

Resolução e análise de um problema de linha de produção em U com deslocamento de operadores por meio de simulação e programação matemática.

Solution and analysis of a traveling worker U-shaped assembly line by simulation and mathematical programming

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar e simular uma linha de produção com deslocamento de trabalhadores considerada anteriormente na literatura para otimização do balanceamento das tarefas entre as estações. A solução provida pelo modelo matemático foi simulada pelo *software* Simio, que constrói um ambiente mais próximo do real em relação às aproximações adotadas no modelo de otimização. Foi feita uma análise para 3 cenários: (i) uma linha de produção sem compartilhamento de trabalhadores, (ii) com compartilhamento de trabalhadores e sem estações semi-automáticas e (iii) com compartilhamento de trabalhadores e com estações semi-automáticas. Os resultados mostram que o modelo de otimização possui resultados idênticos em relação ao modelo de simulação.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação de eventos discretos. Programação linear inteira mista. Modelo matemático.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze and simulate a traveling-worker assembly line previously considered in the literature to optimize the balance of tasks between workstations. The solution provided by the mathematical model was simulated using the software Simio that builds an environment closer to the real-world in terms of the approximations adopted in the optimization model. An analysis was made for 3 scenarios: (i) an assembly line without traveling workers, (ii) with traveling workers and without semi-automatic stations and (iii) with traveling workers and with semi-automatic stations. The results show that the optimization model has identical results in relation to the simulation model.

KEYWORDS: Discrete event simulation. Mixed-integer linear programming. Mathematical model.

Gustavo Maysonave Franck
gustavofranck@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil

Ricardo Lüders
luders@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil

Leandro Magatão
magatao@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

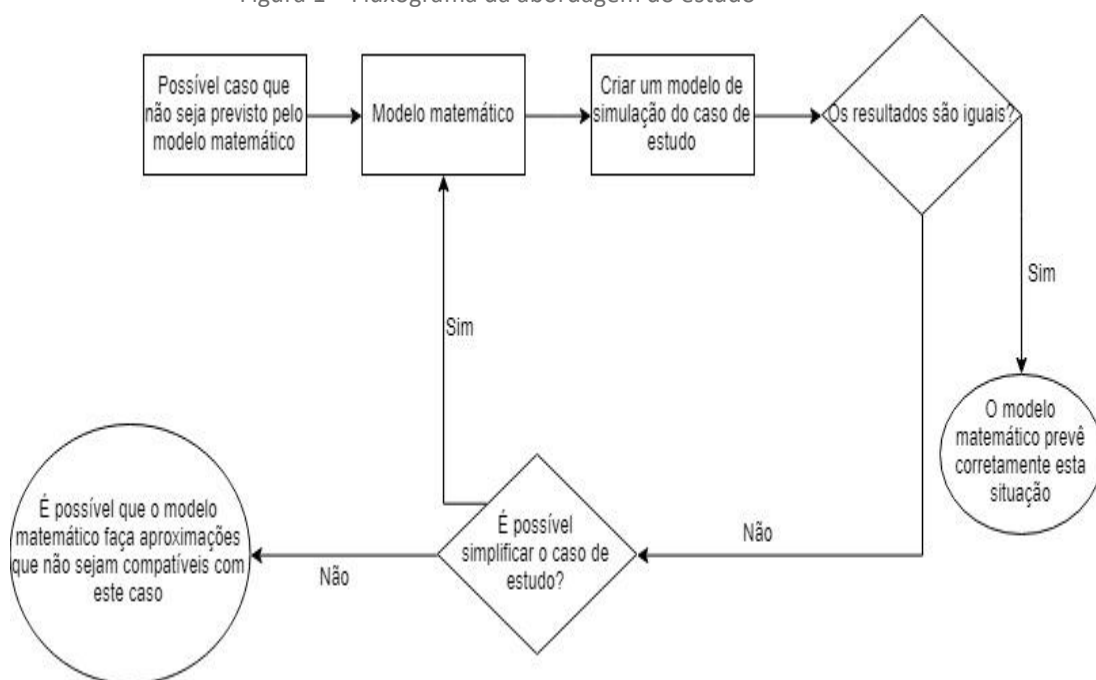
A otimização de processos de produção é um assunto de importância, tanto na área acadêmica como na prática, pois viabiliza maiores lucros utilizando a mesma quantidade de recursos. Para tanto, um modelo matemático que seja capaz de otimizar uma linha de produção é de grande interesse. No presente estudo, utilizou-se um modelo matemático da literatura (SIKORA et al., 2017), feito com técnicas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para encontrar soluções para uma linha de produção com apenas um tipo de produto passando por ela (linha de modelo simples). Em particular o referido modelo utiliza o conceito de conjuntos esparsos em sua concepção (SIKORA et al., 2015). Aliou-se o modelo PLIM à simulação de eventos discretos (BANKS, 2009). O objetivo era simular os casos solucionados pelo modelo de otimização em (SIKORA et al., 2017) de modo a evidenciar eventuais aproximações de modelagem que devessem ser aprimoradas. Foi feito um estudo sobre os pontos críticos do modelo matemático com o intuito de encontrar possíveis diferenças entre os tempos propostos pelo modelo e os tempos medidos por meio da simulação. O modelo matemático recebe como entrada os tempos de execução das tarefas, a ordem (precedência) das tarefas, as distâncias entre as estações, o número de trabalhadores, o número de estações e o número de entidades diferentes, cada uma com seus tempos de execução em cada tarefa. Então, os valores são resolvidos por meio de um *solver* comercial (IBM, 2019) e obtém-se na saída uma solução contendo qual trabalhador fica em qual estação, qual estação é compartilhada, os tempos de ciclo de cada estação, os tempos de ciclo de cada trabalhador e o tempo de ciclo da linha inteira. Com estas informações do modelo de otimização foram feitos modelos de simulação com o *software* Simio© (SIMIO, 2019) contendo as mesmas características para medir os tempos de ciclo dos trabalhadores e das estações e também o tempo de ciclo da linha. Após a simulação registrou-se os resultados obtidos, comparando-se com as soluções encontradas pelo modelo matemático. Deste modo foi possível evidenciar se o modelo representa linhas de produção contendo deslocamento de operadores e estações que necessitam de um operador para iniciar o processo, mas não requerem que o operador nelas permaneça, definidas como estações de trabalho semi-automáticas.

MÉTODOS

Utilizando o *software* IBM-ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM, 2019) para modelagem e obtenção de soluções do modelo matemático e o *software* Simio (SIMIO, 2019) para simular esses resultados, foram feitas baterias de testes. O fluxograma presente na Figura 1 indica a abordagem utilizada, a qual envolve os

seguintes passos: procurar um caso em que o modelo de otimização possa ter discrepância com a simulação (casos críticos); gerar as soluções e simulá-las. Caso o resultado seja compatível, o modelo de otimização prevê corretamente casos com esta determinada característica, caso o resultado seja diferente é então necessário fazer uma análise para tentar simplificar o problema e discretizar seus passos para compreender a eventual simplificação de modelagem do modelo. O primeiro teste foi feito com um caso reportado na literatura (SIKORA et al., 2017), para confirmar que o modelo de simulação estava adequado. Após a validação, foram feitas mudanças nas entradas do modelo matemático com o intuito de testá-lo em diferentes aspectos.

Figura 1 – Fluxograma da abordagem do estudo



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A Figura 2 mostra uma parte da solução proposta pelo modelo de otimização (valor da variável que indica a alocação do trabalhador – *worker* – a uma estação – *station*), a qual serviu de base para a implementação no modelo de simulação (determinação de parâmetros de entrada para a simulação).

Figura 2 – Parte da solução do modelo matemático

W_S (tamanho 183)		<<
W	S	Valor
0	15	1
0	9	1
15	18	1
14	6	1
13	5	1
12	12	1
12	8	1
11	20	1

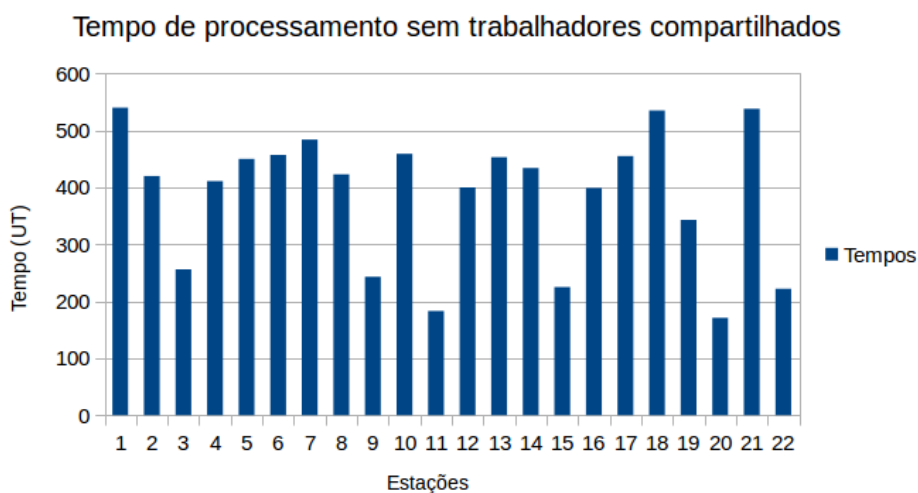
Fonte: (IBM CPLEX Studio IDE, 2019).

Esta solução era interpretada e, então, um modelo de simulação baseado nas informações propostas pelo modelo matemático era criado utilizando os blocos de construção do Simio. Para simular estações foi utilizado o bloco *Server* que define o tempo de processamento e aguarda possuir um operador e a entidade para processá-la, operadores que foram implementados utilizando o bloco *Worker*, interpretado como um recurso obrigatório para a estação poder iniciar o procedimento. Conexões lógicas e o ajuste de configurações específicas do Simio (parâmetros) foram necessários de modo a prover os sincronismos operacionais, além de corretamente representar a linha de produção em análise, suas particularidades como a configuração em U e o deslocamento de operadores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostram os tempos de ciclo da linha de produção sob diferentes cenários: uma linha com o mesmo número de operadores e estações (Figura 3), retirando a necessidade de deslocamento. Uma linha com um número de estações maior do que o número de operadores, exigindo que haja o deslocamento de operadores (Figura 4). Uma linha que além de ter o número de estações maior que o número de operadores tenha também estações que não necessitam a permanência do operador para executar suas tarefas, necessite apenas que o operador inicie o procedimento, ou seja, apresenta tarefas semi-automáticas (Figura 5).

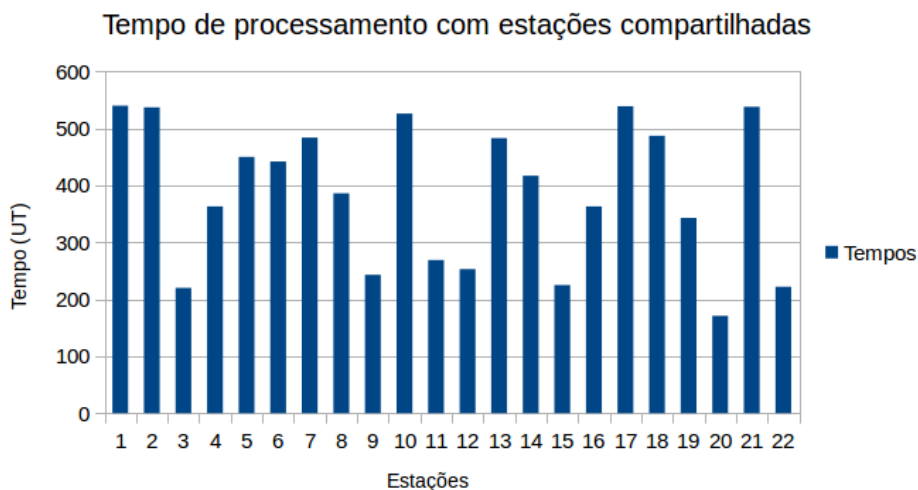
Figura 3 – Gráfico dos valores obtidos sem trabalhadores compartilhados



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Por meio da Figura 3 foi possível observar que os valores da solução do modelo matemático são iguais aos valores encontrados na simulação, inclusive no tempo de ciclo de 540 UT, determinado pela estação 1.

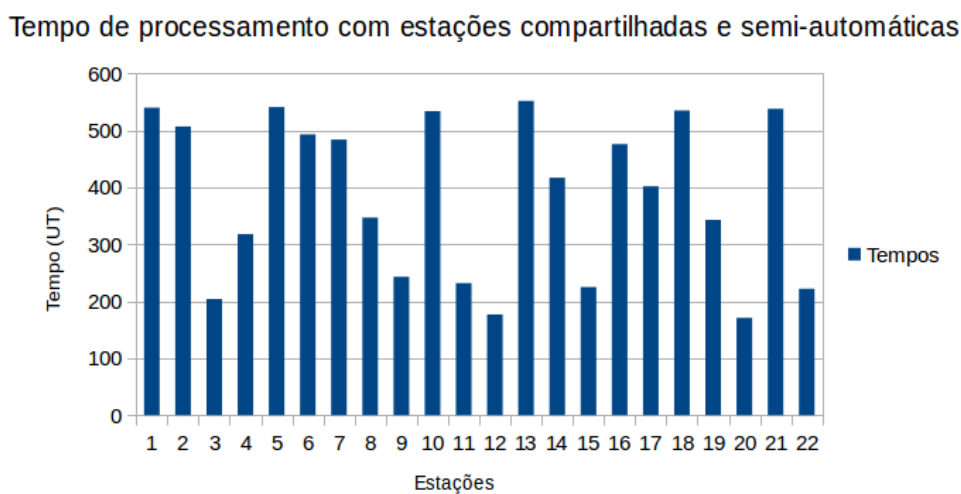
Figura 4 – Gráfico dos valores obtidos com trabalhadores compartilhados



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Tendo por base a Figura 4 foi possível observar que os valores da solução do modelo são iguais aos valores encontrados na simulação, inclusive no tempo de ciclo de 540 UT, determinado pela estação 1. Este teste permitiu validar a metodologia de implementação no modelo de simulação de estações semi-automáticas.

Figura 5 – Gráfico dos valores obtidos com trabalhadores compartilhados e estações semi-automáticas



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A Figura 5 evidencia um caso em foram utilizados 15 trabalhadores para as 22 estações, sendo que uma das estações compartilhada era semi-automática. O tempo de ciclo aumentou para 552 e foi determinado pela estação 13 (Figura 5), como previsto pelo modelo matemático e comprovado pelo modelo de simulação.

CONCLUSÃO

O modelo matemático foi capaz de prover soluções idênticas aos resultados registrados pela simulação, mostrando que as aproximações feitas por ele não alteram significativamente o resultado. É importante notar que todos os testes foram feitos com linhas de modelo simples, ou seja, havia apenas um tipo de entidade (modelo de veículo) passando pela linha produtiva. Estudos feitos com uma linha de modelo misto, que possuíam mais de um tipo de produto passando pela linha, indicaram que a metodologia para obter os resultados utilizando a simulação deve ser aprimorada de modo a viabilizar a aquisição desse tipo de resultado. Possíveis estudos futuros do modelo matemático utilizando linhas mistas podem mostrar discrepâncias entre os resultados da otimização do modelo PLIM e da simulação a eventos discretos, revelando aproximações inadequadas no modelo de otimização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao CNPq pelo apoio à realização da pesquisa (Processos 406507/2016-3 e 307211/2017-7).

REFERÊNCIAS

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-Event System Simulation**, 5th ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2009.

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Disponível em:
<<https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

SIKORA, C.G.S.; LOPES, T.C., MAGATÃO, L. Variable Sets reduction for assembly line balancing problem: MILP model and case studies. In Proceedings of XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (XLVIII Brazilian Symposium of Operational Research), p. 166–176, 2015.

SIKORA, C.G.S.; LOPES, T.C., MAGATÃO, L. Traveling Worker assembly line (re)balancing problem: Model, reduction techniques, and real case studies. **European Journal of Operational Research**, v. 259, n. 3, p. 949-971, 2017.

SIMIO. **The Simio Product Family**. Disponível em:
<<http://www.simio.com/products/>>. Acesso em: 08 ago. 2019.