são evitadas as indesejadas paradas da linha por sobrecarga ou sobreposição de postos.

Contribuições teóricas e práticas

Muitos trabalhos pesquisados focam o sequenciamento de linhas de montagem de modelos mistos (*MMAL*), podendo-se destacar Monden (1983), Miltenburg (1989), Inman e Bulfin (1991) e Kubiak e Sethi (1991), Bautista *et al* (1996), Boysen (2009), porém, o objetivo sempre foi o sequenciamento de linhas únicas. Estando presente no ambiente industrial, observa-se que, em muitos casos, os fornecedores internos não abastecem somente uma linha ou célula, o que pode comprometer as metas do sequenciamento, exigindo o superdimensionamento dos *kanbans* devido aos picos de demanda, ou provocando paradas de linha. Entre as principais contribuições deste trabalho, pode-se destacar o maior sincronismo entre fornecimento e consumo de componentes, melhor dimensionamento dos *kanbans*, menor probabilidade de paradas de linha, seja por sobrecarga dos postos de trabalho ou por falta de componentes. Maior aproximação do modelo com a situação real, possibilidade de grande gama de análises pela simulação, representando os gradativos níveis de aleatoriedade, dependência e consequente complexidade, que exigem a aplicação de um recurso específico como a simulação. Convém destacar também a utilização da simulação com dupla função, a função determinística de validação o modelo matemático proposto e a função estocástica de análise dos riscos envolvidos.

Delimitações

Segundo Marconi e Lakatos (2006), delimitar a pesquisa é estabelecer limites para investigação, selecionando um tópico, a fim de impedir que se torne muito extenso ou muito complexo, portanto para uma clara determinação dos limites deste trabalho, faz-se necessária uma breve explanação sobre a classificação dos problemas de sequenciamento em LMMM. De

acordo com Boysen *et al* (2009), o problema de sequenciamento em LMMM pode, em geral, receber três classificações, já excluindo os problemas de balanceamento de LMMM:

a) O “sequenciamento de modelos mistos” (*mixed-model sequencing*) com foco no volume de atividades de cada posto de trabalho, considerando a dependência entre tais atividades, a possibilidade de sobreposição de postos e a flexibilidade de atividades.

b) O “sequenciamento de automóveis” (*car sequencing*) objetivando a minimização de paradas da linha, também com foco na carga de atividades.

c) A “programação nivelada” (*level scheduling*) tendo como principal objetivo o consumo constante de componentes. Este método presume que o consumo de componentes está diretamente correlacionado com o volume de atividades, relegando a segundo plano a utilização do volume de atividades como critério de sequenciamento, porém, as variações de tempo, inerentes a qualquer processo produtivo, fazem com que esse objetivo ganhe relevância e exigem um tratamento específico como a simulação a eventos discretos. O objeto de estudo deste trabalho é o problema de programação nivelada (*level scheduling*), onde a proposta apresentada tem como base o método apresentado por Monden (1983), o *Toyota Goal Chasing (TGC)*.

Estrutura do Trabalho

O primeiro tópico, introdução, aborda o ambiente em que o trabalho está inserido, apresentando o problema de pesquisa, os objetivos, as contribuições teóricas e práticas, as delimitações e condições de contorno envolvidas. No segundo tópico, é apresentada uma revisão da literatura, embasando os conceitos utilizados no desenvolvimento do modelo proposto para linhas múltiplas. Na sequência, são mostrados os aspectos metodológicos, focando a classificação e complexidade da pesquisa, incluindo as características e justificativas da utilização da simulação a eventos discretos. A seguir é apresentado o desenvolvimento do modelo proposto, uma aplicação e análise dos resultados obtidos. Finalizando, são listadas as conclusões.

2. Revisão da Literatura

A Filosofia da Produção Enxuta (LM / JIT)

No trabalho *A genealogia da produção enxuta (The genealogy of lean production)* de Holweg (2007), é abordada a filosofia e evolução da produção enxuta, sob a ótica da globalização da indústria automobilística, com crescente domínio das empresas orientais. Desse trabalho podem-se destacar alguns conceitos aqui aplicados.

O Nivelamento da Produção, também conhecido no Sistema Toyota como *heijunka*, é a programação equalizada através do sequenciamento da montagem final em um padrão lógico que permite a combinação de itens distintos de forma a garantir um fluxo contínuo de produção, nivelando também a demanda de recursos. O *heijunka* permite a programação da produção em lotes unitários, proporcionando assim a minimização dos inventários.

A autonomia do operador, autonomia ou *autonomation* no Sistema Toyota. Consiste em facultar ao operador o poder de decisão de interromper o processo sempre que ocorrer alguma situação anormal ou quando a demanda for atingida. Pode ser aplicada em operações manuais, mecanizadas ou automatizadas. A autonomia permite que a linha seja parada no caso de detecção de falhas, gerando ação imediata para correções. Essa intervenção, segundo Monden (1983), valoriza a atuação do operário e estimula a aplicação de melhorias.

Mais um importante conceito inserido na filosofia da produção enxuta (LM/JIT) é o conceito de produção puxada, *pull system*, com a utilização do *kanban* como ferramenta de programação. O *kanban* atua como um amortecedor da produção ao mesmo tempo em que têm a função de limitar e controlar o estoque intermediário. No dimensionamento do *kanban*, é presumida a demanda constante do componente em questão. Nos casos com alguma oscilação de demanda o *kanban* deve ser dimensionado pelo pico de demanda, aumentando o estoque intermediário, o que reforça o relevância do método proposto neste trabalho.

O Método de Monden

Monden (1983) propõe um modelo matemático heurístico para determinação do sequenciamento eficiente de linhas de montagem de modelos mistos, figura 1. Essa linha de montagem é abastecida por vários *kanbans* de componentes, porém é tratada como bloco único, ou seja, comprimento zero, e como consequência, considera-se que todos os componentes são consumidos simultaneamente.

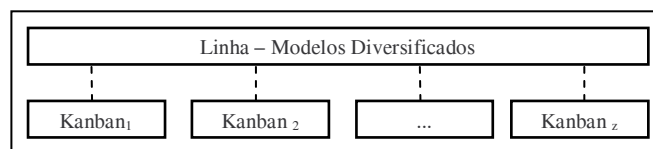


Figura 1 – Linha de Montagem de Modelos Mistos.

Segundo Monden (1983), a efetiva utilização de uma LMMM mistos requer a solução dos seguintes problemas:

1. Determinação do tempo de ciclo (*Takt Time*);
2. Determinação do número e sequência de postos de trabalho na linha;
3. Balanceamento da linha (atribuição de tarefas a cada posto de trabalho);
4. Determinação da sequência com que os vários modelos são inseridos na programação.

Existem, basicamente, duas metas a serem focadas para a determinação da sequência:

Primeira Meta: Nivelar a carga de trabalho em cada posto “*l*”, respeitando a condição (ou restrição) apresentada na equação 1, que representa nada mais do que a média ponderada dos tempos de montagem em cada posto de trabalho, ou seja, a equação 1 considera que, se um processo atrasa, esse atraso pode ser compensado no processo seguinte, desde que “em média”, o tempo de operação em cada posto não ultrapasse o tempo de ciclo da linha.

$$\text{Para cada posto } (l) \quad \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} Q_i T_{il}}{\sum_{i=1}^{\alpha} Q_i} \right\} \leq C \tag{1}$$

Q_i : Demanda Diária do Produto A_i ($i=1, \dots, \alpha$).

T_{il} : Tempo de Operação do Produto A_i no posto “*l*”

C : Tempo de Ciclo (*Takt Time*) = $\frac{\text{Tempo total de operação diário}}{\sum_{i=1}^{\alpha} Q_i}$

A restrição apresentada na equação 1 pode ser determinística ou estocástica, dependendo das características consideradas para a variável “tempo”. Se a variável “tempo”, considerando o tempo de operação dos diversos postos de trabalho, apresenta pequenas variações, a primeira meta pode ser tratada como uma condição de parada ou não-parada da linha. Se tal tempo de operação possui variações significativas, o tempo deve ser tratado como uma variável aleatória, e a equação 1 pode ser adaptada, agora não mais para determinar uma condição binomial de parada, mas sim para determinar a probabilidade de parada da linha.

A primeira meta considera que os diferentes produtos não possuem o mesmo tempo de operação em cada posto. Alguns podem, até mesmo, possuir um tempo de operação superior ao tempo de ciclo em certos postos. A linha de montagem deve ser capaz de ajustar tais diferenças sem necessariamente provocar uma parada. Porém, se produtos com alguma operação relativamente extensa for programado repetidamente, os atrasos e paradas de linha serão inevitáveis, devido ao acúmulo localizado de carga.

Segunda Meta: Manter constante a taxa de utilização de todos os componentes consumidos pela linha.

O método de Monden consiste em minimizar as distâncias entre o consumo real e o consumo ideal de componentes, representadas na figura 2. Considera também, que existe alta correlação entre o número de componentes consumidos e o tempo de operação em cada posto de trabalho, permitindo assim, modelar o nivelamento do consumo de componentes em detrimento do nivelamento do tempo de operação, tratando o mesmo apenas como uma restrição.

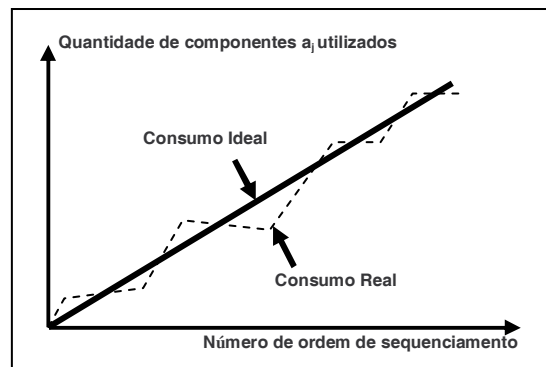


Figura 02 – Consumo de determinado componente a_j na linha

O modelo matemático para busca do melhor sequenciamento, descrito por Monden (1983) é representado pela equação 2.

$$\min D_k = \sqrt{\sum_{j=1}^{\beta} \left(\frac{K \times N_j}{Q} - X_{j,k-1} - b_{ij} \right)^2} \quad (2)$$

Notação:

A_i ($i = 1 \dots \alpha$) = produtos a serem programados para a linha.

Q = Somatória da demanda diária de todos os produtos A_i ($i = 1 \dots \alpha$).

k = número de ordem seqüencial com a qual os produtos são inseridos na linha ($k = 1 \dots Q$).

N_j = Quantidade total necessária do componente a_j ($j = 1 \dots \beta$) para produzir Q .

$X_{j,k}$ = Quantidade total consumida do componente a_j ($j = 1 \dots \beta$) até o momento k .

$b_{i,j}$ = Quantidade necessária do componente a_j ($j = 1 \dots \beta$) para produzir uma unidade do produto A_i ($i = 1 \dots \alpha$).

D_k : Distância entre o consumo real e o consumo ideal no momento k .

Críticas ao modelo de Monden

O modelo descrito por Monden, e sua heurística podem obter uma solução satisfatória, porém, é considerado um método de “míope” (Bautista *et al*, 1986), por otimizar o momento corrente sem considerar os momentos futuros, mesmo tendo em vista a forte convergência natural do modelo, mas é um primeiro passo para o desenvolvimento de trabalhos mais complexos.

O problema de seqüenciamento de LMMM, com o objetivo de obter uma demanda regular de recursos, é um problema que pode ser modelado de várias maneiras, Miltenburg (1989), Inman & Bulfin (1991) e Kubiak e Sethi (1991) apresentam variações e evoluções ao modelo proposto por Monden. Vários outros estudos têm abordado este assunto para exploração de recursos de busca de soluções satisfatórias, utilizando metaheurísticas ou métodos otimizantes, como por exemplo: Algoritmos Genéticos em Leu (1996), *Bean Search* em Leu (1997), *Tabu Search* em McMullen (1998), *Simulated Annealing* em McMullen (2000), *Ant Colony* em McMullen (2001) e a *Bounded Dynamic Programming (BDP)* em Bautista *et al* (1996), sendo este último, uma evolução da Programação Dinâmica (*Dynamic programming*) considerado de grande eficiência e praticidade de cálculos para o caso de seqüenciamento de LMMM.

A simulação a eventos discretos

Simulação é uma técnica que utiliza modelos computacionais para representar características de uma instalação real, ou proposta, sob investigação, com o objetivo de avaliar o

comportamento deste sistema sob diversas condições. Segundo Law e Kelton (2000), a simulação é uma das mais importantes ferramentas de análise, disponível aos responsáveis pelo projeto e operação de sistemas ou processos complexos. A simulação permite a análise de condições de difícil equacionamento, sujeitas a extensas lógicas condicionais, o que a torna adequada a problemas de análise de operações em ambiente de produção.

3. Aspectos metodológicos

Toda pesquisa científica é motivada por uma intriga, uma dúvida, uma inquietação, que evolui de forma organizada e se torna um problema de pesquisa. Os problemas de pesquisa, num ambiente científico, principalmente os que envolvem modelos quantitativos, exigem métodos que busquem soluções precisas e confiáveis, e se possível, com alto poder de generalização, proporcionando assim, contribuição à comunidade científica.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), observam-se na literatura duas classes distintas de pesquisa baseada em modelos quantitativos: a pesquisa *axiomática* e a pesquisa *empírica*. A primeira classe, pesquisa *axiomática*, é dirigida a modelos de problemas previamente padronizados. Nesse caso, a preocupação fundamental do pesquisador é obter soluções para o modelo em questão e assegurar que tais soluções ajudem a esclarecer a estrutura do problema descrito. A pesquisa *axiomática quantitativa* produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis do modelo, baseado em premissas sobre o comportamento de outras variáveis. Ela pode também produzir conhecimento sobre como manipular certas variáveis, visando um desempenho específico de outras, ou ainda basear-se em modelos existentes para desenvolver modelos para problemas mais complexos ainda não estudados.

Os pesquisadores dessa linha olham para o problema em questão, pelo ponto de vista do modelo matemático, e a partir dele buscam melhorias e soluções. A pesquisa *axiomática quantitativa*, assim como a *empírica*, pode ainda ser subdividida em *normativa* ou *descritiva* (tabela 1). A pesquisa *axiomática normativa* desenvolve padrões, normas, políticas estratégicas e ações para melhorar resultados disponíveis na literatura

Modelagem e Simulação		
	Descritiva	Normativa
Empírica	ED	EN
Axiomática	AD	AN

Tabela 1: Classificação do método de pesquisa “Modelagem e Simulação” (Bertrand e Fransoo, 2002).

A pesquisa apresentada neste trabalho pode ser classificada como pesquisa *axiomática normativa* no que se refere à primeira meta do modelo de Monden, e pesquisa *empírica descritiva* no que se refere à segunda meta. Na primeira meta é desenvolvido ou adaptado um modelo já existente às condições específicas de linha múltiplas (pesquisa EN), enquanto na segunda meta é realizada uma análise empírica simulada para identificação da probabilidade de parada da linha (pesquisa ED). No desenvolvimento e aplicação da metodologia, os efeitos do sequenciamento são expressos em valores numéricos, devidamente analisados pelo ponto de vista determinístico e estocástico, nesse último aplicando a simulação. Os processos analisados são representados em modelos, que permitem verificar a eficiência do equacionamento matemático (validação).

A essência do trabalho consiste no ajuste de variáveis de um modelo conhecido para um modelo expandido proposto, considerando as incertezas através da simulação, cujo objeto de estudo é uma situação mais abrangente e generalizada, as linhas múltiplas. Convém destacar que o modelo matemático obtido independe do método de busca de solução, heurística ou otimizante, o método proposto simplesmente modela a função objetivo e as restrições. No caso, para busca da solução satisfatória, o trabalho utiliza o algoritmo *Toyota Goal Chasing* devido à simplicidade de cálculos. O ajuste do modelo se dá pela análise individual das variáveis envolvidas, e a validação do modelo é obtida pela simulação determinística com a aplicação do software Promodel.

4. Modelo Proposto

Sequenciamento de linhas de montagem múltiplas

O modelo proposto é focado no ambiente real encontrado em muitas indústrias, onde várias linhas de montagem de modelos mistos operam simultaneamente, sendo abastecidas por fornecedores comuns, tal condição é representada pela figura 3. O principal objetivo é determinar, para todas as linhas, a sequência com que os produtos são programados, visando à máxima aproximação do consumo constante de componentes e a minimização da probabilidade de parada das linhas. A partir desse ponto, o problema toma dois rumos distintos:

O primeiro segue a linha da pesquisa *axiomática normativa*, onde, baseado na busca da máxima aproximação do consumo constante de componentes, é analisado o modelo de Monden para linhas únicas, sendo realizados os ajustes e adaptações necessários para a programação das linhas múltiplas. O segundo trata das incertezas envolvidas na determinação da probabilidade de parada das linhas, caracterizando a pesquisa *empírica descritiva*. A parada da linha pode ser provocada por basicamente três problemas: a sobrecarga de trabalho em determinado posto, a variabilidade no tempo de operação dos vários postos de trabalho, ou a falta de componentes gerada pelo sequenciamento ineficiente. A sobrecarga de trabalho pode ser gerada pelo sequenciamento repetido do mesmo produto, exigindo tempo excedente do posto mais crítico. Essa situação está diretamente relacionada com o consumo acelerado de determinado componente, problemas que de forma geral integram o modelo.

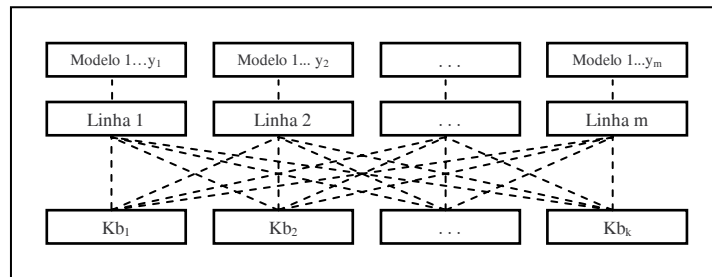


Figura 3 – Linhas de montagem múltiplas para modelos mistos

Seguindo a lógica apresentada nas figuras 1 e 2, as figuras 3 e 4 expandem o conceito para linhas múltiplas, onde o consumo real do componente “a_j” no momento “k” é dado pelo somatório do consumo parcial de todas as linhas. O consumo parcial ideal do componente a_j no momento “k” é dado por “(k.N_j)/(Q/M)” onde N_j representa a soma do consumo total de todas as linhas, como descrito na equação 3.

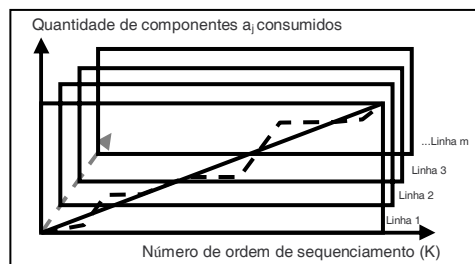


Figura 4 - Consumo de um componente em linhas múltiplas.

$$[N_j] = \sum_{m=1}^M [Q_{im}][b_{imj}] \tag{3}$$

Expandindo o conceito para todos os componentes a_j, é possível visualizar a extensão do problema, como mostrado nas figuras 4 e 5.

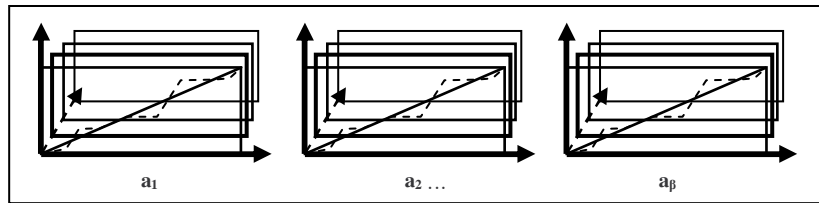


Figura 5 - Consumo de vários componentes em linhas múltiplas.

Modelo Matemático

Para obter a melhor sequência com que os produtos entram no sistema, é desenvolvido o modelo apresentado na equação 4, adaptado do modelo de Monden, com mesma notação, exceto o índice de linhas ($m=1, 2, \dots, M$). Ainda para cada produto A_{im} , faz-se necessária a restrição apresentada na equação 5. Tal restrição, inexistente no caso de linhas únicas, se deve à possibilidade de divergência com relação à demanda de determinado produto, ou seja, “em média”, o componente/produto programado está limitado à demanda máxima, mas individualmente pode estar excedendo tal demanda.

$$\min D_{k,im} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\beta} \left(\frac{K \times N_j}{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M Q_{im} \right) / M} - X_{j,k-1} - \sum_{m=1}^M b_{ijm} \right)^2} \tag{4}$$

Sujeito a:

$$\sum_k A_{im} \leq Q_{im} \tag{5}$$

Para ajuste periódico do consumo parcial acumulado, pode ser utilizada a equação 6.

$$X_{jk} = X_{j,k-1} + \sum_{m=1}^M b_{i^*jm} \tag{6}$$

Para a contextualização da segunda meta, é utilizada a simulação a eventos discretos, onde os tempos são tratados como variáveis aleatórias contínuas condicionadas como exponenciais ($Exp \mu, \sigma$) e inseridas no sistema modelado no software Promodel. Verificando a condição expressa na equação 7. Tal condição pode ser avaliada no Promodel pelo relatório “Blocked” indicando que certo posto foi bloqueado devido à sobrecarga do posto subsequente.

$$Prob_l \left\{ \left(\frac{\sum_{i=1}^{\alpha} Q_i \cdot T_{il}(Exp \mu, \sigma)}{\sum_{i=1}^{\alpha} Q_i} \right) \leq C \right\} \tag{7}$$

Algoritmo

O algoritmo, apresentado pela figura 6, integra as duas metas do problema através de um processo iterativo, onde tais metas devem ser alcançadas simultaneamente. Para o ranqueamento das principais possibilidades de sequenciamento pode-se, ao invés de adotar a menor distância para $k=1$, adotar-se a segunda menor, o que já altera o sequenciamento influenciando o perfil de risco, e assim seguir essa lógica até que se obtenha um número satisfatório de possibilidades, por exemplo, 10 sequências distintas. Um inconveniente desse algoritmo é a dificuldade de implementação integral em programação computacional, pois a simulação envolve alteração de parâmetros específicos como datas e horários, que exigem a intervenção física pelo editor do Promodel, impossibilitando a utilização de softwares de busca como, por exemplo, o SimRunner.

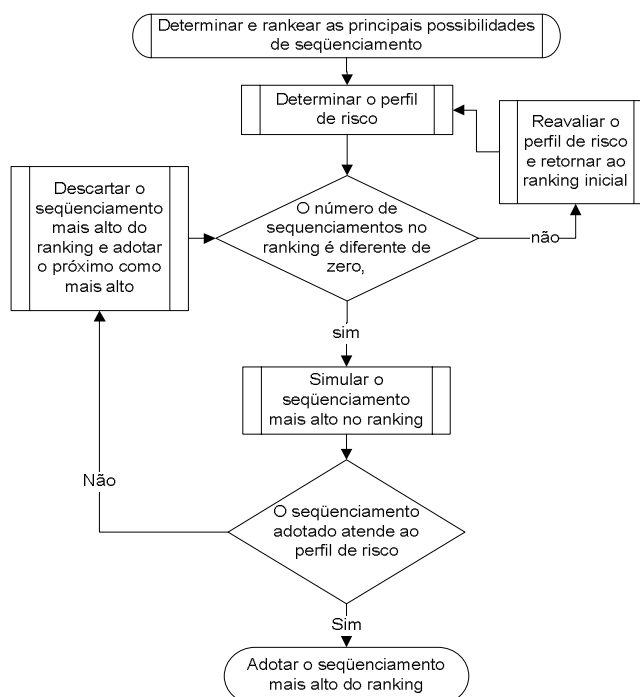


Figura 6: Algoritmo do modelo proposto

Exemplo numérico (adaptado de Monden, 1983)

Supondo duas linhas múltiplas de modelos mistos (m=1, 2) com as respectivas demandas diárias Q_{i1} e Q_{i2} (i=1, 2, 3) de cada produto A_{i1} (A_{11} , A_{21} , A_{31} - linha 1) e A_{i2} (A_{12} , A_{22} , A_{32} - linha 2), indicadas na tabela 2, e que a necessidade unitária necessária de componentes b_{imj} (j=1,2,3,4) para cada componente a_j (j=1, 2, 3, 4) para produzir todos os produtos A_{im} são apresentadas na tabela 3:

Produtos A_{im}	A_{1m}	A_{2m}	A_{3m}	TT
Demanda Diária da Linha 1 (m=1)	2	3	5	10
Demanda Diária da Linha 2 (m=2)	4	5	1	10

Tabela 2: Demanda dos produtos de cada linha A_{im} .

Produtos $A_{im} \setminus$ Componentes a_j		a_1	a_2	a_3	a_4
Linha 1	A_{11}	1	0	1	1
	A_{21}	1	1	0	1
	A_{31}	0	1	1	0
Linha 2	A_{12}	1	0	1	0
	A_{22}	1	0	0	1
	A_{32}	1	0	1	0

Tabela 3: Consumo do componente a_j na produção de cada unidade do produto A_{im} .

Assim, a quantidade total necessária (N_j) de cada componente a_j (j=1,2,3,4) para produzir todos os produtos A_{im} (i=1,2,3) e (m=1,2) pode ser obtida pela equação 3:

$$[N_j] = [2 \ 3 \ 5] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} + [4 \ 5 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 8 \\ 7 \\ 5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15 \\ 8 \\ 12 \\ 10 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Assim, aplicando as equações 4, 5 e 6, para $k = 1$, a soma das distâncias $\sum_m (D_{kim})$ pode ser calculada conforme a equação 4:

$$(i_1 = 1; i_2 = 1) D_{1,1,1} = \sqrt{\left[\left(\frac{1 \times 15}{10} - 0 - (1+1)\right)^2 + \left(\frac{1 \times 8}{10} - 0 - (0+0)\right)^2 + \left(\frac{1 \times 12}{10} - 0 - (1+1)\right)^2 + \left(\frac{1 \times 10}{10} - 0 - (1+0)\right)^2\right]} = 1,24 \tag{9}$$

Para (linha 1, $i_1=1$) e (linha 2, $i_2=2$) $D_{1,1,2} = 1,39$ (10)

Para (linha 1, $i_1=1$) e (linha 2, $i_2=3$) $D_{1,1,3} = 1,24$ (11)

Para (linha 1, $i_1=2$) e (linha 2, $i_2=1$) $D_{1,2,1} = 0,57^*$ (12)

Para (linha 1, $i_1=2$) e (linha 2, $i_2=2$) $D_{1,2,2} = 1,65$ (13)

Para (linha 1, $i_1=2$) e (linha 2, $i_2=3$) $D_{1,2,3} = 0,57$ (14)

Para (linha 1, $i_1=3$) e (linha 2, $i_2=1$) $D_{1,3,1} = 1,39$ (15)

Para (linha 1, $i_1=3$) e (linha 2, $i_2=2$) $D_{1,3,2} = 0,57$ (16)

Para (linha 1, $i_1=3$) e (linha 2, $i_2=3$) $D_{1,3,3} = 1,39$ (17)

Assim, $D_{1,i_1^*,i_2^*} = \min \{D_{k,i,m}\} = 0,57 \therefore i^* = 2$ (linha 1) e $i^* = 1$ (linha 2). Portanto, os primeiros produtos a serem programados na sequência eficiente são A_{21} na linha 1 e A_{12} na linha 2. Sempre considerando a restrição da equação 5. Seguindo para o próximo passo é utilizada a equação 6, o consumo acumulado é:

$$X_{jk} = X_{j,k-1} + b_{31j} + b_{22j} \tag{18}$$

$$X_{11} = 0 + 1 + 0 = 1 \tag{19}$$

$$X_{21} = 0 + 0 + 1 = 1 \tag{20}$$

$$X_{31} = 0 + 0 + 1 = 1 \tag{21}$$

$$X_{41} = 0 + 1 + 0 = 1 \tag{22}$$

Seguindo o procedimento até $k = 10$, obtém o resultado apresentado na tabela 3.

k	D _{k11}	D _{k12}	D _{k13}	D _{k21}	D _{k22}	D _{k23}	D _{k31}	D _{k32}	D _{k33}
1	1,24	1,39	1,24	0,57*	1,65	0,57	1,39	0,57	1,39
2	1,31	1,59	1,31	1,15	2,03	1,15	1,23	0,57*	1,23
3	0,75*	1,33	0,75	0,98	2,04	0,98	1,33	0,98	1,33
4	1,97	1,87	1,97	1,04	1,64	1,04	1,57	0,28*	1,57
5	1,50	1,50	1,50	0,50*	1,50	0,50	1,50	0,50	1,50
6	1,51	1,64	1,51	1,04	1,87	1,04	1,30	0,28*	1,30
7	0,98	1,33	0,98	0,75*	1,84	0,75	1,33	0,75	1,33
8	1,15	1,59	1,15	1,31	2,22	1,31	1,23	0,85*	1,23
9	0,57	1,39	0,57*	1,24	2,26	1,24	1,39	1,24	1,39
10	1,73	1,41	1,73	1,00	1,73	1,00	1,41	0,00*	1,41

Tabela 3: Menores Distâncias D_{kim} .

K	Sequencia linha 1 (m=1)	Sequencia linha 2 (m=2)	X _{1K}	X _{2K}	X _{3K}	X _{4K}
1	A ₂	A ₁	2	1	1	1
2	A ₂ A ₃	A ₁ A ₂	3	2	2	2
3	A ₂ A ₃ A ₁	A ₁ A ₂ A ₁	5	2	4	3
4	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂	6	3	5	4
5	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁	8	4	6	5
6	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂ A ₃	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂	9	5	7	6
7	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂ A ₃ A ₂	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁	11	6	8	7
8	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂ A ₃ A ₂ A ₃	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂	12	7	9	8
9	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂ A ₃ A ₂ A ₃ A ₁	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₃	14	7	11	9
10	A ₂ A ₃ A ₁ A ₃ A ₂ A ₃ A ₂ A ₃ A ₁ A ₃	A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₁ A ₂ A ₃ A ₂	15	8	12	10

Tabela 4: Melhor sequência de programação para as linhas 1 e 2.

Para verificação da condição relativa ao perfil de risco de parada, o problema é modelado no software Promodel (figura 7), onde é verificado que para tempos de operação de ($Exp \mu=0.6; \sigma=0,1$) para todos os postos, com 100 réplicas, perfil de risco de parada aceito de 10%, tempo de ciclo de 1 hora e jornada diária de 10 horas. Verifica-se, na análise, que não houve bloqueio significativa, ou seja, nenhum posto de trabalho ficou parado devido ao atraso próprio ou do posto seguinte. Considerando que uma operação com atraso é aquela que excede o tempo de ciclo de 1 hora. Caso o perfil de risco fosse excedido, dever-se-ia tomar um novo sequenciamento satisfatório para verificação da condição de risco.

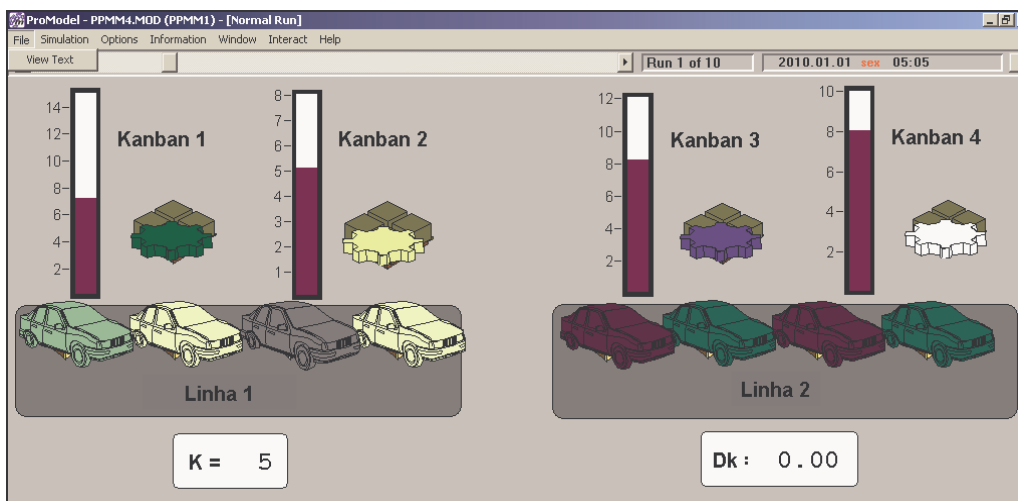


Figura 7: Modelagem do exemplo numérico pelo software Promodel.

5. Conclusões

O modelo proposto, apesar de testado apenas para duas linhas, mostrou-se com a mesma eficiência do modelo de Monden, ou seja, encontra uma boa solução, porém não ótima.

Para obtenção da solução ótima, deve-se analisar todos os postos simultaneamente como proposto por Miltenburg (1989) e Bautista *et al* (1996). Verifica-se que, a princípio nada impede a aplicação do método *BDP* também no problema de linhas múltiplas.

Para maior generalização é necessária a aplicação do modelo para mais de duas linhas com um perfil de risco mais restrito, exigindo uma aplicação mais ampla do algoritmo.

O problema em questão pode ser modelado como um problema de rede com o objetivo de encontrar o caminho mínimo, porém é necessária a inserção de penalidades no cálculo dos caminhos devido à restrição de demanda de cada produto, limitando a região de solução.

Para continuidade deste trabalho, é proposta a elaboração de um fator de ponderação de sequenciamento, considerando a otimização simultânea da variável $D_{k,i,m}$ e o nível de risco de parada, cada qual ponderado pela sua importância conforme a necessidade do usuário, sendo esta composição a nova função objetivo a ser otimizada.

O software Promodel, comprovou o poder da simulação em representar incertezas em situações condicionais complexas, demonstrando através de seus relatórios, não só a probabilidade de parada, mas também o local da parada e o tempo parado, informações importantes para correção do sequenciamento e prevenção de novas paradas.

A validação do modelo matemático, através da aplicação determinística do Promodel também merece destaque, visto que quando as incertezas são excluídas do modelo, a resposta coincide com a resposta do modelo matemático.

As ferramentas estocásticas como simulação, a princípio, podem ser combinadas com ferramentas determinísticas, desde que a natureza do problema permita.

Referências

Bautista, J.; Companys, R.; Corominas, A.; Heuristics and exact algorithms for solving the Monden problem. *European Journal of Operational Research*, 88 101-113, 1996.

Bertrand, J. W. M.; Fransoo, J. C.; Modelling and simulation - operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*. V. 22, n.3, 241-264, 2002.

Boysen, N.; Flidne, M.; Scholl, A.; Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* 192, 349-373, 2009.

Holweg, M. The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, 25 420-437, 2007.

Inman, R. R.; Bulfin, R. L.; Sequencing JIT mixed-model assembly lines. *Management Science*, vol. 37, no. 7, 1991.

Kubiak, W.; Sethi, S.; A Note on "Level schedules for mixed-model assembly lines in Just-in-Time production systems. *Management Science*, vol. 37, no. 1, 1991.

Law, A.; Kelton, D.; *Simulation modeling and analysis*. New York, McGraw-Hill, 2000.

Leu, Y. Y.; Matheson, L. A.; Rees, L. P.; Sequencing mixed-model assembly lines with Genetic Algorithms. *Computers Ind. Engng.*, vol. 30, no. 4, pp. 1027-1036, 1996.

Leu, Y. Y.; Huang, Y. P.; Russel, R. S.; Using bean search techniques for sequencing mixed-model assembly lines. *Annals of Operational Research*. 70 379-397, 1997.

Marconi, M. A.; Lakatos, M. E. *Técnicas de Pesquisa*. 6ª edição. São Paulo: Atlas, 2006.

McMullen, P. R.; JIT Sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu Search. *Production Planning & Control*, vol. 9, no. 5, 504-510, 1998.

McMullen, P. R.; A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just in time line. *IIE Transactions* 32. 679-686, 2000.

McMullen, P. R.; An ant colony optimization approach to addressing a just in time sequencing problem with multiple objectives. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, 309-317, 2001.

Miltenburg, J.; Level schedules for mixed-model assembly lines in Just-in-Time production systems. *Management Science*, vol. 35, no. 2, 1989.

Monden, Y.; Toyota Production System – Practical Approach to Production Management. *Industrial Engineering and Management Press – Institute of Industrial Engineers* 181-192, 1983.