



UMA ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO PARA BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Yuri Prado de Souza

Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Campus de Guaratinguetá - Faculdade de Engenharia
yuriprado.uff@gmail.com

Edson Luiz França Senne

Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Campus de Guaratinguetá - Faculdade de Engenharia
edson.senne@unesp.br

RESUMO

O problema de balanceamento de linhas de montagem é a busca pela melhor distribuição de tarefas associadas à fabricação de um produto em estações de trabalho, a fim de obter uma homogeneidade de carga entre as estações e respeitar restrições tecnológicas. Este artigo discute a possibilidade de aumentar a produção e produtividade em uma linha de montagem, fazendo aumentos escalonados em sua velocidade de operação (tempo de ciclo). No entanto, sem um bom balanceamento da carga de trabalho, a mudança no tempo do ciclo pode causar transtornos sistemáticos na execução das tarefas e aumentar as perdas de produção. Desta forma, o trabalho propõe uma abordagem de otimização que minimiza o tempo de ciclo e equaliza as cargas de trabalho na linha de montagem. O artigo apresenta um estudo de caso sobre uma linha de montagem de uma fábrica de automóveis produzindo painéis para quatro tipos de veículos, na qual a estratégia proposta foi adotada.

PALAVRAS-CHAVE. Balanceamento de linhas de montagem; Tempo de ciclo; Otimização.

Tópicos. PO na Indústria, Programação Matemática.

ABSTRACT

The assembly line balancing problem is the search for the best distribution of tasks associated to the manufacture of a product in workstations, in order to obtain a homogeneity of loads between the stations and to respect technological restrictions. This paper discusses the possibility of increasing production and productivity in an assembly line, making staggered increases in its speed of operation (cycle time). However, without a good workload balancing, the change in cycle time can cause systematic upsets in tasks execution and to increase production losses. In this way, the paper proposes an optimization approach that minimizes the cycle time and equalizes the workloads at the assembly line. The paper presents a case study on an assembly line of an automobile factory producing panels for four types of vehicles, in which the proposed strategy was adopted.

KEYWORDS: Assembly line balancing; Cycle time; Optimization.

Paper topics. OR in Industry, Mathematical Programming.



1. Introdução

O problema de balanceamento de linha de montagem (*Assembly Line Balancing Problem* - ALBP) é a busca pela melhor distribuição de tarefas associadas à fabricação de um produto em estações de trabalho, para obter uma homogeneidade de cargas entre as estações e respeitar as restrições tecnológicas. Entende-se como restrições tecnológicas, a imposição de execução de tarefas em um determinado perímetro da linha de produção devido a condições ergonômicas, relações de precedência com outras operações, ou disponibilidade de equipamentos [Araújo *et al.* 2012]. O problema de balanceamento de linha de montagem simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP) refere-se, em geral, a obter os menores tempos de ciclo ou a menor quantidade de estações de trabalho para a linha de produção.

Segundo [Becker e Scholl 2006] a variabilidade dos tempos das tarefas é importante para o ALBP. Para [Boysen *et al.* 2008] é sugestivo considerar os tempos das tarefas como probabilísticos, devido às variações da velocidade manual dos operários e do mix de produtos. Para [Otto e Otto 2014] se as operações utilizam máquinas avançadas ou robôs, ou os operadores são altamente qualificados, os tempos das tarefas podem ser considerados constantes. Em muitas situações reais, especialmente em linhas de montagens manuais, a variação do tempo de operação é definida por uma distribuição de probabilidade.

[Sivasankaran e Shahabudeen 2014] classificam os problemas de balanceamento em quatro tipos, cujas variações referem-se aos tempos de execução das operações e às variáveis de decisão na função-objetivo do problema. O SALBP, abordado neste artigo, considera os tempos de operação como determinísticos e uma função-objetivo com apenas uma variável de decisão. As outras situações possíveis ocorrem quando os tempos de operação são estocásticos ou quando o problema é multi-objetivo.

Os problemas de balanceamento de linhas de montagem são classificados como NP-difíceis, o que significa que a complexidade computacional do problema aumenta exponencialmente com seu tamanho [Akpınar e Bayhan 2011]. Segundo [Rashid *et al.* 2012], os métodos mais frequentemente adotados para a solução destes problemas são heurísticos, como algoritmos genéticos [Hamta *et al.* 2013] e algoritmos de colônia de formigas [Purnomo *et al.* 2013]. A otimização multi-objetivo e otimização estocástica são ferramentas que também têm sido recentemente utilizadas [Battaia e Dolgui 2013].

Para [Özcan 2010], os processos industriais de montagem consecutiva de componentes para produzir um produto final são apropriados para produzir produtos homogêneos, com alta repetibilidade e baixo custo. No entanto, para estes processos, a disposição das tarefas é determinante para o desempenho e a viabilidade dos sistemas de produção e, devido à constante adaptabilidade exigida pelo ambiente produtivo, o balanceamento de operações exige grandes esforços daqueles envolvidos nos processos produtivos.

Em uma linha de montagem as possibilidades de arranjo das operações crescem conforme a complexidade do produto e as características físicas dos sistemas de produção [Hu *et al.* 2011]. O processamento de grandes quantidades permite alta repetitividade de operações e diminuição dos tempos de ociosidade, dos tempos de ciclo e dos custos [Costantino *et al.* 2012].

Por outro lado, atualmente, como apontam [Fogliatto *et al.* 2012], a customização em massa é uma importante estratégia de produção, exigindo das empresas flexibilidade e agilidade nos processos produtivos. A customização em massa exige um conhecimento específico do produto e de seu processo de fabricação para que seja possível aliar a diversidade gerada pela customização a fatores industriais que viabilizam o processamento em massa. A flexibilidade e a agilidade de sistemas de produção tem sido objeto de estudo em todo o mundo. As condições que viabilizam um sistema adaptar-se às variações de mercado, industrializar um novo processo ou lidar com cenários inesperados da cadeia de suprimentos são de extrema importância para a rentabilidade das empresas [Manavizadeh *et al.* 2013].



Segundo [Boysen *et al.* 2007] uma pequena porcentagem das empresas utiliza ferramentas matemáticas para a configuração do balanceamento de suas linhas de montagem. Este cenário ainda perdura nos tempos atuais e o balanceamento, em geral, é realizado com base na experiência das pessoas envolvidas e sem a utilização de métodos de otimização.

Este artigo visa discutir a possibilidade de aumento de produção e de produtividade em uma linha de montagem, realizando aumentos sensíveis e escalonados em sua velocidade de operação. A estratégia parte do princípio de que para evitar paradas na linha de montagem, intuitivamente os operadores acompanham o aumento sensível na velocidade de produção e também aumentam sua velocidade de trabalho. Contudo, sem um bom balanceamento da carga de trabalho, a alteração do tempo de ciclo pode causar transtornos sistemáticos na execução das tarefas e perdas de produção em proporções maiores do que no cenário anterior. Desta forma, o artigo propõe uma abordagem de otimização que minimiza o tempo de ciclo e equaliza as cargas de trabalho na linha de montagem.

O artigo apresenta um estudo de caso em uma linha de montagem de painéis de uma fábrica de automóveis, em que a estratégia proposta foi adotada. A abordagem proposta foi utilizada nas condições iniciais do balanceamento para fornecer os parâmetros ótimos antes dos aumentos de velocidade de uma linha de montagem que produz quatro tipos de veículos.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta um exemplo ilustrativo do problema de balanceamento de linha de montagem simples; a Seção 3 apresenta a formulação de um modelo de otimização para o problema, visando minimizar o tempo de ciclo; a Seção 4 apresenta o estudo de caso e os resultados obtidos por meio do modelo de otimização proposto; finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho e possíveis direções para futuras pesquisas.

2. Um exemplo ilustrativo do problema de balanceamento

Nesta seção, apresenta-se um exemplo ilustrativo de uma linha de montagem industrial que produz painéis para alguns tipos de veículos. Neste exemplo, considera-se que 86 tarefas devem ser processadas em 4 estações de trabalho para a produção de diferentes painéis para 4 tipos de veículo. Seja a seguinte notação:

n - número de tarefas;

m - número de estações de trabalho;

nv - número de tipos de veículos;

CT - tempo de ciclo da linha de montagem;

$V = \{v_i, i = 1, \dots, nv\}$ - conjunto de tipos de veículos;

$W = \{w_k, k = 1, \dots, m\}$ - conjunto de estações de trabalho;

$I = \{1, \dots, n\}$ - conjunto de tarefas;

$K = \{1, \dots, m\}$ - conjunto de índices das estações de trabalho;

pt_i - tempo de processamento da tarefa $i \in I$ em qualquer estação de trabalho;

$P = \{(i, j), i, j \in I, i \neq j\}$ - conjunto de relações de precedência entre tarefas, ou seja, se $(i, j) \in P$, então a tarefa j não pode ser processada antes da tarefa i .

Nesta linha de montagem, cada tarefa deve ser processada em apenas uma estação de trabalho. A soma dos tempos de processamento das tarefas processadas em qualquer estação de trabalho deve ser menor ou igual ao tempo de ciclo CT . Considere que a tarefa $i \in I$ é processada na estação de trabalho $w_k \in W$ e a tarefa $j \in I$ é processada na estação de trabalho $w_t \in W$. Se $(i, j) \in P$, então: (a) $k < t$, ou (b) $k = t$ e a tarefa i é processada antes da tarefa j .



A Tabela 1 ilustra parte das tarefas associadas ao tipo de veículo v_1 nesta linha de montagem e os correspondentes tempos de processamento (em segundos).

Tabela 1 - Algumas tarefas associadas ao tipo de veículo v_1

Tarefa i	Descrição da tarefa	pt_i
1	Setup dos pinos-guia do lado direito	5
2	Setup dos pinos-guia do lado esquerdo	5
3	Identificação do posicionamento do painel sob os pinos-guia	1
4	Posicionamento do painel sob os pinos-guia	12
5	Fixação do ar condicionado na travessa do painel	8
6	Fixação do ar condicionado no apoio inferior do painel	4
7	Montagem do controle do ar condicionado no painel	5

Considere que essas tarefas devem ser processadas nas estações de trabalho w_1 , w_2 e w_3 , e que para essas tarefas, $P = \{ (1, 3), (2, 3), (3, 4), (4, 5) \}$. A Figura 1 mostra uma possível atribuição destas tarefas às estações de trabalho, onde as linhas tracejadas separam as três estações de trabalho.

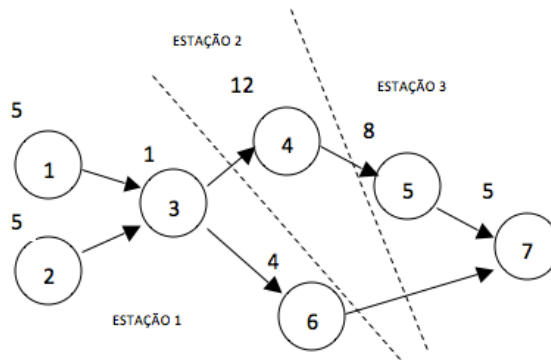


Figura 1 - Grafo de representação da atribuição de tarefas

Neste caso, o tempo total de processamento (Tpt) em cada estação de trabalho será:

$$Tpt(w_1) = 5 + 5 + 1 + 4 = 15 \text{ segundos.}$$

$$Tpt(w_2) = 12 \text{ segundos.}$$

$$Tpt(w_3) = 8 + 5 = 13 \text{ segundos.}$$

Para este exemplo, se a tarefa 3 for atribuída à estação de trabalho w_2 , como mostrado na Figura 2, o tempo de processamento nas estações se equilibra e o tempo de ciclo diminui de 15 para 14 segundos.

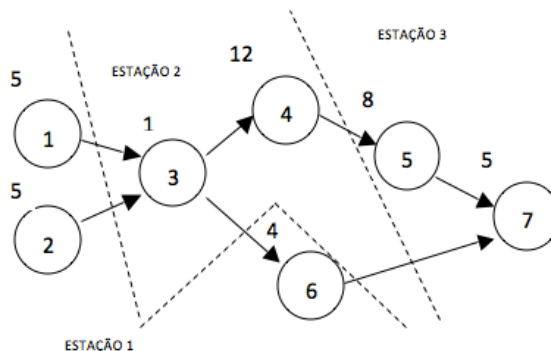


Figura 2 - Grafo de representação da nova atribuição de tarefas



$$Tpt(w_1) = 5 + 5 + 4 = 14 \text{ segundos.}$$

$$Tpt(w_2) = 1 + 12 = 13 \text{ segundos.}$$

$$Tpt(w_3) = 8 + 5 = 13 \text{ segundos.}$$

A atribuição ótima de todas as 86 tarefas nas 4 estações de trabalho para todos os 4 tipos de veículos, respeitando todas as relações de precedência entre tarefas, com o objetivo de minimizar o tempo de ciclo, não é uma tarefa trivial. Para isto, propõe-se que as tarefas sejam atribuídas às estações de trabalho por um modelo de otimização, como descrito nas seções a seguir.

3. Um modelo de otimização para balanceamento de linhas de montagem

Existem diferentes formas de medir a eficiência de linhas de montagem. A forma mais usada refere-se a uma relação entre tempo de ciclo, tempos de operação e número de estações de trabalho. Considere as seguintes definições:

AT - tempo de produção disponível;

IT_k - tempo ocioso para a estação de trabalho $w_k \in W$. Observar que IT_k é a diferença entre o tempo de ciclo (CT) e o tempo total de processamento na estação de trabalho w_k , ou seja, $Tpt(w_k)$.

As seguintes relações podem ser estabelecidas:

$$CT = \frac{AT}{np} \quad (1)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n pt_i + TIT}{CT} \quad (2)$$

$$\mu = 1 - \frac{TIT}{CT \times m} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n pt_i \times (1 + EIT)}{CT \times m} \quad (4)$$

$$OE = \frac{AT - UT}{AT} \quad (5)$$

A equação (1) relaciona o tempo de ciclo (CT) com o tempo de produção disponível (AT) e o número de produtos a serem fabricados (np). A equação (2) relaciona a quantidade de estações de trabalho (m) com os tempos de processamento das tarefas (pt_i), o tempo ocioso total das estações

de trabalho $TIT = \sum_{k=1}^m IT_k$ e o tempo de ciclo (CT). A equação (3) calcula a eficiência teórica da

linha de montagem (μ) em função do tempo ocioso total das estações de trabalho (TIT), do tempo de ciclo total ($CT \times m$). A equação (4) calcula uma estimativa para a eficiência da linha de montagem (η) em função do tempo de processamento das tarefas (pt_i), de uma estimativa para o tempo de ociosidade (EIT) e do tempo de ciclo total ($CT \times m$). As equações (3) e (4) mostram que diminuir o tempo ocioso total das estações de trabalho (ou seja, atribuir mais tarefas para as estações de trabalho) aumenta a eficiência teórica e a eficiência estimada da linha de montagem,



assim como, diminuir o tempo de ciclo (aumento da velocidade de trabalho) ou diminuir a quantidade de estações de trabalho também provocam aumento na eficiência. Usualmente, utiliza-se a equação (3) em situações onde é possível realizar a cronometragem exata dos tempos de processamento das tarefas (pt_i) e dos tempos de ociosidade das estações de trabalho (IT_k). Para os casos em que estes tempos precisam ser estimados, frequentemente emprega-se a equação (4) e neste caso, EIT é um percentual do total dos tempos de processamento (pt_i). A equação (5) calcula o rendimento operacional da linha de montagem (OE) em função do tempo de produção disponível (AT) e do tempo em que a linha ficou sem produção devido a perdas não planejadas (UT), por exemplo, quebra de equipamentos, tratamento de defeitos de qualidade, conclusão de tarefas não finalizadas em uma estação de trabalho, etc.

O modelo proposto para atribuição de tarefas às estações de trabalho visando minimizar o tempo de ciclo da linha de montagem é formulado como:

$$\text{Min } CT \quad (6)$$

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^m k x_{ik} \leq \sum_{t=1}^m t x_{jt} \quad \forall (i, j) \in P \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n pt_i x_{ik} \leq CT \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$CT \geq 0 \quad (11)$$

onde $x_{ik} = 1$ se a tarefa $i \in I$ for atribuída à estação de trabalho $w_k \in W$; caso contrário, $x_{ik} = 0$.

A restrição (7) assegura que qualquer tarefa será atribuída a apenas uma estação de trabalho. A restrição (8) garante que, para qualquer par de tarefas (i, j) para as quais existe uma relação de precedência em que a tarefa j não pode ser processada antes da tarefa i , o índice da estação de trabalho que processa a tarefa i deve ser menor ou igual ao índice da estação de trabalho que processa a tarefa j . A restrição (9) limita que o tempo total de processamento em cada estação de trabalho não exceda o tempo de ciclo da linha de montagem. As restrições (10) e (11) estabelecem o domínio das variáveis de decisão.

4. Um estudo de caso

Neste estudo de caso, considera-se uma linha de montagem que fabrica painéis para 4 tipos de veículos. Com um tempo de ciclo inicial $CT = 154,2$ segundos, a linha tem uma capacidade produtiva $PC = 196$ unidades, considerando-se uma jornada de trabalho de 8 horas e 24 minutos. Esta linha de montagem deseja aumentar sua velocidade de produção para 139,2 segundos, de modo a gerar uma capacidade produtiva de 217 unidades por turno de trabalho. Contudo, o aumento na velocidade de trabalho sem uma redistribuição das operações pode gerar um aumento no tempo de parada UT da linha de montagem, diminuindo o rendimento operacional OE . Dessa forma, os ganhos gerados pelo aumento na velocidade inicial podem ser perdidos, devido às perdas de produção.



A estratégia adotada pela montadora de veículos previu realizar aumentos sucessivos, sensíveis e escalonados em sua velocidade a partir do segundo semestre de produção do ano de 2016, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Aumento escalonado no tempo de ciclo

Cenário	CT	PC
C1	154,2	196
C2	151,8	199
C3	148,8	203
C4	145,8	207
C5	142,8	212
C6	139,2	217

Nesta seção serão analisadas as condições iniciais e o comportamento de 4 estações de trabalho críticas desta linha de montagem por meio da utilização do modelo de otimização proposto, considerando-se os aumentos na velocidade de trabalho. A Tabela 3 mostra a distribuição de tarefas nas 4 estações de trabalho para cada um dos tipos de veículo. Nesta tabela nt corresponde ao número de tarefas referentes a cada tipo de veículo, atribuídas à estação de trabalho e Tpt corresponde ao tempo de processamento total destas nt tarefas naquela estação de trabalho.

Tabela 3 - Distribuição de tarefas nas estações de trabalho para cada tipo de veículo

Veículo	v_1		v_2		v_3		v_4	
	nt	Tpt	nt	Tpt	nt	Tpt	nt	Tpt
w_1	22	91	14	112	14	115	21	91
w_2	14	78	15	97	12	51	14	78
w_3	17	95	20	153	15	109	16	98
w_4	32	174	26	174	22	113	33	174
Total	86	438	75	536	63	388	84	431

Pela Tabela 3, pode-se observar que para o veículo v_2 em w_3 haverá dificuldade para que as tarefas sejam concluídas (o tempo necessário, 153 segundos, é muito próximo do tempo de ciclo) e que para os veículos v_1 , v_2 e v_4 em w_4 , haverá transtornos para que as tarefas sejam finalizadas, visto que os tempos de processamento destas tarefas são superiores ao tempo de ciclo inicial da linha (154,2 segundos).

Na Figura 3, considera-se que os tempos de processamento das tarefas são acrescidos por um tempo de ociosidade estimado EIT de 20%.

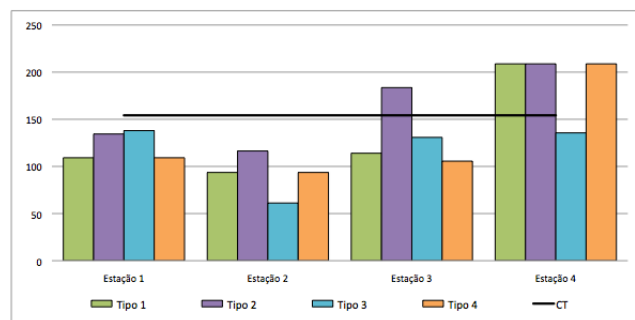


Figura 3 - Tempos de processamento iniciais com ociosidade



Como se observa na Figura 3, considerando o tempo de ociosidade será crítica a produção dos veículos v_1 , v_2 e v_4 na estação w_4 . Pode-se imaginar duas possibilidades sobre o que ocorrerá nesta estação. A primeira possibilidade será o operador se esforçar para completar suas tarefas dentro do tempo de ciclo e, assim, não gerar interrupção da linha de montagem. Na segunda possibilidade, mesmo que o operador se esforce, a linha de montagem será interrompida e o valor de UT irá aumentar contribuindo negativamente para o rendimento operacional. Além de gerar perdas não desejadas de produção, uma distribuição não homogênea das cargas de trabalho submete os operadores a elevados níveis de estresse e comprometem a qualidade do produto em uma linha de montagem [Scholl e Becker 2006].

Utilizando o modelo de otimização proposto é possível redistribuir as tarefas nas estações de trabalho de forma a obter uma carga mais homogênea entre elas e minimizar os potenciais problemas nas estações w_3 e w_4 . Para a solução do modelo utilizou-se o software XPRESS IVE 32bit 7.9 e um processador Corel II Due. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4. A linha Xpress nesta tabela mostra os tempos de solução do modelo (em segundos).

Tabela 4 - Distribuição otimizada de tarefas

Veículo	v_1		v_2		v_3		v_4	
	nt	Tpt	nt	Tpt	nt	Tpt	nt	Tpt
w_1	25	110	18	123	21	97	22	108
w_2	19	109	21	123	20	97	19	108
w_3	20	110	17	123	10	97	23	107
w_4	22	109	19	123	12	97	20	108
Total	86	438	75	492	63	388	84	431
Xpress	11,7		3,5		1,1		8,2	

Um valor de ineficiência representado pelo tempo de ociosidade (IT) é inerente a todos os processos produtivos. Este valor representa o tempo em que os operadores estão se deslocando, movimentando peças, manuseando determinada embalagem ou ferramenta, preparando *setups* e corrigindo pequenos desvios de produção.

Para este estudo de caso, a empresa em questão assume como estimativa que o tempo de ociosidade deste perímetro de produção é de 20%. Isto significa que o tempo de ciclo real deve ser 20% maior do que o tempo de processamento das tarefas (tp_i). Pelo modelo de otimização, o veículo v_2 obteve o maior tempo de ciclo: 123 segundos. Levando-se em conta a estimativa para o tempo de ociosidade, o tempo de ciclo ótimo sinalizado pelo modelo é de 147,6 segundos. A Figura 4 mostra os tempos de processamento otimizados acrescidos da estimativa de ociosidade. Os limites sinalizados nesta figura como CT do cenário C1 e CT do cenário C6 representam, respectivamente, os tempos de ciclo inicial (154,2 segundos) e final (139,2 segundos).

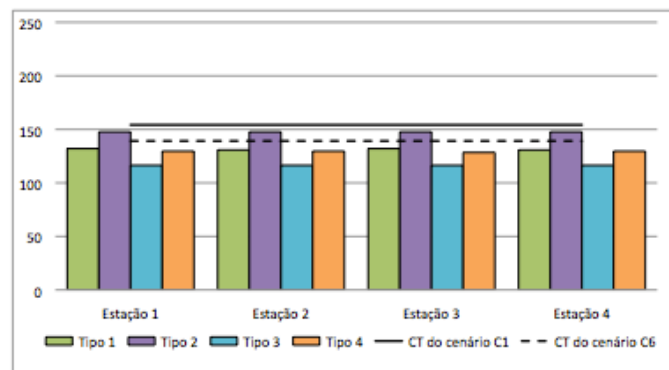


Figura 4 - Tempos de processamento otimizados com ociosidade



Pode-se notar na Figura 4 que as interrupções de produção que poderiam ocorrer no cenário C1 foram eliminadas com o balanceamento obtido pelo modelo de otimização proposto. O balanceamento otimizado também enfrenta os cenários de aumento de velocidade C2 a C5 sem problemas de interrupção na linha de montagem. No entanto, para o veículo v_2 , considerando a ociosidade, haverá tempos de processamento superiores ao tempo de ciclo desejado no cenário C6.

Se por um lado a eficiência teórica não leva em conta os níveis de produção de um sistema, pois não considera o tempo atribuído às perdas não planejadas, o rendimento operacional relaciona o quanto se produziu com a capacidade máxima de produção no mesmo período, e assim os indicadores se completam. Um alto rendimento operacional com uma eficiência teórica baixa significa que o sistema de produção é eficaz, mas consome recursos demasiados. Em contrapartida, uma alta eficiência teórica pode não ser viável operacionalmente.

As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento do tempo de ciclo, eficiência teórica e rendimento operacional para os cenários C1 a C6.

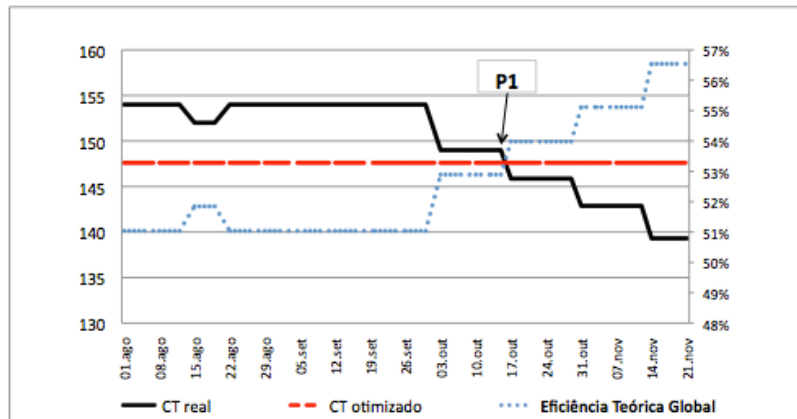


Figura 5 - CT x Eficiência teórica

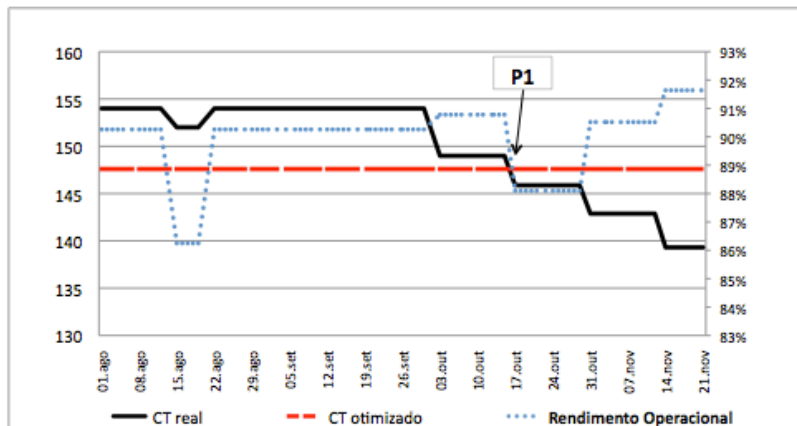


Figura 6 - CT x Rendimento operacional

O nível de eficiência teórica aumenta quando diminui-se o tempo de ciclo em uma linha de montagem e espera-se que o ponto ótimo entre eficiência teórica e rendimento operacional ocorra quando um aumento na eficiência teórica gere uma pequena queda no rendimento operacional. Tal situação ocorre no ponto P1 (Figura 5), que corresponde ao valor do tempo de ciclo obtido pelo modelo de otimização.

No entanto, depois do ponto P1 (Figura 6), o rendimento operacional aumenta novamente, situação que não deveria ocorrer e que reforça a percepção de que os tempos de montagem em uma linha de produção apresentam um comportamento probabilístico.



Os fatores qualitativos não serão abordados neste estudo, contudo é importante citar que foram fundamentais durante o processo descrito. Ações como mobilização das lideranças operacionais, seleção dos operadores com maior habilidade em estações de trabalho críticas, promoção da capacidade do corpo técnico e exposição clara dos objetivos fizeram parte da estratégia adotada.

A Tabela 5 mostra que os sucessivos aumentos de velocidade aumentaram os níveis de eficiência teórica (η), rendimento operacional (OE) e diminuíram a ociosidade para todos os cenários considerados.

Tabela 5 - Síntese dos resultados

Cenário	CT	η média	OE médio	EIT médio
C1	154,2	51,04%	90,26%	29,11%
C2	151,8	51,85%	86,25%	27,99%
C3	148,8	52,89%	90,78%	26,54%
C4	145,8	53,98%	88,10%	25,03%
C5	142,8	55,12%	90,52%	23,45%
C6	139,2	56,54%	91,64%	21,47%

Nesta tabela, a eficiência teórica média, o rendimento operacional médio e a ociosidade média correspondem a média para todos os tipos de veículos em todas as estações de trabalho, para cada cenário. Um limite a ser observado refere-se ao maior tempo de processamento ótimo entre todos os veículos sinalizado pelo modelo de otimização, que no caso é de 123 segundos para o veículo v_2 . O tempo de ciclo nunca poderá alcançar este valor, visto que, por menor que seja, sempre existirá o tempo de ociosidade. Um segundo limite refere-se ao primeiro limite acrescido do tempo de ociosidade, estimado em 20%.

Como o tempo de ciclo real foi menor do que o tempo de ciclo ótimo, o tempo de ociosidade é diferente do valor estimado. Como o tempo de ciclo real da linha em C6 foi de 139,2 segundos e o tempo de processamento puro foi de 123 segundos, o percentual de ociosidade para o veículo v_2 é de 11,63% e não de 20%. A Figura 7 mostra a ociosidade real para cada tipo de veículo, considerando as velocidades inicial (cenário C1) e final (cenário C6) da linha de montagem. Pode-se observar como a estratégia de aumentos sucessivos de velocidade, com homogeneidade de cargas de trabalho, foi capaz de diminuir o tempo de ociosidade da linha.

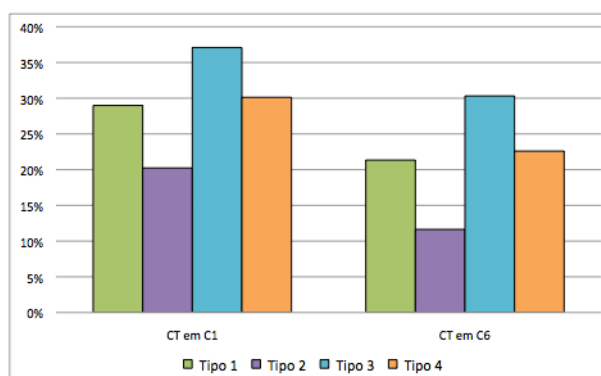


Figura 7 - Ociosidade nos cenários inicial e final

5. Conclusão

Algumas conclusões específicas do estudo de caso podem ser extraídas deste trabalho:

- O aumento da eficiência operacional será instável ao longo do tempo visto que o tempo de ociosidade para o veículo v_2 está abaixo dos demais, contrariando o princípio de equidade



de cargas. Pode-se dizer que embora o tempo de ociosidade seja indesejável, a variação de valores de tempo de ociosidade para veículos diferentes também o seja.

- O sistema aponta que seu estado de equilíbrio entre a eficiência teórica e o rendimento operacional está entre os tempos de ciclo de 145 e 148 segundos.
- A homogeneidade das cargas de trabalho, balanceada pelo modelo de otimização proposto, viabiliza a estratégia de aumento sucessivo e escalonado de velocidade da linha de montagem, com ganhos de 5,5% em eficiência teórica e 1,38% em rendimento operacional.

Como conclusões gerais podem ser citadas as seguintes:

- O modelo de otimização proposto foi capaz de equilibrar as cargas dos tempos de processamento de forma eficiente, eliminando problemas no balanceamento existente e viabilizando a estratégia de produção desejada.
- A utilização do modelo de otimização fornece uma referência para os tempos de ciclo ótimos para cada tipo de veículo em cada estação de trabalho, além de valores globais dos limites de velocidades da linha de montagem. Desta forma, a utilização de modelos de otimização no balanceamento de linhas de montagem pode tornar viável a implantação de estratégias de produção.

Com aplicação prática do modelo, conforme esperado, foi necessário um período de adaptação às novas tarefas e, com isso, foram observadas paradas na linha de montagem maiores do que o esperado. Após a adaptação, houve melhoria no fluxo produtivo. O trabalho também deixou claro a possibilidade de utilização sistemática de modelos de otimização para balanceamento de tarefas, tendo em vista que a inclusão ou exclusão de tarefas é comum em uma linha montagem, devido às constantes mudanças exigidas pelo mercado automotivo.

Deve-se observar que o modelo matemático obteve bons resultados sobre os valores de tempos de ciclo otimizado e forneceu valores de referência para o tempo de ciclo e ociosidade. Este modelo foi aplicado separadamente para cada tipo de veículo, sendo portanto pequenos: o número de tarefas (máximo de 86 tarefas) e o número de estações de trabalho (4 estações). O modelo, no entanto, mostrou-se limitado para o problema de balanceamento de tarefas para toda a linha de produção, que possui 82 estações de trabalho e 2975 tarefas. Isto sugere, para trabalhos futuros, a utilização de metaheurísticas para resolver o problema de otimização de forma aproximada.

Outra possibilidade a ser explorada em trabalhos futuros refere-se à utilização de modelos probabilísticos de otimização, que representam muito bem a problemática envolvida no estudo de caso apresentado neste trabalho.

Referências

- Akpinar, S.; Bayhan, G.M. (2011). A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(3), 449-457. <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.08.006>
- Araújo, F.F.B.; Costa, A.M.; Miralles, C. (2012). Two extensions for the ALWABP: Parallel stations and collaborative approach. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 483-495. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.032>
- Battaia, O.; Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020>



- Becker, C.; Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. In *European Journal of Operational Research*, 168, 694-715. <http://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), 674-693. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509-528. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>
- Costantino, N.; Dotoli, M.; Falagario, M.; Fanti, M.P.; Mangini, A.M. (2012). A model for supply management of agile manufacturing supply chains. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 451-457. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.021>
- Fogliatto, F.S.; Silveira, G.J.C.; Borenstein, D. (2012). The mass customization decade: An updated review of the literature. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 14-25. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.002>
- Hamta, N.; Fatemi Ghomi, S.M.T.; Jolai, F.; Akbarpour Shirazi, M. (2013). A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 99-111. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.013>
- Hu, S.J.; Ko, J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H.A.; Lien, T.K.; Koren, Y.; Shpitalni, M. (2011). Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 715-733. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.004>
- Manavizadeh, N.; Hosseini, N.; Rabbani, M.; Jolai, F. (2013). A Simulated Annealing algorithm for a mixed model assembly U-line balancing type-I problem considering human efficiency and Just-In-Time approach. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 669-685. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2012.11.010>
- Otto, A.; Otto, C. (2014). How to design effective priority rules: Example of simple assembly line balancing. *Computers & Industrial Engineering*, 69, 43-52. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.013>
- Özcan, U. (2010). Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm. *European Journal of Operational Research*, 205(1), 81-97. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.033>
- Purnomo, H. D.; Wee, H.M.; Rau, H. (2013). Two-sided assembly lines balancing with assignment restrictions. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(1-2), 189-199. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.010>
- Rashid, M.F.F.; Hutabarat, W.; Tiwari, A. (2012). A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4), 335-349. <http://doi.org/10.1007/s00170-011-3499-8>
- Scholl, A.; Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 666-693. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.022>
- Sivasankaran, P.; Shahabudeen, P. (2014). Literature review of assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9), 1665-1694. <http://doi.org/10.1007/s00170-014-5944-y>