Modelo de simulação para linhas de produção com trabalhadores deficientes

Pedro B. Castellucci e Alysson M. Costa

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo

pedrocastellucci@gmail.com e alysson@icmc.usp.br

Resumo

Um resultado empírico interessante presente na literatura de linhas de produção é o chamado *efeito tigela*, que diz que linhas levemente desbalanceadas no formato de uma tigela (com as estações centrais menos carregadas) são mais eficientes que linhas perfeitamente balanceadas. Neste trabalho, analisamos a existência deste efeito em linhas com trabalhadores heterogêneos (em sua maior parte, trabalhadores com deficiências). Para isso, modificamos uma formulação existente do *problema de balanceamento e designação de trabalhadores em linhas de produção* para gerar configurações de teste. Estas configurações foram então implementadas em um modelo de simulação estocástico e os resultados obtidos foram analisados, confirmando a existência do efeito e contribuindo para um maior entendimento dele.

Palavras-chave: Linhas de produção, simulação, trabalhadores deficientes, efeito bowl.

Abstract

An interesting empiric result in the assembly line literature states that slightly unbalanced assembly lines (in the format of a bowl) are more efficient than perfectly balanced ones. This effect is known as the *bowl phenomenon*. In this study, we analyze the presence of this phenomenon in assembly lines with heterogeneous workers (most of them, workers with disabilities). For this purpose, we modify an existing model for the *assembly line worker assignment and balancing problem* in order to generate example configurations exhibiting the desired format. These configurations are implemented in a stochastic simulation model and the obtained results are analyzed. The findings obtained here confirm the existence of the bowl phenomenon in such situations and contributes to deepen our knowledge in this empirical phenomenon.

Keywords: Assembly lines, simulation, disabled workers, bowl phenomenon.

1 Introdução

Linhas de produção são sistemas produtivos especialmente úteis para fabricação de itens padronizados em larga escala (Scholl 1999). A ideia básica de tais sistemas consiste na divisão das tarefas entre diversos trabalhadores ou estações de trabalho. Em cada estação, parte das tarefas necessárias para sua fabricação é executada. O problema clássico de balanceamento é conhecido como SALBP (*simple assembly line balancing problem*) e assume, entre outras hipóteses, que os tempos de execução das tarefas são independentes do trabalhador que as executa.

Em alguns contextos, as hipóteses do SALBP não são válidas. Em particular, nos preocupamos com o caso de linhas de produção em centros de trabalho para deficientes. Neste caso, devido a grande heterogeneidade entre os trabalhadores, cada tarefa tem um tempo de execução que depende do trabalhador que a executa. Neste caso, além da designação de tarefas a estações de trabalho é necessário designar trabalhadores às mesmas estações. Este problema foi proposto por Miralles et al. (2007) e recebeu o nome de ALWABP (*assembly line worker assignment and balancing problem*).

Tanto no SALBP como no ALWABP, a consideração clássica assume que os tempos de execução de cada tarefa são determinísticos e, por isso, a cadência da linha é determinada pela carga da máquina mais carregada. Na prática, entretanto, existe uma variação no tempo de execução de uma mesma tarefa ao longo do tempo. Tal variação pode ocorrer devido a pequenas diferenças entre as peças, alterações no comportamento do trabalhador, problemas com os equipamentos necessários para a execução da tarefa entre outras diversas razões de caráter aleatório. Isto ocasiona efeitos interessantes tais como o clássico fenômeno tigela (*bowl phenomenom*), no qual se observa que linhas ligeiramente desbalanceadas no formato de uma tigela (isto é, com as estações centrais menos carregadas), ou com as estações centrais tendo carga com tarefas de menor variabilidade, apresentam maior produtividade (Hillier & Boling 1966).

As características teóricas do efeito *bowl* ainda não são compreendidas. Na prática, entretanto, a existência deste fenômeno faz com que soluções obtidas com métodos de otimização (heurísticos ou exatos) possam ser adequadas aos contextos práticos de origem, permitindo um ajuste destas soluções de modo a aumentar a cadência das linhas. Para isso, modelos de simulação são de utilidade ímpar, pois permitem a consideração de características mais precisas no que se refere ao tempo de execução de tarefas.

Neste trabalho de iniciação científica, propomos um modelo de simulação para a análise da produtividade de linhas de produção. Em particular, nos interessamos pelo caso ALWABP, para o qual não conhecemos nenhum estudo similar. Nosso objetivo primordial é verificar a existência do efeito *bowl* em linhas de produção com trabalhadores heterogêneos. Para isso, desenvolvemos um modelo de programação inteira capaz de fornecer soluções com balanceamentos no formato tigela (com maior ou menor inclinação). Estas soluções são usadas em um modelo de simulação, também desenvolvido neste trabalho, e os resultados analisados.

O restante deste documento esta organizado da seguinte forma: a seção seguinte apresenta definições gerais sobre linhas de produção e o problema ALWABP, além de apresentar o modelos proposto para obtenção de configurações desbalanceadas no formato tigela. Em seguida, na Seção 3, discorre-se sobre o desenvolvimento do modelo de simulação proposto. A Seção 4 apresenta os resultados com-

putacionais enquanto conclusões finais são apresentadas na Seção 5.

2 Problema ALWABP

Como mencionado anteriormente, o problema ALWABP foi proposto por Miralles et al. (2007), motivado pela situação encontrada em linhas de produção com trabalhadores deficientes. Este problema vem sendo estudado desde então e diversos métodos de resolução já foram propostos, incluindo algoritmos exatos de *branch and bound* (Miralles et al. 2008) e algoritmos heurísticos tais como algoritmos baseados em *clustering search* (Chaves et al. 2009), *beam search* (Blum & Miralles 2010) ou algoritmos genéticos (Moreira et al. 2012).

Além destes artigos, diversos outros já foram publicados com variações do problema que incluem a consideração de rotação de tarefas (Costa & Miralles 2009), de linhas com trabalhadores em paralelo (Araújo et al. 2011) ou de linhas produzindo modelos distintos (Cortez & Costa 2011). Em todos estes trabalhos, assume-se um conjunto de tarefas N. Os tempos de execução de uma tarefa $i \in N$ são considerados determinísticos. Com esta hipótese, tem-se que p_{wi} é o tempo de execução da tarefa i pelo trabalhador w. Além disso, assume-se uma ordem parcial de execução das tarefas, tal que $i \lessdot j$ indica que a tarefa i deve ser realizada antes da tarefa j. Sejam ainda W o conjunto de trabalhadores disponíveis e S o conjunto das estações de trabalho. Com a definição de variáveis binárias y_{sw} (valendo 1 se, e somente se, o trabalhador $w \in W$ está alocado à estação $s \in S$) e x_{swi} (valendo 1 se, e somente se, a tarefa $i \in N$ é realizada na estação $s \in S$ pelo trabalhador $w \in W$) e a variável real C indicando o tempo de ciclo (tempo de execução na máquina mais carregada), pode-se escrever o problema ALWABP como:

$$\text{Min } C \tag{1}$$

sujeito a:

$$\sum_{s\in S}\sum_{w\in W} x_{swi} = 1, \qquad \forall i \in N, \tag{2}$$

$$\sum_{s\in S} y_{sw} = 1, \qquad \forall w \in W, \tag{3}$$

$$\sum_{w\in W} y_{sw} = 1, \qquad \forall s \in S, \tag{4}$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{w\in W} s \cdot x_{swi} \leq \sum_{s\in S}\sum_{w\in W} s \cdot x_{swj}, \qquad \forall i,j \in N, i \lessdot j, \tag{5}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{w\in W} p_{wi} \cdot x_{swi} \leq C, \qquad \forall s \in S, \tag{6}$$

$$\sum_{i\in N} x_{swi} \leq |N| y_{sw}, \qquad \forall s \in S, \forall w \in W, \tag{7}$$

$$y_{sw} \in \{0,1\}, \qquad \forall s \in S, \forall w \in W, \tag{8}$$

$$x_{swi} \in \{0,1\}, \qquad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall i \in N. \tag{9}$$

O objetivo do modelo (1)-(9) é obter uma alocação de trabalhadores e tarefas às estações, de modo que o tempo de ciclo da linha seja minimizado. As restrições (2) obrigam que todas as tarefas sejam

executadas, enquanto (3) e (4) garantem que cada trabalhador é designado a uma máquina e que cada máquina recebe um trabalhador, respectivamente. As restrições (5) garantem o respeito à ordem parcial de execução das tarefas, enquanto (6) definem o tempo de ciclo da linha. Finalmente, as restrições (7) asseguram que uma tarefa só pode ser executada por um trabalhador em uma dada estação se este trabalhador estiver alocado àquela estação.

As restrições (5) são perfeitamente adequadas para o caso determinístico pois incentivam a distribuição uniforme da carga entre todas as estações de trabalho, de modo que o tempo de ciclo C seja minimizado. Para obter configurações que sigam a filosofia proposta pelo efeito *bowl*, modificamos estas restrições conforme indicado abaixo:

$$\sum_{i \in N} \sum_{w \in W} p_{wi} \cdot x_{swi} \leq \alpha_s C, \qquad \forall s \in S, \tag{10}$$

onde α_l são parâmetros de ajuste, obtidos da seguinte maneira:

$$\alpha_1 > 0, \tag{11}$$

$$\alpha_s = \alpha_{|S|-s+1}, \qquad s = 1 \ldots \lfloor |S|/2 \rfloor. \tag{12}$$

$$\alpha_s = \beta \alpha_{s-1}, \qquad s = 2 \ldots \lfloor |S|/2 \rfloor - 1. \tag{13}$$

onde $0 \leq \beta \leq 1$ é um parâmetro que indica a intensidade do desbalanceamento (inclinação da tigela). As restrições (11) indicam que não pode haver carga negativa em uma estação. As restrições (12) favorecem a simetria da configuração enquanto as restrições (13) determinam o fator de ajuste a ser usado nas restrições (10) para cada estação. A figura 1 mostra o perfil resultante para alguns valores de α e β.

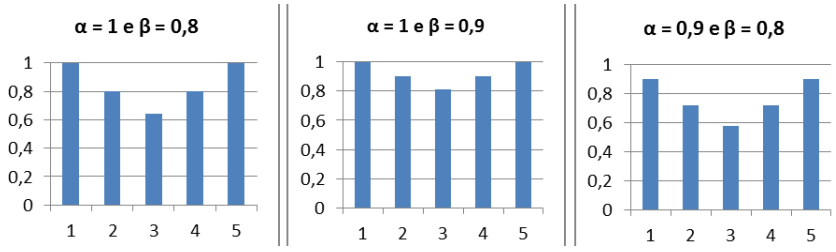
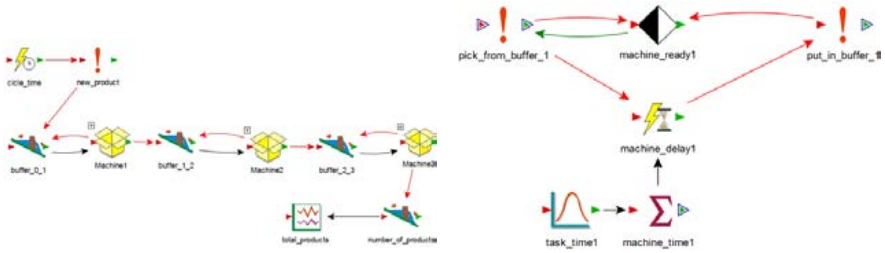


Figura 1: Modificação dos Parâmetros α e β.

3 Modelo de simulação

O modelo de simulação construído para avaliar linha de produção neste trabalho tem como variável de estado o número de produtos que saíram da linha, é de tempo contínuo, de estado discreto, estocástico, linear, dinâmico, aberto e instável (Ross 2006). Para a construção do modelo foi utilizado o *software* **Goldsim**. Trata-se de um simulador de propósito geral com recursos que permitiram a construção do modelo necessário para obtenção dos resultados (*GoldSim* 2010).

Existem dois controles lógicos para a linha cujas implementações no *software* **Goldsim** são mostradas nas figuras 2(a) e 2(b): o interno controla a simulação de uma peça sendo trabalhada dentro da estação e o externo controla o fluxo de produtos entre as estações.



(a) Controle externo (b) Controle interno

Figura 2: Controles lógicos do modelo de simulação

O controle externo faz com que a primeira estação sempre tenha uma peça disponível, retirada de um repositório infinito (*buffer_0_1*) . Para que o produto seja passado entre as estações ele é posto em um *buffer* (estoque) intermediário de onde é retirado pela estação seguinte. É importante ressaltar que não se trata de um *buffer* real: o produto é posto e retirado instantaneamente (trata-se apenas de uma questão de implementação).

O controle interno é feito da seguinte forma: é realizado um atraso (*machine_delay1*) cujo valor depende dos tempos individuais (*task_time_1*) das tarefas alocadas na estação para determinar o tempo que a peça ficará nela. A estação possui um *status* (*machine_ready1)*, que pode ser *pronta*, no caso de estar preparada para receber uma nova peça ou *ocupada*, se estiver processando uma. Existem, também, três eventos possíveis: *retirar do buffer* (*pick_from_buffer_1*), *colocar no buffer* (*put_in_buffer_1*) e *atraso* (*machine_delay1*). Quando um produto é retirado do *buffer* precedente (evento "retirar do *buffer*") o *status* da estação muda de *pronta* para *ocupada* e um evento *atraso* é gerado. Após o atraso ser realizado, se a estação seguinte estiver *pronta*, é lançado um evento *colocar no buffer*, caso contrário o evento aguarda até a próxima estação estar *pronta*.

Dessa forma, com os algoritmos de controle interno e externo, foi montado o modelo de simulação para linhas de produção.

4 Resultados computacionais

Os resultados computacionais foram obtidos através simulações estocásticas utilizando uma simulação de Monte Carlo das combinações de número de máquinas e níveis de desbalanceamentos desejados tanto para média quanto para o desvio-padrão. Os tempos envolvidos foram considerados como seguindo uma distribuição Normal, $N(\mu, \sigma^2)$, com média μ e variância σ^2, sendo μ o valor da solução determinística e $\sigma = \frac{\mu}{10}$.

Para obtenção dos resultados referentes à média, o parâmetro β da equação (13) é reduzido gradativamente nas estações centrais, até que a solução diferisse da anterior, o que caracterizaria um novo nível de profundidade a ser analisado. O parâmetro α da equação (10) é escolhido de forma que uma restrição de tempo mais rigorosa nas estações centrais implique em uma relaxação das mesmas restrições nas estações das extremidades. Para cada escolha de α e β o modelo matemático é resolvido, a solução obtida determina a alocação de tarefas e trabalhadores em cada estação no modelo de simulação. Os resultados obtidos são listados na tabela 1.

Tabela 1: Resultados para desnível de média.

	Desbalanceamento						
Instância	**nível 0**	**nível 1**	**nível 2**	**nível 3**	**nível 4**	**nível 5**	**nível 6**
HESKIA 01	144,310	144,580*	143,750	142,870	142,890	139,270	138,190
HESKIA 11	78,804	73,572	78,760	79,016*	78,864	78,596	77,248
HESKIA 21	66,004	66,960*	66,012	65,696	65,696	65,140	63,916
HESKIA 31	64,592	65,076	63,968	65,280*	64,832	65,096	64,272
HESKIA 41	389,250	390,040	390,020	395,710	403,460*	392,000	383,900
HESKIA 51	275,010	271,500	276,760	276,880*	270,840	275,920	276,100
HESKIA 61	203,700	204,660	206,460*	204,670	205,910	205,520	203,380
HESKIA 71	150,530*	147,840	149,510	148,660	148,660	149,350	145,860
ROSZIEG 01	712,790*	704,490	687,430	593,570	677,650	675,470	646,990
ROSZIEG 11	475,780*	457,830	420,130	420,250	420,120	420,070	420,080
ROSZIEG 21	495,350*	459,630	459,490	445,550	459,590	431,840	431,700
ROSZIEG 31	456,610	456,490	456,260	456,740*	456,570	429,640	419,140
ROSZIEG 41	1371,300	1406,900	1411,700*	1402,500	1376,300	1406,000	1369,200
ROSZIEG 51	1251,300	1286,000	1277,000	1276,200	1286,000	1286,900*	1277,500
ROSZIEG 61	854,430	874,370*	832,770	832,550	832,800	826,340	832,800
ROSZIEG 71	914,640	937,640*	920,960	935,400	868,460	872,100	880,850

Pode-se notar que o ponto ótimo da produção não é no nível balanceado (nível 0), com exceção de HESKIA 71, ROSZIEG 01, 11 e 21. Isso evidencia a ocorrência do efeito tigela em diversos níveis de profundidade. O melhor resultado ocorreu com o caso ROSZIEG 41, no qual o aumento foi de $3,6\%$ em relação ao nível 0.

Também, foi definido $c_s = \frac{\mu}{\sigma} = 10$, indicando o nível de variabilidade nos tempos de execução de uma dada máquina $s \in S$. Este parâmetro c foi variado para as diversas máquinas com o intuito de verificar a existência do efeito bowl não mais devido ao desbalanceamento do tempo das máquinas, mas devido a uma alocação de tarefas com menor variabilidade nas estações centrais. A variação foi executada tomando-se como base soluções sem as restrições (10): para cinco máquinas, tomou-se o caso balanceado ($c_s = 10, s = 1, .., 5$) e aumentou-se em uma unidade o valor central, c_3, este aumento foi compensado com a diminuição em $0,5$ das estações extremas, mantendo-se constante a soma dos tempos da linha e sua simetria. Este procedimento é repetido para aumentar o desnível entre estações. Analogamente, para o caso de seis máquinas c_3 e c_4 têm aumento de uma unidade e c_1 e c_6 têm diminuição unitária; para sete estações c_4 tem aumento unitário e c_1 e c_7 têm diminuição de $0,5$. Os resultados obtidos neste caso refletem como a produção da linha é afetada caso os tempos de execução das tarefas centrais sejam mais constantes que o das nos extremos da linha e podem ser vistos na tabela 2.

No caso de instâncias com tarefas com maior desvio sendo alocadas nas estações periféricas, o efeito tigela apareceu de maneira menos acentuada. Ainda assim, em diversas situações foi possível

Tabela 2: Resultados para desnível de c.

	Desbalanceamento						
Instância	**nível 0**	**nível 1**	**nível 2**	**nível 3**	**nível 4**	**nível 5**	**nível 6**
HESKIA 01	144,310*	144,010	143,560	142,810	141,800	140,390	138,140
HESKIA 11	78,800*	78,570	78,350	78,000	77,500	76,692	75,658
HESKIA 21	66,000*	65,980	65,860	65,550	65,120	64,560	63,708
HESKIA 31	64,590*	64,600	64,470	64,210	63,896	63,428	62,724
HESKIA 41	389,250*	388,450	387,460	386,040	384,120	381,510	377,130
HESKIA 51	275,010*	274,480	273,810	272,860	271,520	269,570	266,500
HESKIA 61	203,700	203,750	204,280	204,660	204,910*	204,580	203,220
HESKIA 71	150,530*	150,410	150,390	150,190	149,630	149,000	147,580
ROSZIEG 01	712,790*	712,560	712,390	712,190	712,020	711,760	710,080
ROSZIEG 11	475,780	475,800	475,820	475,870*	475,790	475,790	475,680
ROSZIEG 21	495,350*	494,860	493,820	492,800	490,320	487,000	481,970
ROSZIEG 31	456,510*	455,810	454,900	453,620	451,800	449,47	445,750
ROSZIEG 41	1371,300	1373,100	1374,400	1375,300	1375,400*	1374,300	1370,100
ROSZIEG 51	1251,300	1252,400	1252,800*	1252,500	1250,800	1246,600	1238,000
ROSZIEG 61	854,430*	853,700	852,200	849,800	846,400	841,170	832,020
ROSZIEG 71	914,640	916,060	917,200	918,100	918,760	919,120*	918,880

observá-lo. A melhoria de perfomance mais expressiva ocorreu na instância 61 da família HESKIA onde um aumento e produtividade de $0,6\%$ foi constatado em relação ao caso balanceado. Esta melhoria foi observada com desnível de 4 unidades, ou seja, com as estações c_3 e c_4 (estações centrais no caso da instância 61) foram umentados em 4 unidades.

5 Conclusões

Este trabalho introduziu modelos matemáticos inteiro-mistos para obtenção de configurações ligeiramente desbalanceadas de linhas de produção com trabalhadores heterogêneos. Estas configurações foram utilizadas em modelos de simulação que permitiram verificar que a eficiência deste tipo de linha também é melhorada quando leves distorções são aplicadas no balanceamento, sejam elas devido a alocação de menos carga ou carga com tempos mais estáveis nas estações centrais.

Estas conclusões expandem o nível de abrangência do efeito bowl, um fenômeno empírico conhecido desde a década de 60, mas cujas causas teóricas ainda são pouco estudadas. Abre-se, portanto, a possibilidade do estudo de tal efeito em uma nova gama de problemas, onde trabalhadores heterogêneos são alocados em layouts diversos (linhas em U, com trabalhadores em paralelo, etc.).

6 Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro do CNPq, CAPES e FAPESP.

Referências

Araújo, F. F. B., Costa, A. M. & Miralles, C. (2011). Two extensions for the assembly line worker assignment and balancing problem: parallel stations and collaborative approach., *International Journal of Production Economics (accepted)* .

Blum, C. & Miralles, C. (2010). Beam search procedure for the assembly line worker assignment and balancing problem, *Proceedings of the 5th Americas International Conference on Production Research*.

Chaves, A. A., Lorena, L. A. N. & Miralles, C. (2009). Hybrid metaheuristic for the assembly line worker assignment and balancing problem, *Lecture Notes on Computer Science* **5818**: 1–14.

Cortez, P. M. C. & Costa, A. M. (2011). A mathematical model and a hybrid heuristic for sequencing mixed-model assembly lines with disabled workers ., *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Ubatuba.

Costa, A. M. & Miralles, C. (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers, *International Journal of Production Economics* **120**: 625–632.

GoldSim (2010). *Users Manuals. Volumes 1 - 2* .

Hillier, F. S. & Boling, R. W. (1966). The effects of some design factors on the efficiency of production lines with variable operation times., *Journal of Industrial Engineering* **17**: 651–658.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andrés, C. & Cardos, M. (2007). Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study, *International Journal of Production Economics* **110**: 187–197.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andrés, C. & Cardos, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled, *Discrete Applied Mathematics* **156**: 352–367.

Moreira, M. C. O., Ritt, M., Costa, A. M. & Chaves, A. A. (2012). Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem, *Journal of heuristics (accepted)* .

Ross, S. M. (2006). Simulation, *Elsevier* .

Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica-Verlag.