

## Modelagem Matemática Aplicada ao Rebalanceamento de Linhas de Montagem com Estações de Trabalho Paradas ou em Falha

**Leonardo Torques Cavalli** (Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)) [lcavalli@alunos.utfpr.edu.br](mailto:lcavalli@alunos.utfpr.edu.br)

**Alex Eiji Kizaki** (Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)) [akizaki@alunos.utfpr.edu.br](mailto:akizaki@alunos.utfpr.edu.br)

**Ricardo Lüders** (Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)) [luders@utfpr.edu.br](mailto:luders@utfpr.edu.br)

**Leandro Magatão** (Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)) [magatao@utfpr.edu.br](mailto:magatao@utfpr.edu.br)

**Resumo:** O balanceamento e o rebalanceamento de linhas de montagem surgiram como uma proposta para otimizar as linhas produtivas, resultando no aumento da produtividade e redução de gargalos. A obtenção de respostas ao (re)balanceamento pode ser realizada por meio de modelos matemáticos que visam equalizar a distribuição de tarefas nas estações de trabalho da linha, com a consequente diminuição do tempo de ciclo. O presente trabalho considera características do trecho final de uma linha de montagem na região de Curitiba/PR. Este trecho é composto por 7 estações de trabalho, nas quais são alocadas 46 tarefas. A partir da coleta de informações da linha em estudo, pode-se estabelecer as relações de precedências entre as tarefas para os 5 modelos de produtos que podem ser montados na linha (linha de modelo-misto). Outra informação obtida foi o índice de falhas das estações, falhas estas que resultam na paralisação do trecho de linha. Para o estudo foi elaborado um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista para a solução otimizada do balanceamento. Os cenários analisados consideraram um modelo equivalente de produto, denominado de modelo médio, e as duas estações com maior índice de falhas. Objetivou-se encontrar soluções mais equilibradas do tempo total de processamento nas estações de trabalho, considerando-se a linha com todas as estações ativas ou com desativação das duas estações de trabalho com maior histórico de falhas (modo degradado), individualmente e simultaneamente. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de melhoria do balanceamento da linha com o uso da abordagem proposta.

**Palavras chave:** Rebalanceamento de linhas de montagem, Estações em falha, Modelo matemático.

## Mathematical Modeling Applied to Rebalancing Assembly Lines with Stops or Failures Workstations

**Abstract:** Balancing and rebalancing assembly lines emerged as a possible proposal to optimize production lines, resulting in increased productivity and reduction of bottlenecks. Obtaining responses to (re)balancing can be accomplished by means of mathematical models that aim to equalize the distribution of tasks in the line workstations, with the consequent decrease of the cycle time. The present work considers characteristics of the final part of an assembly line in the region of Curitiba/PR. This part consists of 7 workstations, in which 46 tasks are allocated. Based on information obtained, one can establish the precedence relationships between the tasks for the 5 models of products that can be assembled in line (mixed-model line). Another information obtained was the failure rate of workstations, failures that result in the line stoppage. For the study, a mathematical model in Mixed Integer Linear Programming was elaborated for the optimized balancing solution. The analyzed scenarios considered an equivalent model of product, called the medium model, and the two stations with the highest failure rate. The objective was to find a more balanced solutions of total processing

time in the workstations, considering the line with all the active workstations or with the disabling of the two workstations with greater history of failures (degraded mode), either individually or simultaneously. The obtained results show the potential for improving the line balancing with the use of the proposed approach.

**Key-words:** Rebalancing assembly lines, Failed workstations, Mathematical Model.

## 1. Introdução

A diminuição de custos de produção, a busca pela melhoria dos produtos e serviços e a otimização dos sistemas produtivos são objetivos comuns em diversos setores industriais. Para atingir esses objetivos, é necessário que decisões estratégicas, com relação ao planejamento e programação da produção, sejam tomadas. Porém, essas decisões ainda são conduzidas com o uso de critérios experimentais devido à complexidade dos sistemas produtivos, resultando em decisões conservativas que não utilizam a capacidade máxima de operação dos meios produtivos (YIN & AZIZ, 2018). Nesse contexto, a otimização da operação de linhas produtivas por meio de modelos matemáticos para o balanceamento das referidas linhas tem se tornado cada vez mais evidente e presente nas indústrias. O balanceamento de linhas pode ser entendido como a atribuição de tarefas a estações de trabalho em uma linha de modo a obter o índice de produção desejado com o menor número de estações de trabalho (KRAJEWSKI, et al., 2009). Para outros autores, balanceamento de linha é a análise de linhas de produção que divide igualmente o trabalho a ser feito entre as estações de trabalho, a fim de que o número de estações de trabalho necessário na linha de produção seja minimizado (GAITHER, & FRAZIER, 2002).

Os modelos matemáticos visando balanceamento e otimização das linhas produtivas e de montagem passaram por evoluções de modo a possibilitar a resolução de problemas com diferentes características. Um campo de pesquisa intitulado de balanceamento de linhas de montagem simples ou *Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP)* aborda problemas definidos como: SALBP-1, SALBP-2, SALBP-E e SALBP-F. O primeiro trata de um problema que visa minimizar o número de estações utilizadas para um tempo de ciclo determinado; por consequência, minimiza-se a soma dos tempos ociosos das estações de trabalho. O segundo consiste na minimização do tempo de ciclo da linha de montagem dado um número de estações de trabalho fixo. Quando tanto o tempo de ciclo quanto o número de estações de trabalho são variáveis, há, então, um problema referenciado como SALBP-E. O último, SALBP-F, refere-se ao problema de verificação de factibilidade de uma solução, dados o tempo de ciclo e o número de estações de trabalho (BOYSEN, et al., 2007).

Um número significativo de trabalhos já foi desenvolvido no contexto de SALBP (BATTALIA & DOLGUI, 2013), contudo, há várias hipóteses simplificadoras adotadas para modelos SALBP: (i) todos os parâmetros de entrada são conhecidos e determinísticos, (ii) a execução das tarefas não pode ser dividida entre as estações de trabalho, (iii) um diagrama de precedências entre a execução das tarefas deve ser respeitado, (iv) todas as tarefas devem ser executadas, (v) todas as estações são igualmente equipadas e podem realizar qualquer das tarefas envolvidas, (vi) o tempo de processamento é o mesmo independentemente da estação ou da ordem em que a tarefa é executada, (vii) qualquer tarefa pode ser executada em qualquer das estações envolvidas, (viii) a linha em análise é serial, sem linhas de alimentação auxiliares ou paralelismos de estações, (ix) a linha é considerada para a produção de um único produto (*single model*), (x) o tempo de ciclo é um parâmetro conhecido (BAYBARS, 1986). As referidas hipóteses limitam a aplicabilidade dos modelos SALBP, dado que particularidades da linha de

produção em análise devem ser levadas em conta (SIKORA, et al., 2017). Deste modo, a avaliação de casos práticos demanda, via de regra, o desenvolvimento de modelos matemáticos que enderecem as particularidades da linha em análise.

Comparado ao grande número de trabalhos desenvolvidos visando o balanceamento de linhas de montagem, poucos são os estudos a respeito do rebalanceamento das linhas, ou seja, da melhora do balanceamento de linhas já instaladas e operantes (Sikora, et al., 2017), caso uma estação precise ser paralisada em função de alguma falha ou interrupção inesperada. Assim, criando um cenário que impossibilita a execução das tarefas previamente alocadas àquelas estações de trabalho, denominado por *modo degradado* (ROCHA, 2014). Comumente, quando há paralização de uma estação de trabalho na linha de montagem, as tarefas são puramente realocadas em outras estações de trabalho que possam realizá-las, de modo a manter a linha de produção operando, não havendo preocupação com o tempo de ciclo, otimização e existência de postos gargalo.

Levando em consideração essa prática bastante usual nas indústrias, um estudo foi feito em uma linha de montagem na região de Curitiba/PR, considerando o balanceamento da linha implementada atualmente, como primeiro caso, e o rebalanceamento da linha considerando a desativação, individual e simultânea, das duas estações com maior histórico de falhas e paradas inesperadas. O trecho de linha em questão é a parte da linha responsável pelas operações de reforço estrutural e acabamento dos produtos e opera simultaneamente com 5 modelos de produtos (Tabela 1), configurando uma linha de modelo misto. Como pode ser observado na Figura 1, há 7 estações de trabalho e 46 tarefas que são comuns aos produtos, divergindo nos tempos de execução para cada modelo, em função da geometria e complexidade dos mesmos, e na ocupação da linha. Outra característica que deve ser ressaltada é a relação de precedências entre as tarefas na linha estudada (SAMOUEI & ASHAYERI, 2019), como pode ser observado na Figura 1. Segundo Becker & Scholl (2003), o diagrama de precedências ilustra um nó para cada tarefa, sendo que cada nó possui um tempo de realização da operação e são interligados, relacionando as restrições de precedência. Tomando como exemplo a Figura 1, para realizar a tarefa 11, é necessário que as tarefas 10 (relação direta), 9 e 8 (relação indireta) sejam concluídas. Por outro lado, a tarefa 11 deve ser concluída para que as tarefas 12 e 13 (sucessores diretos) possam ser iniciadas.

Para a consecução dos estudos será utilizada a técnica de agregação dos diferentes modelos de produto em um modelo equivalente (modelo Médio), conforme estudos apresentados por Thomopoulos (1970). Neste contexto, considera-se um único modelo de produto, oriundo da média ponderada dos tempos de execução das tarefas (definidas para o presente trabalho em unidades de tempo [u.t]) e da ocupação dos modelos na linha.

Modelo	Ocupação da Linha [%]	Tempo de Produção [u.t]
A	16	80,64
B	17	84,71
C	22	92,92
D	33	67,85
E	12	79,70
<b>Médio</b>	<b>100</b>	<b>79,70</b>

Fonte: Os autores

Tabela 1 - Tempos de produção e ocupação da linha pelos modelos

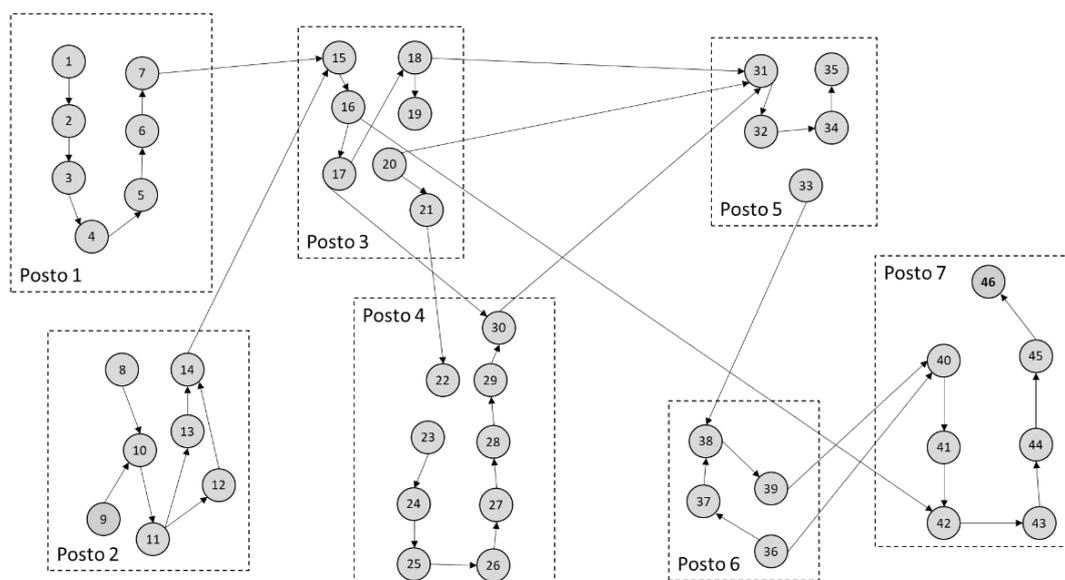


Figura 1 - Diagrama de precedências para os modelos considerados

## 2. Descrição do Modelo

Como apresentado na seção 1, para a elaboração desse estudo foi utilizada uma variação da abordagem de um problema de balanceamento de linhas de montagem simples do tipo 2, SALBP-2. Para tanto, algumas hipóteses de modelagem foram consideradas, como pode ser apurado na seção 2.1. Foram considerados um número fixo de estações de trabalho e, como objetivo, a redução do tempo de ciclo para todos os casos estudados:

- Balanceamento da linha atual;
- Rebalanceamento da linha, considerando uma estação X desativada;
- Rebalanceamento da linha, considerando uma estação Y desativada;
- Rebalanceamento da linha, considerando as estações X e Y desativadas.

### 2.1. Hipóteses de Modelagem

Partindo de um modelo desenvolvido e implementado por Boysen & Fliedner (2008), para SALBP-2, foram implementadas as considerações a seguir elencadas. Ressalta-se que hipóteses de base de SALBP tais como a alocação de todas as tarefas, alocação de tarefas a uma única estação e respeito a diagrama de precedências também foram observadas:

- O modelo de produto utilizado para este estudo é um modelo médio (Tabela 1). Este modelo é obtido por meio da média ponderada dos tempos de execução das tarefas, ponderados pela ocupação dos modelos de produto na linha de montagem;
- A estação desativada não pode receber e executar nenhuma tarefa;
- As tarefas originalmente alocadas nas estações de trabalho desativadas devem ser realocadas nas demais estações; logo, cada estação de trabalho ativa executa um grupo de tarefas;
- As tarefas inicialmente alocadas às estações ativas não necessitam, necessariamente, ser alocadas nas mesmas estações ativas após o rebalanceamento.

## 2.2. Variáveis e Parâmetros

Para a elaboração do modelo foram considerados os índices/parâmetros e variáveis apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Índice/Parâmetro	Tipo	Descrição
$t$	Inteiro	Índice da tarefa " $t$ "
$j$	Inteiro	Índice da tarefa sucessora da tarefa " $t$ "
$s$	Inteiro	Índice da estação de trabalho " $s$ "
$D$	Real Positivo	Duração das tarefas [ut]
$c$	Inteiro	Determina se a estação está parada ( $c=1$ , <i>closed</i> ) ou não ( $c=0$ )
$nS$	Inteiro	Número de estações de trabalho

Fonte: Os autores

Tabela 2 – Índice/Parâmetros adotados para a elaboração do modelo

Variável	Tipo	Descrição
$X_{[t,s]}$	Binário	Variável que determina se a tarefa " $t$ " será executada na estação " $s$ "
$CT$	Real Positivo	Tempo de Ciclo [ut]

Fonte: Os autores

Tabela 3 - Variáveis adotadas para a elaboração do modelo

Em adição aos elementos colocados nas Tabelas 2 e 3, ressalta-se, ainda, a existência dos conjuntos  $T$  e  $S$  que agregam, respectivamente, todas as tarefas e estações; o conjunto  $SC$ , o qual contém os pares  $\{s, c\}$  de estações ativadas ( $c = 0$ ) ou em modo degradado ( $c = 1$ ); e o conjunto  $P$  que contém os pares ordenados  $\{t, j\}$  com relações de precedência diretas entre tarefas.

## 2.3. Função Objetivo

Como descrito na seção 2, o modelo proposto objetiva a redução do tempo de ciclo ( $CT$ ) da linha analisada, Equação 1, para os quatro casos de estudo.

$$\text{minimize } z = CT \quad (1)$$

## 2.4. Restrições do Modelo

De modo a considerar as limitações físicas do sistema, bem como a respeitar as considerações e hipóteses adotadas para modelagem, foram definidos os seguintes conjuntos de restrições apresentados nas seções 2.4.1 a 2.4.3.

### 2.4.1. Alocação de Tarefas

Este conjunto de restrições dispõe de três objetivos:

- Garantir que todas as tarefas serão alocadas a alguma estação de trabalho;
- Assegurar que cada tarefa será alocada em somente uma estação de trabalho;
- Caso a estação de trabalho esteja desativada (modo degradado), garante que esta estação não receberá tarefas.

$$\sum_{\{s,c\} \in SC \mid c=1} X_{[t,s]} = 0 \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{\{s,c\} \in SC \mid c=0} X_{[t,s]} = 1 \quad \forall t \in T \quad (3)$$

A Equação 2 implica que, caso a estação esteja desativada ( $c = 1$ ), não pode haver alocação de tarefas  $t$  na estação  $s$ , ao passo que a Equação 3 implica que, para as estações ativas ( $c = 0$ ), a tarefa  $t$  pode ser alocada em somente uma estação  $s$ .

#### 2.4.2. Precedência entre Tarefas

Esse conjunto de restrições garante que uma tarefa  $j$  será alocada à estação  $s$  somente se todas as tarefas predecessoras  $t$  já tiverem sido designadas.

$$\sum_{s \in S} s \cdot X_{[t,s]} \leq \sum_{s \in S} s \cdot X_{[j,s]} \quad \forall \{t,j\} \in P \quad (4)$$

A Equação 4 assegura que todas as relações de precedência entre as tarefas apresentadas na Figura 1 sejam respeitadas, mesmo com a alocação de tarefas em estações diferentes das estações originalmente estabelecidas.

#### 2.4.3. Duração das Tarefas nas Estações

Esse agrupamento de restrições garante que o tempo total para a execução de todas as tarefas  $t$  alocadas na estação  $s$  não ultrapasse o máximo tempo de ciclo. Essa restrição influencia diretamente na função objetivo, Equação 1, visto que esta busca minimizar o tempo de ciclo.

$$\sum_{t \in T} X_{[t,s]} \cdot D_t \leq CT \quad \forall s \in S \quad (5)$$

### 3. Análise dos Resultados

Para a implementação da modelagem e resolução do modelo, foi utilizado o ambiente computacional *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8.0*, cujos dados de entrada foram fornecidos por meio de planilhas do *Microsoft Office Excel 2016*, para a simulação computacional e compilação dos resultados apresentados nesta seção. As execuções foram feitas em um Notebook DELL Inspiron 15 7560 com um processador Intel® Core™ i7-7500U com 16Gb de memória RAM.

Com base nas informações apresentadas nas seções anteriores, foi possível executar os estudos descritos na seção 2. O primeiro estudo consistiu no balanceamento e otimização da linha de produção que está implementada atualmente, por meio da abordagem matemática proposta. Os resultados são ilustrados nas Figuras 2 e 3.

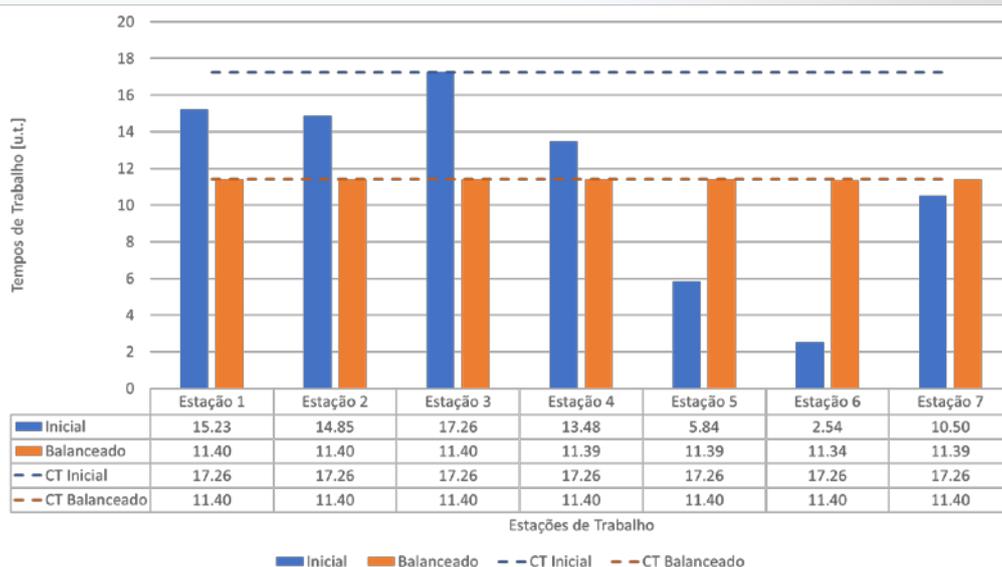


Figura 2 - Comparação dos tempos das estações de trabalho da linha atual com a linha balanceada

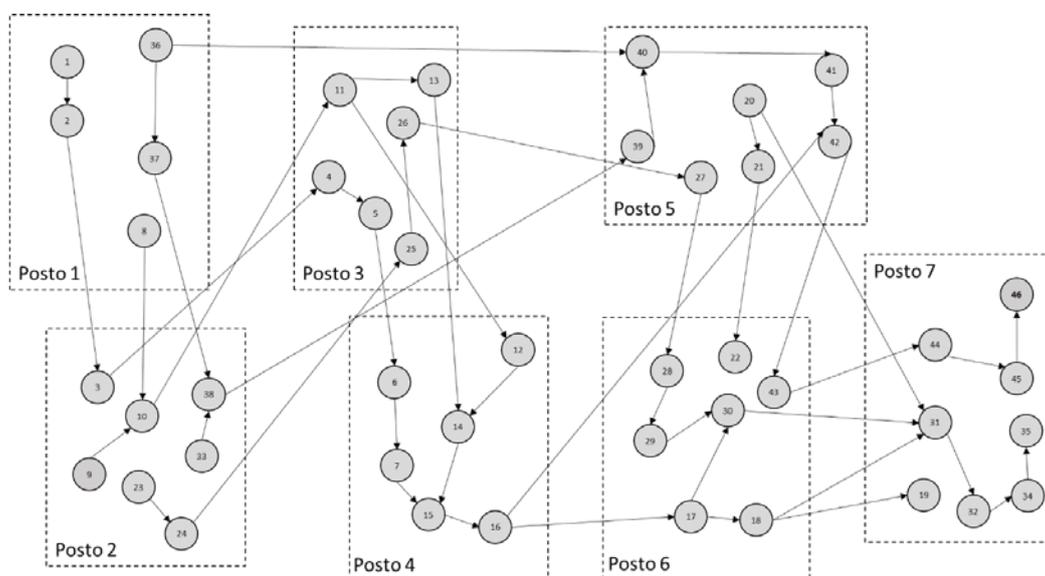


Figura 3 - Alocação das tarefas para o modelo balanceado

Com base nos resultados obtidos para o primeiro estudo de caso é possível perceber, com o auxílio das Figuras 2 e 3, que a solução sugerida pelo modelo matemático resultou em uma redução do tempo de ciclo de 17,26 u.t para 11,40 u.t. Além disso, é possível perceber que houve uma melhor distribuição das tarefas nos postos de trabalho, não em número de tarefas por estação, mas sim em tempo de execução das tarefas alocadas na estação, reduzindo a diferença entre os tempos de trabalho dos postos da estação gargalo e das estações ociosas. Como pode ser observado na Figura 3, e comparando com a Figura 1, todas as relações de precedência entre as tarefas foram respeitadas.

O segundo estudo realizado considerou a desativação da estação de trabalho com maior índice de falhas e paradas (estação 3). Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4 e 5. Como pode ser visto na Figura 4, o tempo de ciclo aumentou de 11,40 u.t para 13,30 u.t quando a estação 3 está desativada. Isso ocorre, pois todas as tarefas que seriam realizadas nesta estação devem ser realocadas nas demais estações, ou seja, há um igual

número de tarefas para serem distribuídas em um número menor de estações de trabalho. A Figura 5 apresenta a nova redistribuição das tarefas nas estações de trabalho. Vale ressaltar que nenhuma tarefa foi alocada na estação 3 e que todas as relações de precedência foram respeitadas.

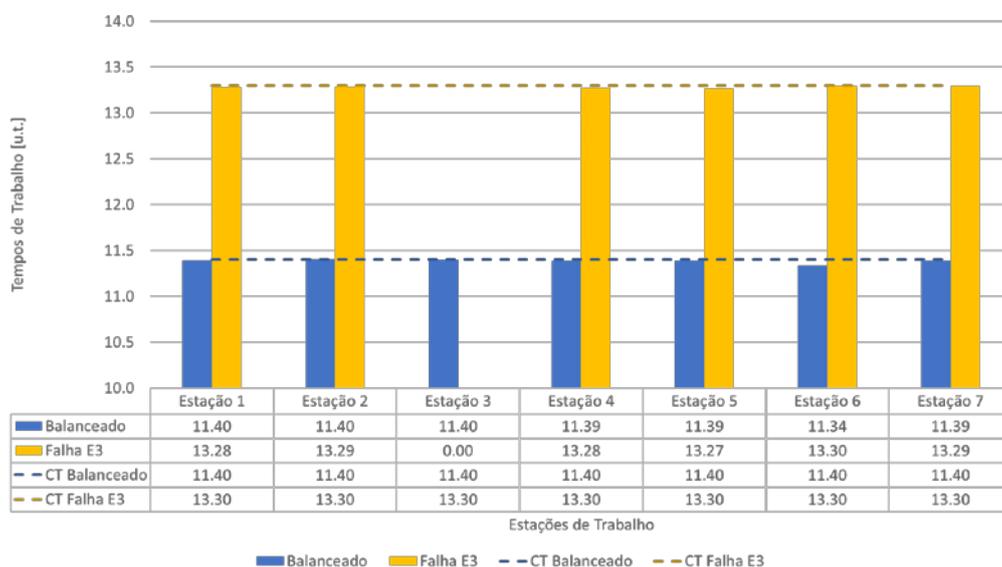


Figura 4 - Comparação dos tempos das estações de trabalho da linha balanceada com a linha balanceada sem a estação 3

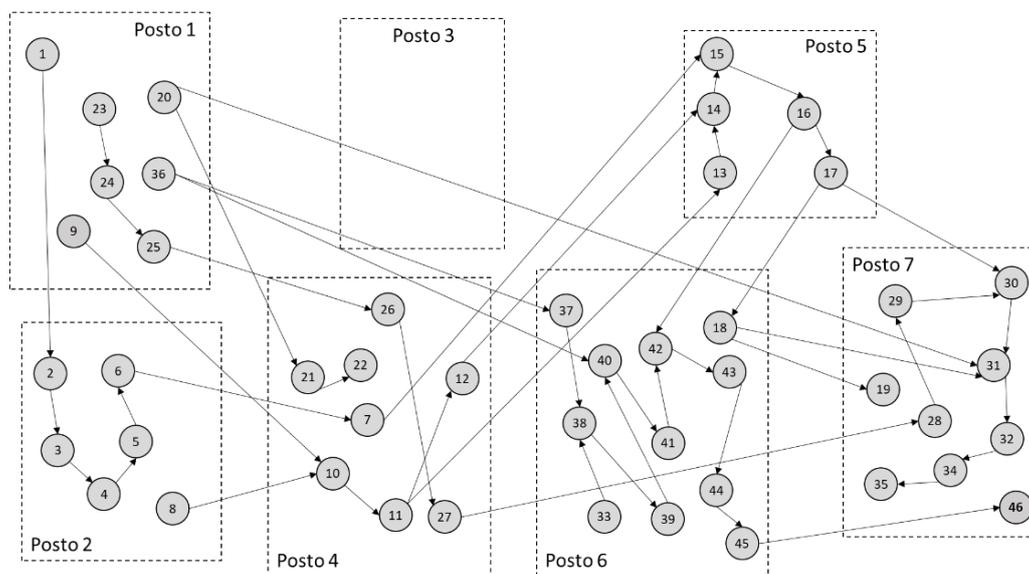


Figura 5 - Alocação das tarefas para o modelo balanceado sem a estação 3

O terceiro estudo realizado consistiu na desativação da segunda estação com maior índice de falhas e paradas (estação 1). Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 6 e 7. O tempo de ciclo aumentou de 11,40 u.t para 13,30 u.t, assim como o resultado obtido para o segundo estudo, pois tarefas das estações 1 e 3 possuem tempos de execução muito próximos. Esse aumento do tempo de ciclo ocorre pelo mesmo motivo apresentado no segundo estudo realizado (desativação da estação 3). A Figura 7 retrata a nova distribuição de tarefas nas estações de trabalho. É possível averiguar que nenhuma tarefa foi alocada à

estação 1 e que todas as relações de precedência foram respeitadas pelo modelo matemático implementado.

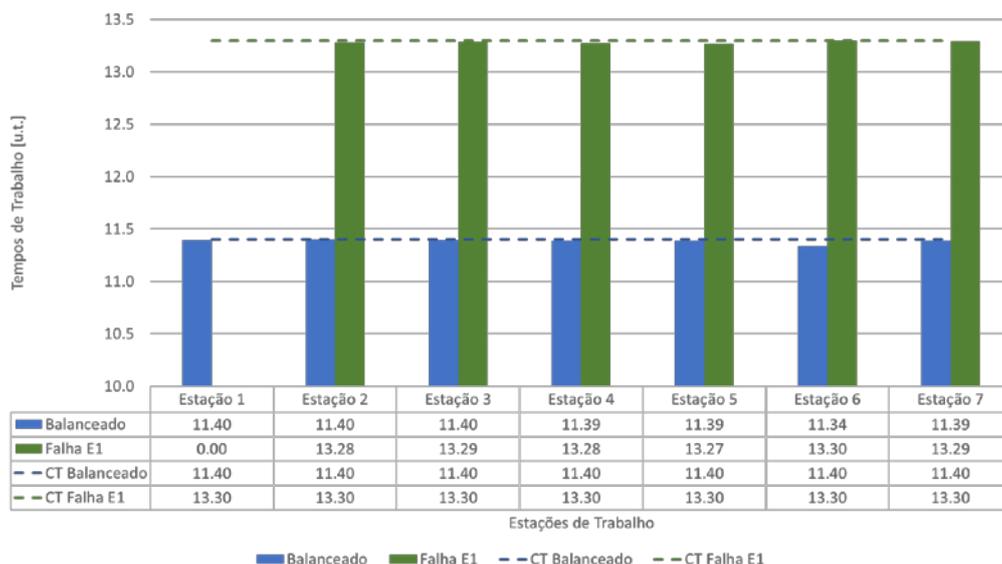


Figura 6 - Comparação dos tempos das estações de trabalho da linha balanceada com a linha balanceada sem a estação 1

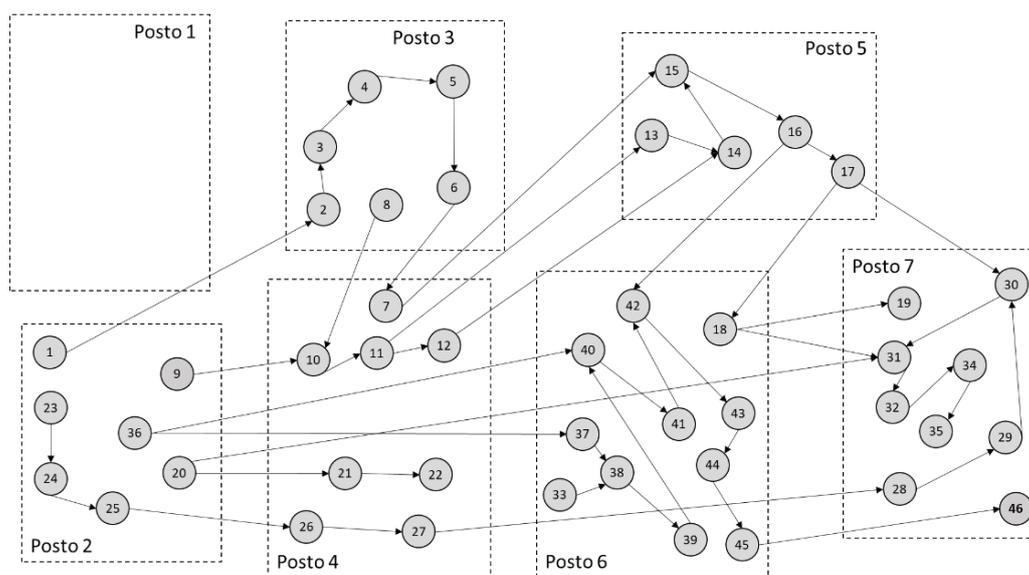


Figura 7 - Alocação das tarefas para o modelo balanceado sem a estação 1

O quarto estudo envolveu a desativação das duas estações com maior índice de falhas, estações 3 e 1, simultaneamente. Os resultados obtidos e ilustrados nas Figuras 8 e 9, são bastante semelhantes aos obtidos nos estudos previamente apresentados. Houve uma realocação das tarefas que seriam executadas nas estações 3 e 1 nas demais estações, bem como uma redistribuição de todas as demais tarefas, nas 5 estações ativas, resultando em um aumento do tempo de ciclo de 11,40 u.t para 15,95 u.t.

Como pode ser visto na Figura 9, considerando o quarto estudo realizado, nenhuma tarefa foi alocada nas estações 3 e 1, e todas as relações de precedência foram respeitadas pelo modelo matemático, assim como no segundo e terceiro estudos.

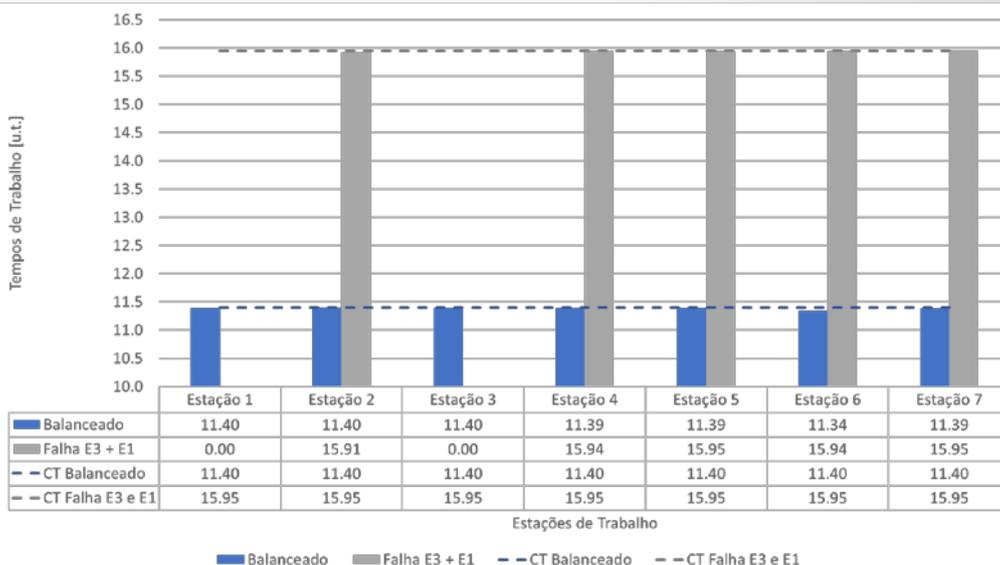


Figura 8 - Comparação dos tempos das estações de trabalho da linha balanceada com a linha balanceada sem as estações 3 e 1

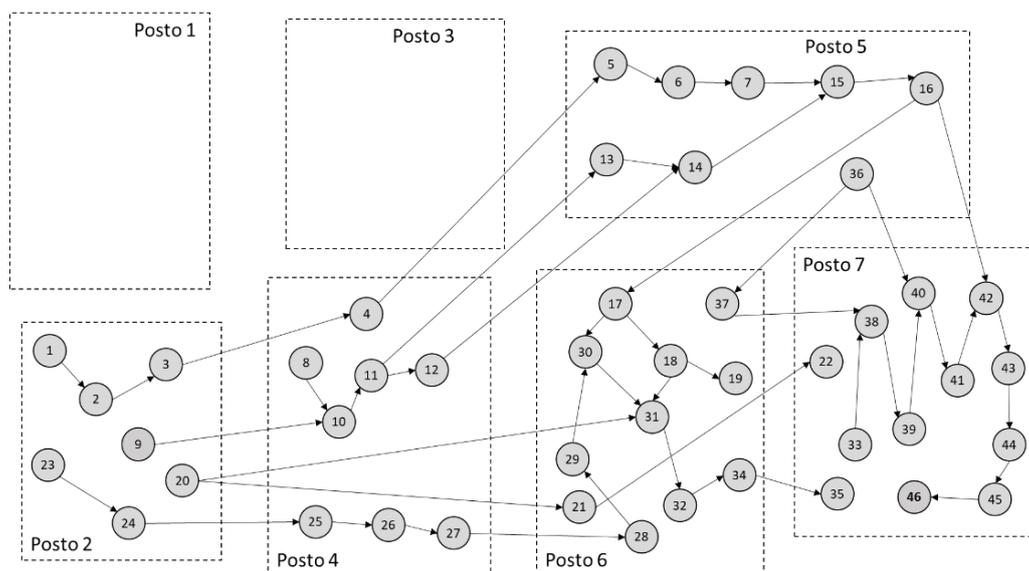


Figura 9 - Alocação das tarefas para o modelo balanceado sem as estações 3 e 1

#### 4. Conclusões

A otimização da operação de linhas produtivas por meio de técnicas de balanceamento de linhas e redução de estações gargalo é um objetivo comum em diversas linhas em operação, nos mais variados ramos de produção. O presente trabalho focou na necessidade de uma reorganização da distribuição de tarefas nos postos de trabalho em uma linha produtiva em função de paradas e/ou falhas nos postos (rebalanceamento). Para tanto, um modelo matemático baseado em modelos do tipo SALBP-2 foi utilizado para propor uma realocação das tarefas presentes na linha de montagem em estudo, mesmo sob condições em que estações estejam desativadas (modo degradado de operação). O balanceamento inicial da linha mostrou uma melhora no tempo de ciclo de 17,26 u.t. para 11,40 u.t, com uma redistribuição das tarefas nas estações de trabalho. Nos casos de modo degradado de operação avaliados, o tempo de ciclo da linha foi maior do que a condição otimizada operando

com a totalidade de suas estações visto que o número de tarefas a serem realizadas no trecho de linha analisado continuou o mesmo, ao passo que o número de estações de trabalho reduziu de 7 para 6 no segundo e terceiro estudos realizados e para 5 no último estudo, aumentando a quantidade de tarefas alocadas em cada estação ativa e, conseqüentemente, o tempo de execução das tarefas nas estações. Isso levou ao aumento do tempo de ciclo da linha, contudo, o modelo obteve soluções de balanceamento com grande equilíbrio de carga de trabalho das estações ativas.

Como trabalhos futuros, considera-se a expansão do modelo matemático para considerar uma linha de montagem de modelo-misto, e não uma simplificação de modelo médio, como considerado neste trabalho. Outra possibilidade é a inclusão de estações de trabalho multi-operadas, ou seja, com vários operadores atuando no mesmo posto. Essa nova abordagem seria capaz de considerar a parada de uma parte da estação de trabalho, e não a estação como um todo, permitindo a realocação das tarefas para serem executadas por outros operadores da mesma estação. Ressalta-se, adicionalmente que, nas soluções de balanceamento obtidas, as estações não mantiveram, necessariamente, a mesma distribuição de tarefas da solução de balanceamento inicial. Como futuro desenvolvimento do trabalho, objetiva-se realizar modificações no modelo matemático de modo a minorar as diferenças em relação à solução originalmente apresentada nas estações ativas. Deste modo, as modificações para a adoção de soluções de rebalanceamento na linha tendem a ser minimizadas. Outro objetivo a ser alcançado é o aprimoramento do modelo em relação à hipótese que estabelece que as tarefas inicialmente alocadas às estações ativas não necessitam, necessariamente, ser alocadas nas mesmas estações ativas após o rebalanceamento. Faz-se desejável minimizar a quantidade de alterações realizadas na linha para a adoção da solução de rebalanceamento.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação Araucária (Chamada CP 01/2018 – FA & RENAULT, Programa de bolsas de Graduação, Mestrado e Doutorado UTFPR / Fundação Araucária / Renault – 2018) e ao CNPq (Projetos 406507/2016-3 e 307211/2017-7).

### Referências

BATTAIA, O.; DOLGUI, A. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. **Int. J. Production Economics**, p. 259-277, 2013.

BAYBARS, I. A survey of exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. **Management Science**, v.32, n.8, 1986.

BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, p.694-715, 2003.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. A versatile algorithm for assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, p. 39-56, 2008.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, p. 674-693, 2007.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. Ed.Cengage Learning, 2002.

IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.8.0 documentation**. Disponível em: <[https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/beta/ro/SSSA5P\\_12.8.0/ilog.odms.studio.help/Optimization\\_Studio/topics/COS\\_home.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/beta/ro/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.studio.help/Optimization_Studio/topics/COS_home.html)> Acesso em: 17 ago. 2019.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**. São Paulo: Ed. Pearson Prentice Hall, 2009.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. Otimização das Operações de um Poliduto Através de Programação Linear Inteira Mista. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL**. Campos do Jordão, 2001.

ROCHA, M. M. **Origens do Modo Degradado de Funcionamento em Sistemas de Produção Offshore**. Rio de Janeiro, 110 p., 2014. Dissertação (Mestrado) - COPPE-UFRJ.

SAMOUEI, P.; ASHAYERI, J. Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations. **Applied Mathematical Modelling**, p. 259-275, 2019.

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**, p. 949-971, 2017.

THOMOPOULOS, N. T. Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments. **Management Science**, v.16, n.9, 1970.

YIN, F. J.; AZIZ, F. A. Line Balancing Technique Improves Productivity At Chipset Testes Assembly Manufacturing: A Review. **Journal of Advanced Research in Manufacturing, Material & Metallurgical Engineering**, v.5, n.4, p. 1-6, 2018.