

# Balanceamento de linha de montagem mista em cenários com distintos mix de produtos

## *Mixed assembly line balancing method in scenarios with different mix of products*

Gustavo Reginato<sup>1</sup>  
Michel José Anzanello<sup>1</sup>  
Alessandro Kahmann<sup>1</sup>  
Lucas Schmidt<sup>1</sup>

**Resumo:** Linhas de montagem mista combinam a fabricação de diferentes modelos de produtos em uma única linha de montagem, proporcionando flexibilidade de produção de acordo com a sazonalidade de vendas, evitando a baixa utilização dos ativos. Este artigo propõe uma heurística para balanceamento em linhas de produção sujeitas a distintos *mix* de produtos com vistas a atenuar as restrições de capacidade nas estações de trabalho e aumentar a eficiência de balanceamento. A abordagem proposta foi aplicada em uma linha de montagem mista com 7 modelos de produtos. Os resultados foram considerados satisfatórios, segundo avaliação de especialistas, quando avaliados em termos de capacidade produtiva, ciclo de fabricação e balanceamento de linha.

**Palavras-chave:** Linha de montagem mista; Balanceamento; Capacidade; RPW.

**Abstract:** *A mixed-model assembly line can manufacture different products in the same assembly line, providing flexible production according to demand seasonal behavior. This article proposes a heuristic that aims to balance production lines subjected to several product models in order to attenuate capacity restrictions in workstations and increase the balancing efficiency. The proposed approach was applied to a mixed assembly line composed of seven product models. The results were considered satisfactory when assessed in terms of production capacity, manufacturing cycle time, and assembly line balancing.*

**Keywords:** *Mixed-model assembly line; Line balance; Capacity; RPW.*

## 1 Introdução

Recentes tendências na demanda dos clientes por produtos customizados incentivaram a implantação de linhas de montagem mistas em diversos ambientes industriais (Mendes et al., 2005). Linhas mistas podem produzir mais de um tipo de produto na mesma linha de montagem (LM) (Becker & Scholl, 2006), e diferentes ciclos de vendas podem ser combinados para evitar a baixa utilização de ativos quando ocorrer baixa venda de um específico produto (Leone & Rahn, 2004). No entanto, para que estes arranjos mistos se tornem viáveis em mercados altamente concorridos, os projetistas das linhas de montagem buscam aumentar-lhes a eficiência por meio da maximização da taxa de rendimento e minimização de custos operacionais. Assim, o projeto de linhas de montagem tem se tornando um problema de grande importância industrial (Rekiek et al., 2002a).

Não somente aspectos de balanceamento e layout afetam o desempenho de uma linha de montagem

mista, mas também o *mix* de produtos requisitado. O *mix* de produtos é a quantidade de cada produto a ser fabricado pela LM. No entanto, a falta de peças, indisponibilidade de máquinas, equipamentos e não conformidades de peças, entre outros, restringem a produção de alguns modelos em determinados períodos. De tal forma, alterações no *mix* de produção são necessárias para que sejam aproveitados os recursos disponíveis. Tal aproveitamento, no entanto, tipicamente se mostra de difícil operacionalização, pois restrições de capacidade impostas pelo balanceamento limitam a taxa de produção. Logo, se a LM possuir condições de adaptar-se a diversos *mix* de produtos sem ter a capacidade produtiva afetada, a utilização dos recursos disponíveis pode ser mantida.

Este artigo sugere um método para balanceamento de LM mista em cenários sujeitos a mudanças do *mix* de produtos, tornando a LM apta a atender à demanda total de produção do período independente do modelo a

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, CEP 90040-060, Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: reginato205@yahoo.com.br; anzanello@producao.ufrgs.br; alessandro.kahmann@ufrgs.br; lucasximiti@hotmail.com

ser produzido. Este balanceamento é operacionalizado por meio da heurística de balanceamento de LM mista alvo móvel, na qual as tarefas são alocadas às estações de trabalho respeitando três restrições: (i) atender à relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel; e (iii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho de forma que o tempo total na estação não exceda o tempo de ciclo. O método proposto foi aplicado em uma empresa que possui uma LM mista para 7 modelos distintos. O método aumentou a capacidade produtiva em 35% (atendendo à demanda estipulada para a LM), reduziu o tempo de atravessamento dos produtos na LM e melhorou a eficiência de linha e balanceamento por conta de uma melhor distribuição das tarefas.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 2, é apresentada a revisão bibliográfica, detalhando os tipos de linha de montagem, seus balanceamentos e soluções aplicáveis. Na seção 3, são apresentadas as etapas do método, e sua aplicação no ambiente produtivo vem na seção 4. A seção 5 apresenta as conclusões do artigo.

## 2 Referencial teórico

### 2.1 Linhas de montagem

Uma LM consiste em um arranjo produtivo formado por estações de trabalho geralmente distribuídas ao longo de um sistema de movimentação. O produto é lançado consecutivamente de estação em estação, sofrendo modificações até alcançar a última estação de montagem (Gerhardt, 2005; Becker & Scholl, 2006; Kriengkorkot & Pianthong, 2007).

As linhas de montagem que produzem produtos idênticos são chamadas de *single-model line*, ou linha unimodelo. Quando existem diferenças nos produtos, duas classificações surgem. A primeira delas é a *multi-model line* ou linha multimodelo, a qual apresenta diferenças significativas nos processos produtivos, e os diferentes produtos são fabricados em lotes maiores que uma unidade para minimizar os impactos do setup. A segunda classificação é conhecida como *mixed-model line* ou linha mista, a qual é aplicada quando há similaridade dos processos produtivos e não existe setup para ajuste do processo. Com isso, é possível lançar os produtos na linha em lotes unitários de forma aleatória (Smiderle et al., 1997; Becker & Scholl, 2006). Para cada modelo, diferentes tempos de processamento são requeridos, logo a quantidade de trabalho de um mesmo operador na mesma estação de trabalho é desigual. Casos em que o operador finaliza o trabalho antes do próximo ciclo ou não finaliza o trabalho dentro do tempo de ciclo tornam a LM desequilibrada, fazendo com que a eficiência da LM seja reduzida (Sarker & Pan, 1998). Mesmo assim, para Askin & Standridle (1993) apud

Souza et al. (2003), este sistema de produção tende a ser um dos mais eficientes, porém requer processos confiáveis e com baixa variabilidade nos tempos de processamento das estações de trabalho (no contexto prático de aplicação da sistemática proposta, baixa variabilidade refere-se a uma diferença menor do que 30% na variação do tempo entre os modelos). A Figura 1 ilustra as definições acima, em que a geometria das figuras refere-se aos diferentes produtos.

No projeto de uma LM, as principais questões a serem tratadas são: (i) definir o tempo de ciclo; (ii) determinar o número de estações de trabalho; (iii) balancear a LM; e (iv) determinar a ordem de produção dos modelos. Outro interesse de projeto da LM é minimizar o *lead time* (Sarker & Pan, 1998), o que significa reduzir a diferença de tempo entre o lançamento e a finalização do produto na LM (Marlin, 1986). Quanto menor o *lead time*, maior é o potencial de venda dos produtos (Öztürk et al., 2006). Outra premissa para o adequado funcionamento das LMs é que o tempo da estação ( $S$ ) não seja superior ao tempo de ciclo, conforme Equação 1.

$$\max t_k \leq \max S_j \leq T_c \leq \frac{1}{D} \tag{1}$$

em que  $S_j$  é tempo total da estação  $j$  ( $j=1, \dots, W$ ), representando a soma dos tempos de realização das tarefas alocadas a cada estação em unidade de tempo;  $t_k$  representa o tempo de processamento da  $k$ -ésima tarefa em unidade de tempo;  $k$  identifica a tarefa, tal que  $k=1, \dots, N$ ;  $T_c$  é o tempo de ciclo; e  $D$  é taxa de demanda do produto.

O tempo de ciclo ( $T_c$ ) é o tempo em que um produto é lançado de estação em estação, definido por meio da Equação 2.

$$T_c = \frac{\text{tempo disponível no período } p}{\text{demanda no período } p} \tag{2}$$

O número de estações de trabalho necessárias para atender à demanda varia de acordo com as restrições e configurações da LM. Segundo Peinado & Graeml (2007), o número mínimo de estações de

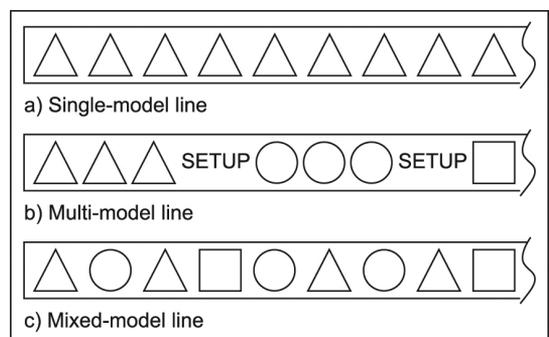


Figura 1. Tipos de linha de montagem. Fonte: Adaptado de Becker & Scholl (2006).

trabalho para LMs, contando com apenas um operador, pode ser estimado pela Equação 3.

$$\text{Número estações de trabalho} = \frac{\sum \text{tempos individuais tarefas}}{T_c} \quad (3)$$

Para balancear as tarefas, é essencial conhecer diagrama de precedência (Figura 2). Tal diagrama apresenta a ordem de execução das tarefas, respeitando requisitos tecnológicos ou características de produção do item (Boysen et al., 2007).

No diagrama de precedência, os números no interior dos círculos representam tarefas, enquanto que as flechas que unem os círculos apresentam a relação de precedência. A soma dos tempos das tarefas atribuídas a uma estação é conhecida como tempo da estação.

O tempo de cada tarefa pode ser obtido por meio de cronoanálise, dentre outros métodos. A cronoanálise é uma forma de mensurar o trabalho por meio de métodos estatísticos, permitindo calcular o tempo padrão. O tempo padrão engloba uma série de fatores, como velocidade do operador, necessidades pessoais e alívio de fadiga, dentre outros; tais fatores podem ser encontrados na literatura especializada na área. O tempo padrão de realização das tarefas também pode

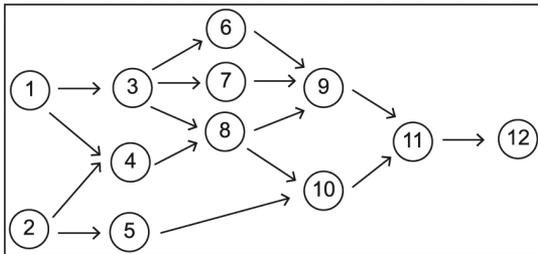


Figura 2. Exemplo de diagrama de precedência. Fonte: Adaptado de Becker & Scholl (2006).

ser determinado por meio de tempos pré-determinados (Peinado & Graeml, 2007).

Os tempos de processamento das tarefas também são utilizados para determinar a capacidade de produção de uma LM. Capacidade é a quantidade máxima de itens produzidos na LM em um determinado intervalo de tempo; para se determinar a capacidade de produção, é necessário identificar os “gargalos” da LM. Logo, a capacidade de produção é calculada em função do tempo de trabalho disponível e o tempo da estação gargalo, como na Equação 4 (Peinado & Graeml, 2007).

$$\text{Capacidade de produção} = \frac{\text{Tempo disponível no período } p}{\text{Tempo da estação gargalo}} \quad (4)$$

## 2.2 Balanceamento de linha de montagem

O *Assembly Line Balance* (ALB) ou Balanceamento de Linha de Montagem é conhecido como o problema clássico do balanceamento de LM, consistindo na alocação de tarefas em uma estação de trabalho de forma que o tempo ocioso seja minimizado e as restrições de precedência sejam atendidas (Rekiek et al., 2002b; Becker & Scholl, 2006; Kriengkorakot & Pianthong, 2007). O ALB permite alcançar o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis de modo que taxas satisfatórias de produção sejam obtidas ao mínimo custo (Wild, 1972 apud Praça, 1996). O balanceamento se faz necessário quando existem alterações do processo, como a inclusão ou exclusão de tarefas, alteração de componentes, mudanças no tempo de processamento (Farnes & Pereira, 2006) e também na implantação de novos processos.

De acordo com Ghosh & Gagnon (1991), o problema de balanceamento de linha de montagem pode ser classificado em quatro categorias, conforme a Figura 3. Tal classificação é detalhada como segue:

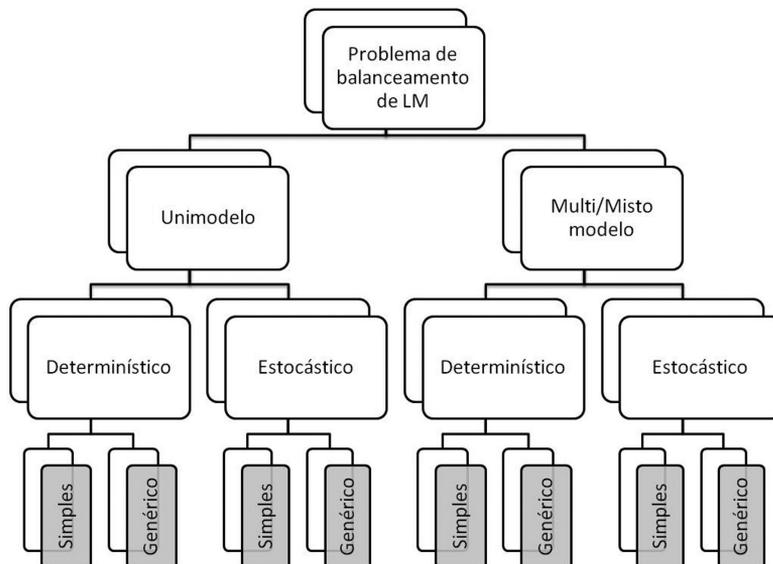


Figura 3. Classificação do problema de balanceamento de LM. Fonte: Adaptado de Ghosh & Gagnon (1991).

(i) UMD - Unimodelo determinístico: Este modelo é considerado para linhas de montagem com apenas um modelo de produto, sendo os tempos das tarefas conhecidos de forma determinística, com pequena variação do tempo das tarefas (fruto da facilidade de execução e também da motivação dos operadores) (Rekiek et al., 2002a; Becker & Scholl, 2006). Alguns critérios de eficiência devem ser otimizados, como tempo ocioso da estação e eficiência de linha, dentre outros; (ii) UMS - Unimodelo estocástico: Nesta categoria, os tempos para execução das atividades apresentam variabilidade decorrente do comportamento humano, falta de habilidade dos operadores, carência de motivação, processos complexos e equipamentos com baixa confiabilidade, dentre outros; (iii) MMD - Multi/Mista modelo determinístico: A formulação dos problemas MMD considera tempos determinísticos das tarefas, porém com a presença de diferentes produtos fabricados na mesma linha de montagem. Neste contexto, aspectos associados a sequenciamento, taxa de lançamento e tamanho de lotes se tornam importantes quando comparados a linhas unimodelo; e (iv) MMS - Multi/Misto modelo estocástico: Os tempos das tarefas são probabilísticos. Impactos decorrentes da aprendizagem, habilidade, delineação das tarefas e variação do tempo das tarefas são considerados nessa abordagem (Ghosh & Gagnon, 1991).

Outra classificação importante divide os problemas de balanceamento de linha em duas categorias: (i) problemas de balanceamento de linha de montagem simples, indicando que nenhuma restrição é relaxada; e (ii) problemas de balanceamento genéricos, em que se encaixam os problemas de balanceamento de linha que objetivam resolver problemas com características adicionais (Fernandes et al., 2008).

Conforme Van Zante-de Fokkert & De Kok (1997) apud Gerhardt (2005), a diferença fundamental entre um problema de balanceamento de linha unimodelo para um multimodelo está no diagrama de precedência. De tal forma, muitos autores, ao desenvolverem métodos para solucionar problemas de balanceamento de linha multimodelo, transformam o problema em unimodelo. Dois métodos podem ser utilizados: (i) diagrama de precedência equivalente; e (ii) ajuste no tempo de processamento das tarefas (Gerhardt, 2005).

**(i) Método do diagrama de precedência equivalente:** Thomopoulos (1970) apud Gerhardt (2005) parte do princípio no qual, em uma linha mista,

existem diversas tarefas comuns aos diferentes modelos produzidos e, conseqüentemente, uma série de relações de precedência similares. Então, a combinação dos diagramas de precedência de cada modelo individual pode ser feita pela união dos nós e das relações de precedência dos respectivos diagramas de cada modelo, conforme exemplificado nas Figuras 4 e 5.

De acordo com van Zante-de Fokkert & de Kok (1997), o balanceamento de LM Multimodelo, baseado no método do diagrama de precedência equivalente, pode ser comparado ao balanceamento de LM Unimodelo. No entanto, a alocação das tarefas às estações de trabalho é realizada com base no tempo total da duração do turno, e não no tempo de ciclo, que é utilizado como base nos balanceamentos de LM Unimodelo.

**(ii) Método do ajuste no tempo de processamento das tarefas:** Neste método, o tempo de processamento é determinado pela média ponderada da  $k$ -ésima tarefa comum aos diferentes modelos, conforme a Equação 5 (van Zante-de Fokkert & de Kok, 1997).

$$\bar{t}_k = \frac{\sum_{m=1}^M pd_m t_{k,m}}{M} \quad (5)$$

em que  $pd_m$  representa a proporção do modelo  $m$  frente aos demais modelos produzidos na LM;  $t_{k,m}$  representa o tempo de processamento para  $k$ -ésima tarefa comum aos diferentes modelos; e  $\bar{t}_k$  representa o tempo de processamento médio ponderado da  $k$ -ésima tarefa comum aos diferentes modelos. Uma vantagem deste método é que ele está baseado no tempo de ciclo, o que faz mais sentido para a organização das tarefas em uma LM (ao invés de utilizar-se o tempo total do turno de trabalho). Como desvantagens, o método não determina a sequência com que os modelos serão produzidos e não considera diferentes diagramas de precedência. De tal forma, é recomendado para balanceamentos de modelos derivados de um modelo base, em que as tarefas possuem um tempo de processamento semelhante ao do modelo base (van Zante-de Fokkert & de Kok, 1997).

Por sua vez, Becker & Scholl (2006) destacam que ambos os métodos (i) e (ii) apresentam ineficiências decorrentes da variação nos tempos de processamento das estações, os quais dependem do modelo em produção. Tais inconsistências podem gerar sobrecarga ou ociosidade de trabalho para os operadores.

Tradicionalmente, dois indicadores são utilizados para avaliar a qualidade de balanceamento da LM (Driscoll & Thilakawardana, 2001): *Balance Delay* (Atraso de balanceamento), que representa um

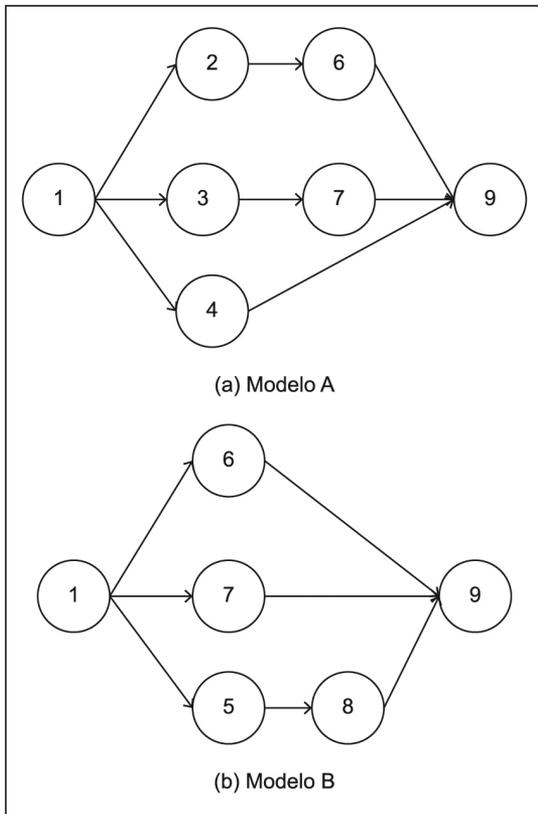


Figura 4. Diagrama de precedência para modelo A (a) e modelo B (b). Fonte: Adaptado de Gerhardt (2005).

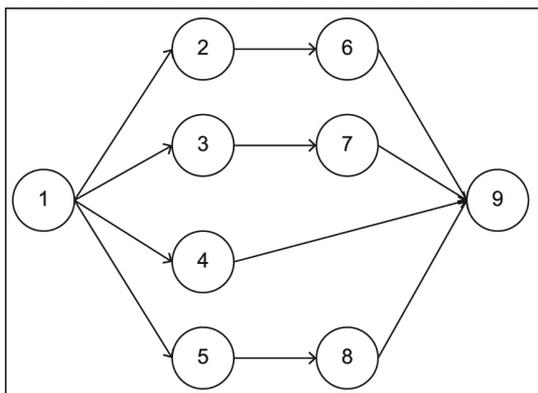


Figura 5. Diagrama de precedência equivalente dos modelos A e B. Fonte: Adaptado de Gerhardt (2005).

percentual de tempo em que a LM permanece ociosa; e *Smoothness Index* (Índice de suavidade), que mede a diferença entre o tempo total máximo de trabalho entre as estações e os tempos totais de trabalho das demais estações (Gerhardt, 2005).

Driscoll & Thilakawardana (2001) introduzem formas alternativas para avaliar o balanceamento da LM. O *Line efficiency* ou Eficiência de linha (EL) quantifica a utilização da LM e possui aspectos

de avaliação econômica; já o *Balance efficiency* ou Eficiência de balanceamento (EB) quantifica a qualidade de alocação das tarefas às estações de trabalho, o que pode consequentemente ocasionar um incremento da taxa de produção. Ambos os indicadores são adimensionais e representados por meio de uma escala de 0% a 100%, em que 100% representa o melhor resultado. Eles são calculados conforme Equações 6 e 7, respectivamente.

$$EL = \frac{\sum_{k=1}^N t^k}{W \times T_c} \times 100 \tag{6}$$

$$EB = \left[ 1 - \frac{\sum_{j=1}^W |S_j - S_{av}|}{W \times S_{av}} \right] \times 100 \tag{7}$$

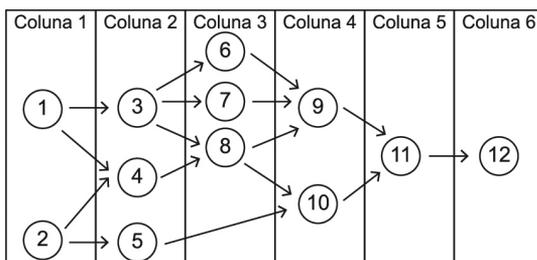
em que  $S_{av}$  representa o tempo médio das estações de trabalho e  $W$  o número de estações de trabalho.

### 2.3 Soluções para ALB

Tendo em vista que o problema ALB pode figurar na categoria *NP-hard* de otimização combinatória, diversas pesquisas têm desenvolvido aproximações computacionais ou heurísticas (Ghosh & Gagnon, 1991). Ghosh & Gagnon (1991) classificam os métodos para balanceamento de ALB da seguinte forma: (i) *Rank and Assign Methods*: Nestes métodos, as tarefas são ordenadas com base em critérios ou regras de prioridade e designadas às estações, apoiando-se em uma ordem que não viole a relação de precedência e as restrições do tempo de ciclo; (ii) *Tree Search Methods*: Estes métodos são essencialmente de programação inteira, apoiando-se no método *Branch & Bound*. As abordagens nesta categoria também podem ser denominadas como métodos enumerativos; (iii) *Random Sampling Methods*: Estes métodos designam as tarefas aleatoriamente às estações de trabalho, atendendo à restrição de precedência e tempo de ciclo; e (iv) *Outros métodos*: Métodos de agregação (elementos de tarefas são agrupados em tarefas compostas), Aproximação Sucessiva (um algoritmo ótimo é aplicado sucessivamente como uma heurística em uma versão mais simples do problema), e Métodos de Aprendizagem (baseados na premissa de que a experiência adquirida na resolução de problemas menores é usada para resolver problemas maiores).

Cristo (2010), Ponnambalam et al. (1999) e Chow (1990) destacam as seguintes heurísticas para solução de problemas ALB: *Rank positional weight* ou Método dos pesos posicionais, *Kilbridge and Wester's method* ou Método de Kilbridge e Wester, *Largest set ruler* ou Regra do maior candidato. Os fundamentos das heurísticas acima são agora apresentados.

- Método dos pesos posicionais (RPW-*Rank Positional Weight*): Este método foi introduzido por Helgeson e Birnie nos anos 60, tendo gerado soluções satisfatórias e rápidas segundo Boctor (1995) apud Praça (1996). Sua operacionalização consiste no cálculo do peso posicional de cada tarefa de acordo com o diagrama de precedência. O peso é a soma do tempo da tarefa com o tempo das tarefas que a antecedem. Na sequência, os pesos posicionais devem ser organizados em ordem decrescente, e as tarefas atribuídas às estações de trabalho de acordo com a ordem do peso posicional, respeitando-se as restrições de precedência. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados em Chow (1990).
- Método de Kilbridge & Wester (KWM): Este método seleciona os elementos de trabalho para designar as estações de acordo com a coluna de posição do diagrama de precedência, conforme a Figura 6. Na sequência, as tarefas são organizadas em ordem decrescente de tempo de processamento. Por fim, as tarefas são alocadas às estações de trabalho de acordo com tal ordem, desta forma assegurando que os maiores elementos sejam alocados primeiro e aumentando a chance do tempo de cada estação ficar mais próximo do tempo de ciclo (Gerhardt & Fogliatto, 2004).
- Regra do maior candidato (LCR – *Largest Candidate Rule*): Esta heurística permite obter resultados em menor tempo do que o método dos pesos posicionais. Inicialmente, deve-se listar as tarefas em ordem decrescente de tempo de processamento; em seguida, as tarefas devem ser atribuídas às estações de trabalho de acordo com a ordem da lista sem violar nenhuma restrição de precedência ou ultrapassar o tempo de ciclo (Praça, 1996).



**Figura 6.** Diagrama de precedência dividido em colunas pelo método Kilbridge e Wester. Fonte: Adaptado de Gerhardt & Fogliatto (2004).

### 3 Método

Esta seção propõe uma nova heurística de balanceamento para LM mista intitulada RPW alvo móvel (RPW-AVM), a qual apoia-se na heurística dos pesos posicionais RPW proposta originalmente por Helgeson e Birnie. Tal proposição foca-se em um ambiente de produção passível de mudanças no *mix* de produtos, as quais ocasionam desbalanceamentos nas estações de trabalho e geram restrições de capacidade produtiva na LM, tornando-a incapaz de atender à demanda de produção requerida.

A heurística permite que a LM atenda à demanda de produção caracterizada por variadas composições do *mix* de produtos, sem necessidade de intervenções para ajuste de balanceamento ou ações de sequenciamento para lançamento dos produtos. Para isso é necessário que o tempo de cada modelo em todas as estações de trabalho seja inferior ao tempo de ciclo da LM. Além disso, a heurística proposta inova no formato de distribuição das tarefas às estações de trabalho, propondo um alvo móvel que objetiva aprimorar a distribuição das tarefas entre as estações quando comparada à original RPW. A heurística proposta é agora detalhada.

#### 3.1 Operacionalização do RPW-AVM

O RPW original é fundamentalmente orientado por um tempo de ciclo pré-estabelecido, logo, pode-se assumir que o alvo limitante da quantidade de tarefas alocáveis a uma determinada estação de trabalho é o tempo de ciclo, o qual é fixo. Desta forma, a alocação das tarefas às estações de trabalho pode apresentar um desequilíbrio acumulado na primeira estação de trabalho, a qual tipicamente acarreta perdas significativas à LM. Propõe-se então uma modificação neste alvo, o qual passa a ser móvel (e denominado Alvo Móvel - AVM).

O AVM é calculado para cada estação de trabalho e depende da quantidade de estações de trabalho a serem balanceadas. Ele tem a função de melhorar a distribuição das tarefas entre as estações de trabalho ainda não balanceadas de acordo com o tempo das tarefas ainda não alocadas. A cada troca da estação de trabalho, o alvo é recalculado para cada modelo (por isso móvel), e então identificada a condição que permite alocação das tarefas restantes do produto com maior tempo de operações ainda não alocadas. Em outras palavras, o AVM permite que, para cada troca de estação de trabalho, o conteúdo total de trabalho do modelo em análise seja distribuído de forma equilibrada entre as estações restantes. As Figuras 7 e 8 ilustram o RPW sem alvo móvel e com alvo móvel (AVM), respectivamente. O AVM gera um melhor índice de suavidade para LM e, por consequência, benefícios de caráter ergonômico e produtivo.

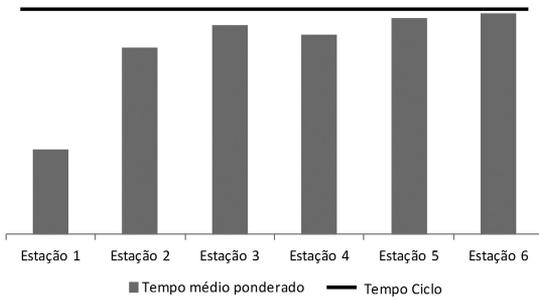


Figura 7. Balanceamento com heurística RPW sem AVM. Fonte: Elaborado pelo autor.

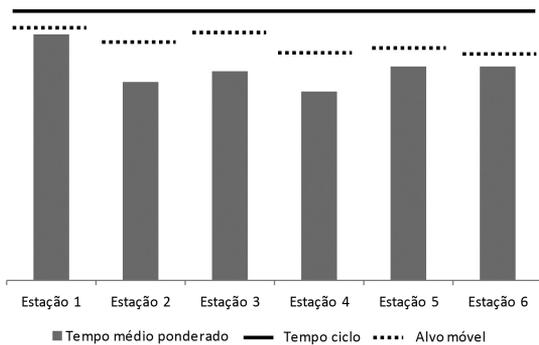


Figura 8. Balanceamento com heurística RPW com AVM. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência são apresentados os passos para operacionalização do RPW-AVM.

**Passo 1:** Definir o diagrama/matriz de precedência equivalente de todos os modelos;

**Passo 2:** Diferentemente do RPW em LM Unimodelo, o RPW-AVM trata de um balanceamento em uma LM com mais de um modelo de produto, sendo que cada modelo possui seu próprio tempo de processamento das tarefas. Assim, para obter-se o tempo médio de processamento das tarefas comuns aos diferentes modelos, é preciso definir a proporção de cada modelo a ser produzido pela Equação 8

$$pd_m = \frac{d_m}{D} \tag{8}$$

em que  $d_m$  é a demanda do produto  $m$  no período  $p$ , tal que  $m=1, \dots, M$ ; e  $D$ , a soma da demanda de todos os modelos para o período  $p$ . O histórico de demanda dos produtos ou o plano de produção são fontes de consulta para definição do número de produtos do modelo  $m$ .

**Passo 3:** Calcular o tempo de ciclo ( $T_c$ ) com base na demanda total de produção a ser atendida pela Equação 2;

**Passo 4:** Conforme comentado anteriormente, o RPW-AVM apoia-se em tempos de um produto equivalente da LM Mista. Logo, para a alocação das tarefas no RPW-AVM, utilizar o tempo médio ponderado ( $\bar{t}_k$ ) e o tempo total médio ponderado

da estação ( $\bar{S}_j$ ), calculados pelas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$\bar{t}_k = \sum_{m=1}^M pd_m t_{k,m} \tag{9}$$

$$\bar{S}_j = \sum_{k \in j} \bar{t}_k \tag{10}$$

em que  $t_{k,m}$  representa o tempo de processamento da tarefa  $k$  no modelo  $m$  e  $pd_m$  a proporção do modelo  $m$ .

**Passo 5:** Calcular o  $RPW$  de cada tarefa somando o  $\bar{t}_k$  aos tempos de processamento de todas as tarefas precedentes do diagrama de precedência equivalente;

**Passo 6:** Ordenar as tarefas em ordem decrescente de  $RPW$ ;

**Passo 7:** Calcular o número mínimo de estações de trabalho para balanceamento da LM ( $MinW$ ) e então definir a última estação de trabalho ( $W=MinW$ ) baseado nas Equações 11 e 12, em que  $CTT_m$  representa a carga total de trabalho do modelo  $m$ .

$$CTT_m = \sum_{k=1}^N t_{k,m} \tag{11}$$

$$MinW = \frac{CTT_m}{T_c}, m = 1, \dots, M \tag{12}$$

**Passo 8:** Definir  $j=W$ ;

**Passo 9:** Calcular o alvo móvel da última estação de trabalho para todos os modelos ( $AVM_{j,m=1, \dots, M}$ ). O AVM é necessário para cada modelo de produto e deve ser recalculado a cada nova estação de trabalho balanceada durante a aplicação do RPW-AVM. O alvo móvel da  $j$ -ésima estação de trabalho para o modelo  $m$  ( $AVM_{j,m}$ ) é calculado pela Equação 13, baseado no resíduo da carga de trabalho ainda não alocada dividido pelo total de estações de trabalho ainda não balanceadas para o modelo  $m$ . A Equação 14 define a carga total alocada na estação  $j$  do modelo  $m$  ( $CTA_{j,m}$ ).

$$CTA_{j,m} = CTA_{j+1,m} + S_{j,m} \tag{13}$$

$$AVM_{j,m} = \frac{CTT_m - CTA_{j+1,m}}{MinW - (MinW - j)} \tag{14}$$

**Passo 10:** Alocar a tarefa de maior  $RPW$  à estação  $j$ , respeitando a relação de precedência do diagrama de precedência equivalente, bem como o tempo total médio ponderado da estação [de modo que ele não exceda o maior AVM ( $\bar{S}_j \leq (maiorAVM_{j,m=1, \dots, M})$ )]; além disso, atentar para que o tempo total do modelo  $m$  na estação não exceda o tempo de ciclo ( $S_{j,m=1, \dots, M} \leq T_c$ );

**Passo 11:** Repetir o processo designando tarefas às estações até que não existam tarefas viáveis para pelo menos um dos modelos;

**Passo 12:** Definir ( $j=j-1$ ) e recalculando  $AVM_{j,m=1, \dots, M}$ ;

**Passo 13:** Validar a inequação  $((S_{j,m=1,...M} \leq T_c)$ ; se atendida, avançar para o próximo passo; caso contrário, retornar para o passo 8, redefinir  $((S_{j,m=1,...M} \leq T_c)$  e reiniciar o processo de alocação das tarefas; e

**Passo 14:** Repetir os passos 10 a 13 até que todas as tarefas estejam alocadas.

### 3.2 Avaliação do balanceamento gerado pelo RPW-AVM

A análise do balanceamento resultante da heurística RPW-AVM apoia-se em indicadores estáticos, ou seja, sem uso de métodos de simulação dinâmica. Assim, em alguns casos, eles são calculados na posição gargalo ( $g$ ) da LM, na qual a produção é limitada de acordo com Peinado & Graeml (2007). Os indicadores são: (i) quantidade de estações de trabalho da LM; (ii) capacidade na situação gargalo ( $Cap_g$ ) [ver Equação 15]; e (iii) tempo de atravessamento estimado na posição gargalo ( $TAestim_g$ ); (iv) Eficiência de linha na situação gargalo ( $EF_g$ ) e (v) Eficiência de balanceamento ( $EB$ ).

$$Cap_g = \frac{\text{tempo disponível no período } p}{T_g} \tag{15}$$

em que  $T_g$  representa o tempo de processamento gargalo, definido pelo maior  $S_{j=1,...W, m=1,...M}$ .

Da mesma forma, o tempo de atravessamento estimado na situação gargalo ( $TAestim_g$ ), apresentado na Equação 16, também utiliza o tempo de processamento gargalo na sua obtenção.

$$TAestim_g = (\text{Quant. estações de trabalho} + A) \times T_g \tag{16}$$

sendo  $A$  o número de produtos não alocados nas estações de trabalho, mas localizados entre o início e o final da LM (por exemplo, buffers).

A Eficiência de linha na situação gargalo ( $ELg$ ) é estimada pela Equação 17, ao passo que a Eficiência de balanceamento ( $EB$ ) é obtida pela Equação 18.

$$EL_g = \frac{\sum_{k=1}^N T_k}{W \times T_g} \times 100 \tag{17}$$

$$EB = \left[ 1 - \frac{\sum_{j=1}^W |S_j - S_{av}|}{W \times S_{av}} \right] \times 100 \tag{18}$$

## 4 Resultados e discussão

O método foi aplicado em uma LM de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas do tipo puxada com lote unitário de fabricação. A LM está

organizada em cinco estações de trabalho; em cada estação existe um operador. Além disso, entre as estações de trabalho existe um buffer unitário que tem como função absorver o tempo de processamento excedente para alguns modelos em relação ao tempo de ciclo. A Figura 9 ilustra o fluxo da LM atual, com o número das estações de trabalho marcado no interior dos blocos e os buffers marcados com “x” no centro. Todos os procedimentos computacionais foram realizados em planilha eletrônica.

A LM em estudo fabrica sete modelos de produtos, denominados CL, O, MX, CB, ATI, ATU e CH, que são montados por até 29 diferentes tarefas, dependendo do modelo. Na Tabela 1, estão apresentados os modelos de produtos, as tarefas de cada estação de trabalho e a relação de precedência.

A carga de trabalho da LM atual é apresentada na Figura 10, com os tempos (em minutos) por estação de trabalho e por modelo.

A demanda atual planejada da LM é de 37 produtos por turno, os quais são lançados aleatoriamente em produção (sem sequenciamento estruturado). Cada turno é composto por 480 minutos de tempo para produção, excluindo paradas para reunião, almoço e intervalos.

Como pode ser visto na Figura 10, apenas as estações 3 e 5 possuem capacidade de 37 produtos/turno para qualquer produto, visto que o tempo de todos os modelos de produto é inferior ao tempo de ciclo. Atualmente, a capacidade da LM na situação gargalo é de 28 produtos por turno.

Na Tabela 2, apresenta-se o *mix* de produtos utilizando o plano de produção da empresa e a proporção de cada modelo calculado a partir da Equação 8.

Em seguida, foi elaborada a matriz de precedência equivalente a todos os modelos, conforme a Figura 11.

Baseado na demanda total de 37 produtos por turno, calculou-se o tempo de ciclo ( $T_c$ ) por meio da Equação 1, o qual resultou em 12,97 minutos.

A Tabela 3 apresenta o tempo de processamento médio ponderado para cada uma das tarefas e o *RPW* relativo a cada tarefa, calculado pela Equação 9.

Depois de ordenar decrescentemente as tarefas de acordo com o valor do *RPW*, determinou-se o número da última estação de trabalho ( $W$ ). Para isso, calculou-se o número mínimo de estações de trabalho para cada modelo (Equação 12), e então definiu-se como pior caso o modelo com maior *MinW* (neste caso, o modelo ATU, conforme a Tabela 4).

Na sequência, foram executados os passos 9 a 14 do método apresentado na seção 3. Os valores de estão apresentados na Tabela 5; destaca-se em negrito o

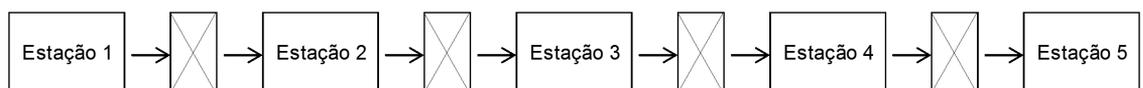


Figura 9. Fluxograma da LM com balanceamento atual.

**Tabela 1.** Tarefas executadas na LM para cada modelo.

Estação trabalho	Tarefa	Descrição	Precedência	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
1	1	Introduzir pré-montagem	-	X	X	X	X	X	X	X
1	2	Pré-montar servostato	1	X	X		X	X	X	X
1	3	Montar Coluna de Direção	1		X	X	X	X	X	X
1	4	Pré-montar reservatório	1	X	X		X	X	X	X
2	5	Pré-montar pedal do acelerador	1	X	X	X	X	X	X	
2	6	Posicionar dispositivo de pré-montagem no posto	2;3;4;5	X	X	X	X	X	X	X
2	7	Pré-montar estrutura do console	6	X	X	X	X	X	X	X
2	8	Pré-montar servostato na coluna	7	X	X		X	X	X	X
2	9	Pré-montar cabo da embreagem	7	X	X	X	X	X	X	
2	10	Pré-montar suporte dos pedais de freio	7	X	X		X	X	X	
2	11	Montar Válvula Freio POWERFILL - 40Km	7							X
2	12	Montar válvula do freio e reservatório	10	X	X		X	X	X	
2	13	Pré-montar sensor do freio	12	X	X		X	X	X	
2	14	Montar interruptor bloqueio do diferencial	7	X	X	X	X	X	X	X
2	15	Montar pedal da embreagem	9	X	X	X	X	X	X	
3	16	Montar pedal do acelerador	7	X	X	X	X	X	X	X
3	17	Pré-montar tampões das linhas freio	11;12	X	X	X	X	X	X	X
3	18	Montar Coluna de Direção no console	8		X	X	X	X	X	X
3	19	Montar Mangueiras Hidráulicas de Direção	18	X	X	X	X	X	X	X
4	20	Montar mangueiras do servostato	8	X	X	X	X	X	X	X
4	21	Montar mangueira e tubo de retorno	20;18	X	X		X	X	X	X
4	22	Montagem da abraçadeira das mangueiras do servostato	21	X	X	X	X	X	X	X
4	23	Montar volante no console	18	X	X	X	X	X	X	X
4	24	Posicionar dispositivo na posição horizontal	21	X	X	X	X	X	X	X
5	25	Montar chapa firewall	24	X	X	X	X	X	X	X
5	26	Montar porcas clips do firewall	25	X	X	X	X	X	X	X
5	27	Vedar parte externa do console	26			X	X	X	X	X
5	28	Posicionar dispositivo na posição vertical	27	X	X	X	X	X	X	X
5	29	Teste final	Todas	X	X	X	X	X	X	X

**Tabela 2.** Definição do mix de produção.

	MODELO DE PRODUTO							$\Sigma$
	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH	
<b>MIX</b> (quant. por modelo)	0,8	1,2	0,4	12,5	1,7	20,0	0,4	37,0
<b>Proporção do modelo</b>	2%	3%	1%	34%	4%	54%	1%	100%

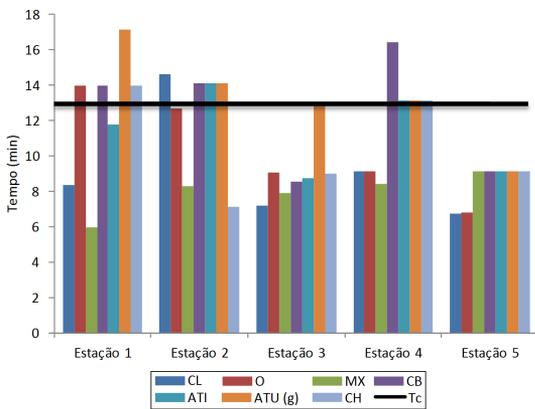


Figura 10. Balanceamento LM atual.

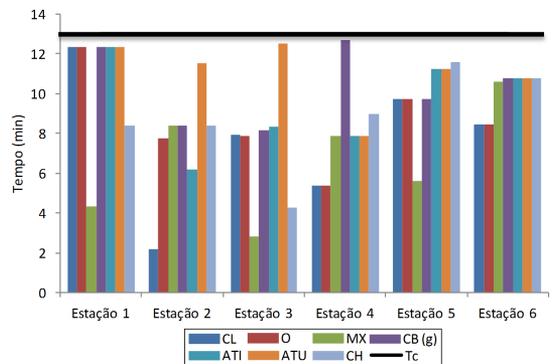


Figura 12. Novo balanceamento da LM.

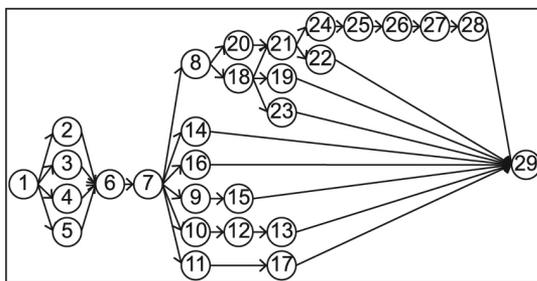


Figura 11. Diagrama de precedência equivalente.

valor do de acordo com  $j$  para alocação das tarefas às estações de trabalho.

O novo balanceamento da LM é apresentado na Figura 12, com os tempos por estação de trabalho e por modelo.

Pode-se observar, na Figura 12, que todas as estações de trabalho possuem tempo de processamento menor que o tempo de ciclo. Desta forma, o novo balanceamento proporcionou à LM condições de produzir 37 produtos/turno, independentemente da proporção ou tipo de produto em manufatura. Um sumário da alocação das tarefas às estações de trabalho é apresentado no Quadro 1. Como pode ser visto, houve um incremento de uma estação de trabalho em relação ao balanceamento atual; no entanto, todas as estações de trabalho possuem tempo de processamento inferior ao tempo de ciclo, o que assegura capacidade produtiva de 37 produtos/turno para qualquer modelo.

Outra melhoria observada refere-se aos buffers, os quais passam a ser dispensáveis por não mais existir tempo de processamento excedente em relação ao tempo de ciclo para nenhum modelo. Assim, a quantidade de produtos na nova LM não superará o número de estações de trabalho (6); tal situação difere do balanceamento atual, que permite a existência de até 9 produtos na LM. Logo, percebe-se uma redução de 33% de inventário em processo. A Tabela 6 apresenta as variáveis e os indicadores utilizados na avaliação

Quadro 1. Alocação das tarefas nas estações de trabalho para o balanceamento da LM.

Estação de trabalho	Tarefa
1	1; 2; 4; 5
2	3; 6; 7; 14
3	8; 9; 10; 12; 16; 18
4	11; 15; 20; 23
5	13; 17; 19; 21
6	22; 24; 25; 26; 27; 28; 29

do estado atual da LM em comparação com o novo balanceamento.

Os resultados apresentados pela Tabela 6 indicam melhoras significativas sob o ponto de vista dos especialistas da empresa. A capacidade de 37 produtos/turno superou o índice de capacidade do estado atual em 35% para o modelo gargalo da LM. Este incremento decorre da nova distribuição das tarefas. Além disso, o novo balanceamento permite o lançamento dos produtos na LM sem sequência determinada, o que confere ao sistema grande flexibilidade.

O tempo de atravessamento estimado na situação gargalo foi reduzido em 50%, o que representa que um produto pode chegar ao cliente 78 minutos mais rápido do que atualmente. Por fim, a Eficiência de linha na situação gargalo apresentou uma melhora de 32% por influência da redução do tempo de processamento da estação gargalo (devido ao novo balanceamento). A Eficiência de balanceamento melhorou 11% (passando de 85% para 94%), resultando em um melhor equilíbrio de distribuição das tarefas entre as estações de trabalho em relação ao balanceamento atual.

Por fim, realizou-se uma comparação entre o balanceamento resultante do RPW-AVM diante do RPW tradicional aplicado em LM-Mista, conforme a Tabela 7. A premissa de flexibilidade para uma demanda de 37 produtos por turno não foi atendida para o caso do balanceamento proposto pelo RPW tradicional, visto que capacidade máxima na situação gargalo foi de 31,4 produtos/turno. Além disso, uma

**Tabela 3.** Tempo de processamento médio ponderado e RPW das tarefas.

Tarefa	Proporção do modelo Descrição	MODELO DE PRODUTO							$\bar{t}_k$	RPW	
		CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH			
		2%	3%	1%	34%	4%	54%	1%			
1	Introduzir pré-montagem	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
2	Pré-montar servostato	4,49	4,49	0,00	4,49	4,49	4,49	4,49	4,44	4,81	4,81
3	Montar Coluna de Direção	0,00	5,59	5,59	5,59	3,40	8,77	5,59	7,08	7,44	7,44
4	Pré-montar reservatório	3,50	3,50	0,00	3,50	3,50	3,50	3,50	3,46	3,82	3,82
5	Pré-montar pedal do acelerador	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	0,00	3,94	4,31	4,31
6	Posicionar dispositivo de pré-montagem no posto	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	20,28	20,28
7	Pré-montar estrutura do console	0,65	0,65	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,22	21,50	21,50
8	Pré-montar servostato na coluna	3,42	1,47	0,00	2,29	2,29	2,29	2,29	2,26	23,77	23,77
9	Pré-montar cabo da embreagem	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,00	0,55	22,05	22,05
10	Pré-montar suporte dos pedais de freio	0,96	0,96	0,00	0,96	0,96	0,96	0,00	0,94	22,44	22,44
11	Montar Válvula Freio POWERFILL - 40Km	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08	0,02	21,53	21,53
12	Montar válvula do freio e reservatório	2,08	2,08	0,00	2,08	2,08	2,08	0,00	2,03	24,47	24,47
13	Pré-montar sensor do freio	0,47	0,47	0,00	0,47	0,47	0,47	0,00	0,46	24,93	24,93
14	Montar interruptor bloqueio do diferencial	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	22,03	22,03
15	Montar pedal da embreagem	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,00	0,96	23,01	23,01
16	Montar pedal do acelerador	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,47	0,93	22,43	22,43
17	Pré-montar tampões das linhas freio	0,80	0,80	0,16	0,80	0,80	0,80	1,58	0,80	25,30	25,30
18	Montar Coluna de Direção no console	0,00	1,89	1,35	1,35	1,52	5,68	1,52	3,68	27,45	27,45
19	Montar Mangueiras Hidráulicas de Direção	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	32,89	32,89
20	Montar mangueiras do servostato	3,56	3,56	6,07	10,88	6,07	6,07	6,07	7,55	31,31	31,31
21	Montar mangueira e tubo de retorno	3,03	3,03	0,00	3,03	4,55	4,55	4,55	3,90	38,89	38,89
22	Montagem da abraçadeira das mangueiras do servostato	0,99	0,99	0,82	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	39,88	39,88
23	Montar volante no console	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	28,29	28,29
24	Posicionar dispositivo na posição horizontal	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	39,58	39,58
25	Montar chapa firewal	2,14	2,18	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,05	41,94	41,94
26	Montar porcas clips do firewall	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	42,49	42,49
27	Vedar parte externa do console	0,00	0,00	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,31	43,80	43,80
28	Posicionar dispositivo na posição vertical	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	44,76	44,76
29	Teste final	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	63,03	63,03

Tabela 4. Cálculo do W.

	MODELO DE PRODUTO						
	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
$CTT_m$	46,0	51,6	39,6	62,1	56,8	66,3	52,3
$T_c$	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97
$MinW$	3,55	3,98	3,06	4,79	4,38	5,11	4,03
$W=j$				6			
				6			

Tabela 5. Resultados do  $AVM_{j,m}$ .

		MODELO DE PRODUTO						
		CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
$j = 6$	$MinW$	6	6	6	6	6	6	6
	$CTT_m$	46,0	51,6	39,6	62,1	56,8	66,3	52,3
	$CTA_{j+1}$	0	0	0	0	0	0	0
$j = 5$	$AVM_m$	7,7	8,6	6,6	10,3	9,5	11,0	8,7
	$CTA_{j+1}$	8,4	8,5	10,6	10,8	10,8	10,8	10,8
$j = 4$	$AVM_m$	7,5	8,6	5,8	10,3	9,2	11,1	8,3
	$CTA_{j+1}$	18,2	18,2	16,2	20,5	22,0	22,0	22,3
$j = 3$	$AVM_m$	7,0	8,3	5,9	10,4	8,7	11,1	7,5
	$CTA_{j+1}$	23,5	23,6	24,1	33,2	29,9	29,9	31,3
$j = 2$	$AVM_m$	7,5	9,3	5,2	9,6	9,0	12,1	7,0
	$CTA_{j+1}$	31,5	31,5	26,9	41,4	38,2	42,4	35,6
$j = 1$	$AVM_m$	7,3	10,1	6,4	10,4	9,3	11,9	8,4
	$CTA_{j+1}$	33,6	39,2	35,3	49,7	44,4	53,9	44,0
	$AVM_m$	12,3	12,3	4,4	12,3	12,3	12,3	8,4

Tabela 6. Variáveis e Indicadores (Atual x RPW-AVM).

		Balanceamento atual	Novo balanceamento
		<b>VARIÁVEIS</b>	
	Tempo disponível no período $p$ (min)	480	480
	Demanda (pçs)	37	37
	Tempo de ciclo (min)	12,97	12,97
	Quantidade de buffers	4	0
	Modelo gargalo	ATU	CB
	$T_g$ (min)	17,12	12,69
	$CTT_g$ (min)	66,3	62,1
	Quantidade de estações de trabalho da LM	5	6
<b>INDICADORES</b>			
	$Cap_g$ (pçs)	28,0	37,8
	$TAestim_g$ (min)	154,08	76,14
	Eficiência de linha na situação gargalo ( $EL_g$ )	63%	83%
	Eficiência de balanceamento (EB)	85%	94%

**Tabela 7.** Variáveis e Indicadores (RPW-AVM x RPW).

		Novo balanceamento RPW-AVM	Novo balanceamento RPW
<b>VARIÁVEIS</b>	<b>Tempo disponível no período <math>p</math> (min)</b>	480	480
	<b>Demanda (<math>pçs</math>)</b>	37	37
	<b>Tempo de ciclo (min)</b>	12,97	12,97
	<b>Quantidade de buffers</b>	0	0
	<b>Modelo gargalo</b>	CB	CH
	<b><math>T_g</math> (min)</b>	12,69	15,28
<b>INDICADORES</b>	<b><math>CTT_g</math> (min)</b>	62,1	52,32
	<b>Quantidade de estações de trabalho da LM</b>	6	5
	<b><math>Cap_g</math> (<math>pçs</math>)</b>	37,8	31,4
	<b><math>TAestim_g</math> (min)</b>	76,14	76,38
	<b>Eficiência de linha na situação gargalo (<math>EL_g</math>)</b>	83%	82%
	<b>Eficiência de balanceamento (<math>EB</math>)</b>	94%	98%

redução na eficiência de linha na situação gargalo foi evidenciada, apesar da redução de uma estação de trabalho ter ocorrido, aliada ao incremento na eficiência de balanceamento de 4%.

## 5 Conclusão

Este artigo apresentou uma solução para o problema de balanceamento de LM mista originado pela mudança do *mix* de produtos. A heurística proposta tem o objetivo de reduzir as restrições de capacidade produtiva nas estações de trabalho dentro de uma demanda total definida para variados *mix*, sem a necessidade de sequenciamento para lançamentos dos produtos na LM. Para isso, a proposta de heurística de balanceamento LM mista alvo móvel (RPW-AVM) é fundamentada em três restrições: (i) atender à relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho de forma que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel; e (iii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total do modelo  $m$  na estação não exceda o tempo de ciclo.

A heurística RPW-AVM foi aplicada na LM de uma empresa do segmento agrícola. A LM analisada atualmente está organizada em cinco diferentes estações de trabalho em que são fabricados sete modelos de produtos (CL, O, MX, CB, ATI, ATU e CH), montados por até 29 diferentes tarefas. No entanto, a capacidade na situação gargalo é de 28 produtos/turno, não satisfazendo a demanda de 37 produtos/turno. Quando aplicada no sistema em questão, a heurística RPW-AVM permitiu um incremento da capacidade de produção para o modelo gargalo em 35% por consequência da melhor distribuição das tarefas decorrente do aumento da quantidade de estações de trabalho (de 5 para 6). Também foi confirmada a dispensabilidade do lançamento sequenciado

dos produtos na LM. O tempo de atravessamento reduziu significativamente na situação gargalo da LM, demandando 78 minutos a menos do que o arranjo antigo. A Eficiência de linha na situação gargalo apresentou melhora de 32%, ao passo que a Eficiência de balanceamento aumentou em 11% por conta da melhor distribuição das tarefas entre as estações de trabalho. Por fim, uma comparação da heurística RPW-AVM e RPW tradicional aplicada à LM Mista foi realizada. Observou-se melhora na eficiência de balanceamento em 4%, com a redução de uma estação de trabalho. No entanto, a condição de flexibilidade não foi suportada pelo RPW tradicional, concluindo-se que apenas o RPW-AVM atende às premissas colocadas neste cenário.

Sugere-se para desenvolvimentos futuros a avaliação do balanceamento proposto pela heurística por meio de simulação dinâmica com auxílio de software computacional; pretende-se identificar pontos não cobertos pela análise atual, como o comportamento da Eficiência de linha de acordo com a variação do *mix* de produtos. Sugere-se ainda a adaptação para balanceamento de LM Unimodelo utilizando o conceito do alvo móvel aqui proposto.

## Referências

- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>.
- Chow, W. M. (1990). *Assembly line design: methodology and applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.

- Cristo, R. L. (2010). *Balanceamento de linhas de montagem com uso de algoritmo genético para o caso de linhas simples e extensões* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Driscoll, J., & Thilakawardana, D. (2001). The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 17(1-2), 81-86. [http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845\(00\)00040-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845(00)00040-5).
- Farnes, V. C. F., & Pereira, N. A. (2006). Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. *Gestão da Produção*, 2, 125-136.
- Fernandes, F. C. F., Godinho, F. M., Cutigi, R. A., & Guiguet, A. M. A. (2008). O uso de programação inteira 0-1 para o balanceamento de linhas de montagem: modelagem, estudo de caso e avaliação. *Produção*, 18(2), 210-221.
- Gerhardt, M. P. (2005). *Sistemática para aplicação de procedimento de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Gerhardt, M. P., & Fogliatto, F. S. (2004). Otimização do balanceamento de linhas de montagem multi-modelo para produção em pequenos lotes. In *Anais do XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (pp. 466-473). Florianópolis: ABEPRO.
- Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1991). Advances in manufacturing assembly systems. *Control and Dynamic Systems*, 46, 355-405. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-012746-7.50014-6>.
- Kriengkarakot, N., & Pianthong, N. (2007). The assembly line balancing problem. *KKU Engineering Journal*, 34(2), 133-140.
- Leone, G., & Rahn, R. D. (2004). *Fundamentos de la manufactura de flujo*. Boulder: Flow Publishing.
- Marlin, P. G. (1986). Manufacturing lead time accuracy. *Journal of Operations Management*, 6(2), 179-202. [http://dx.doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90024-0](http://dx.doi.org/10.1016/0272-6963(86)90024-0).
- Mendes, A. R., Ramos, A. L., Simaria, A. S., & Vilarinho, P. M. (2005). Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 49(3), 413-431. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2005.07.003>.
- Öztürk, A., Kayaligil, S., & Özdemirel, N. E. (2006). Manufacturing lead time estimation using data mining. *European Journal of Operational Research*, 173(2), 683-700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.015>.
- Peinado, J., & Graeml, A. R. (2007). *Administração da produção: operações industriais e de serviços*. Curitiba: UNICENP.
- Ponnambalam, S. G., Aravindan, P., & Naidu, G. M. (1999). A comparative evaluation of assembly line balancing heuristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8), 577-586. <http://dx.doi.org/10.1007/s001700050105>.
- Praça, I. C. C. S. (1996). *Balanceamento e simulação de linhas de fabrico manuais* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Rekiek, B., Delchambre, A., Dolgui, A., & Bracteu, A. (2002a). Assembly line design: a survey. In *Proceedings of the XV Triennial World Congress* (pp. 1-12). Barcelona, Spain: IFAC.
- Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., & Bratcu, A. (2002b). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, 26(2), 163-174. [http://dx.doi.org/10.1016/S1367-5788\(02\)00027-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1367-5788(02)00027-5).
- Sarker, B. R., & Pan, H. (1998). Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers & Industrial Engineering*, 34(3), 609-628. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00320-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00320-3).
- Smiderle, C. D., Vito, S. L., & Fries, C. E. (1997). A busca da eficiência e a importância do balanceamento de linhas de produção. In *Anais do XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (pp. 1-8). Gramado: ABEPRO.
- Souza, M. C. F., Yamada, M. C., Porto, A. J. V., & Gonçalves, E. V., Fo. (2003). Análise de alocação de mão-de-obra em linhas de montagem multimodelo de produtos com demanda variável através do uso de simulação: um estudo de caso. *Revista Produção*, 13(3), 63-77. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132003000300006>.
- van Zante-de Fokkert, J. I., & de Kok, T. G. (1997). The mixed and multi model linebalancing problem: a comparison. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 399-412. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00162-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00162-2).

## Errata/Erratum

No artigo “Balanceamento de linha de montagem mista em cenários com distintos mix de produtos”, com o DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530XER1874-14>, publicado no periódico Gestão & Produção, volume 23, número 2, p. 294-307, na página 294,

onde se lê:

**Gustavo Reginato<sup>1</sup>, Michel José Anzanello<sup>1</sup>, Alessandro Kahmann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, CEP 90040-060, Porto Alegre, RS, Brazil, e-mail: [reginato205@yahoo.com.br](mailto:reginato205@yahoo.com.br); [anzanello@producao.ufrgs.br](mailto:anzanello@producao.ufrgs.br); [alessandro.kahmann@ufrgs.br](mailto:alessandro.kahmann@ufrgs.br)

leia-se:

Gustavo Reginato<sup>1</sup>, Michel José Anzanello<sup>1</sup>, Alessandro Kahmann<sup>1</sup>, **Lucas Schmidt<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, CEP 90040-060, Porto Alegre, RS, Brazil, e-mail: [reginato205@yahoo.com.br](mailto:reginato205@yahoo.com.br); [anzanello@producao.ufrgs.br](mailto:anzanello@producao.ufrgs.br); [alessandro.kahmann@ufrgs.br](mailto:alessandro.kahmann@ufrgs.br); [lucasximiti@hotmail.com](mailto:lucasximiti@hotmail.com)