

BALANCEAMENTO DA PRODUÇÃO DE UMA LINHA DE USINAGEM EM UMA EMPRESA DE AUTOPEÇAS DE CURITIBA

Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba-PR
lcar@utfpr.edu.br

Fernando Augusto Reis Mibach

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba-PR
fermibach@gmail.com

Leonardo André Malacário Campos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba-PR
leoandre2612@hotmail.com

Leandro Magatão

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba-PR
magatao@utfpr.edu.br

RESUMO

O problema de balanceamento da produção é, normalmente, aplicado a linhas de montagem, visando a distribuição das tarefas entre os operadores ou postos de trabalho. Este trabalho indica que operações de usinagem também podem ser balanceadas e distribuídas uniformemente entre as máquinas disponíveis, o que não é comumente visto na indústria mundial. Outro objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista que foi capaz de identificar a solução ótima para um problema real numa indústria de autopeças na região de Curitiba-PR. Nesta indústria, balanceou-se a produção de uma linha de usinagem, composta de quatro centros de usinagem, que produz uma peça que requer 41 operações de usinagem.

PALAVRAS CHAVE. Programação Matemática. Usinagem. Balanceamento.

Área principal. AD&GP (PO na Administração e Gestão da Produção), IND (PO na indústria).

ABSTRACT

The production balancing problem is usually applied to assembly lines, with the goal of distributing tasks among workers or work centers. This work aims to show that machining operations can also be balanced and evenly distributed among available machines, which is not commonly seen in the industry worldwide. Another objective of this work is to present a Mixed Integer Linear Programming approach able to identify the optimal solution to a real problem in the auto parts industry in the city of Curitiba-PR. In this industry, the production at a machining line – comprised of four machining centers – was balanced, which produces a part with 41 machining operations.

KEYWORDS. Mathematical Programming. Machining. Balancing.

Main area. AD & GP - OR in Administration & Production Management, IND (OR in Industry).

1. Introdução

A definição dada por Becker e Scholl (2004) do Problema de Balanceamento de Linha de Montagem Simples, também denominado SALBP (*Single Assembly Line Balancing Problem*), é: dados um conjunto de operações com tempos diferentes, um conjunto de relações de precedência entre as operações e um conjunto de máquinas, o balanceamento atribuirá cada tarefa a exatamente uma máquina, desde que as relações de precedência sejam respeitadas e a distribuição de carga entre as máquinas (ou postos de trabalho) seja a mais equilibrada possível; idealmente, com tempos iguais em todas as máquinas. O objetivo deste problema pode ser dividido em duas variantes. De acordo com Boysen *et al.* (2007): *i*) quando o tempo de ciclo é dado e o número de máquinas será minimizado, este problema é identificado como SALBP-1; e *ii*) quando o número de máquinas é fixado e o tempo de ciclo será minimizado, este problema é identificado como SALBP-2. Trata-se de um problema difundido na literatura (Scholl, 1999; Becker e Scholl, 2004; Scholl e Becker, 2006; ALB-Research-Group, 2013).

Atualmente, a indústria automobilística demanda alta competitividade das empresas. Elas precisam fornecer produtos com menor preço e maior qualidade, garantindo a satisfação de seus clientes. Para tanto, é indispensável ter o efetivo controle de todas as suas atividades produtivas, com o intuito de avaliar o desempenho de seus processos e intervir rapidamente, realizando as melhorias possíveis. Nesse contexto, problemas recorrentes na indústria são o desbalanceamento e a inadequada alocação de carga nos postos de trabalho de linhas produtivas, causando perdas de produtividade, aumento de custos e, conseqüentemente, não gerando o máximo retorno financeiro possível. Na indústria, frequentemente, tal problema não é analisado por completo, sendo que a solução fica a encargo do “bom senso” dos membros mais experientes na área disponíveis pela empresa. Outro aspecto relacionado ao balanceamento não otimizado de linha de produção na indústria, que corrobora com a afirmação anterior, é a falta de *softwares* disponíveis no mercado. Em uma pesquisa realizada por Becker e Scholl (2004), constatou-se a existência de somente dois *softwares* que apresentavam um algoritmo de otimização e uma interface amigável para gerenciamento de dados. E, somente um deles apresentava recursos para análise de modelos mistos (mais de uma peça fabricada pela linha).

Neste trabalho, propõe-se o balanceamento da produção de uma linha de usinagem de uma indústria de autopeças na região de Curitiba, no estado do Paraná. Na revisão da literatura, observou-se que não é usual aplicar o balanceamento a processos de usinagem, o que implica algumas alterações na representação do problema. Outro objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista capaz de identificar a solução ótima para um problema real numa indústria. Nesta indústria, balanceou-se a produção de uma linha de usinagem, composta de quatro centros de usinagem, que produz uma peça que requer 41 operações de usinagem.

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma. A seção 2 apresenta alguns detalhes do problema de balanceamento da produção. A seção 3 apresenta a representação matemática, baseada em Programação Linear Inteira Mista, proposta para a solução do problema apresentado de balanceamento de uma linha de usinagem. Na seção 4, são apresentados os resultados obtidos na solução do problema proposto. Adicionalmente, esta seção também apresenta exaustivos testes em instâncias geradas aleatoriamente com o intuito de verificar a robustez do modelo proposto. Na seção 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2. O Problema de Balanceamento da Produção

Nos Sistemas de Manufatura Enxuta, o balanceamento das operações está fundamentalmente ligado ao conceito do tempo *takt*. O tempo *takt* é o tempo em que cada produto ou componente deve ser produzido de modo a atingir a demanda do cliente, sem falta ou excesso. Dessa forma, o tempo *takt* associa e condiciona o ritmo de produção ao ritmo das vendas, seguindo o conceito de produção puxada pelo cliente (Almeida e Souza, 2000). Outro conceito muito importante para a compreensão do balanceamento das operações é o tempo de ciclo. O tempo de ciclo da linha ou célula é o tempo de execução da tarefa (ou das tarefas) na máquina/posto mais lento. Em outras palavras, é o ritmo máximo possível de produção, mantidas

as condições atuais de produção. Ele é definido pelas características dos equipamentos e peças e pela configuração da linha ou célula, como a alocação de trabalhadores aos postos de trabalho (Alvarez e Antunes Jr., 2001). Efetivamente, é produzida uma unidade a cada intervalo definido pelo tempo de ciclo.

Este trabalho aborda uma empresa de usinagem de autopeças de Curitiba-PR, que é responsável pela produção de uma peça de alumínio. Para isso, há a disponibilidade de uma linha de produção com quatro centros de usinagem. No momento, esta linha de produção não é capaz de suprir a demanda. Ou seja, a linha possui tempo de ciclo superior ao tempo *takt*. Ao realizar o balanceamento da linha, o objetivo é atribuir tarefas aos postos de trabalho/máquinas ao longo da linha de modo que a carga em todos os postos/máquinas seja, aproximadamente, a mesma. Portanto, pode-se dizer que a produtividade desejada será alcançada quando se aproximar o tempo de ciclo ao tempo *takt* em questão, produzindo-se no ritmo da demanda do cliente, evitando, assim, perdas por superprodução. Realizando o correto balanceamento, ou seja, a correta distribuição das operações aos postos ou máquinas, de forma que todos possuam, aproximadamente, a mesma quantidade de carga alocada, os gargalos de produção serão atenuados, minimizando as perdas por ociosidade das máquinas. Já as perdas por produção de produtos defeituosos, no presente trabalho, serão reduzidas distribuindo as características mais críticas às máquinas (centros de usinagem) de maior precisão. Na seção seguinte, será apresentada a formulação matemática proposta para a solução deste problema, além de um maior detalhamento das condições de operação.

O diagrama de precedência é uma representação que relaciona as dependências entre operações a serem realizadas na linha em ordem cronológica. Nesse tipo de dependência, uma atividade não pode ser iniciada enquanto a atividade imediatamente anterior não estiver finalizada. Para a confecção de um diagrama de precedência, desenham-se círculos representativos de cada tarefa e através de flechas, sempre de acordo com a sequência correta, são feitas as conexões das operações (Scholl, 1999). A Figura 1 ilustra as relações de precedência para o problema real proposto.

O escopo deste trabalho envolve, principalmente, as áreas de manufatura e fabricação. Os conhecimentos na área de manufatura permitiram a compreensão e a solução de um problema de balanceamento de linha, ou seja, de distribuição de carga de trabalho entre as máquinas. Já a área de fabricação possibilitou uma análise dos parâmetros de corte utilizados e uma estimativa do tempo necessário para cada tarefa em diferentes máquinas, bem como, em trabalhos futuros, pode viabilizar uma melhoria desses parâmetros.

3. Modelo Matemático Proposto

O problema de balanceamento de linhas produtivas faz parte do dia-a-dia de inúmeras empresas de produção e o desbalanceamento pode ser responsável por grande perda de produtividade. Atualmente, na maioria dos casos, este problema não é solucionado da maneira adequada, tornando-se, assim, uma grande oportunidade para melhoria. Ao realizar o balanceamento adequado de uma linha, o tempo de ciclo tende a ser reduzido, resultando em um ganho de produtividade. O objetivo geral deste trabalho é a otimização do balanceamento da linha de uma empresa de usinagem na região de Curitiba, no estado do Paraná. O objetivo específico é a redução do tempo de ciclo da linha, mediante uma realocação de tarefas nas máquinas, no caso, centros de usinagem CNCs.

O modelo matemático para balanceamento de linhas, a ser apresentado neste trabalho, considera apenas um produto na linha e objetiva a minimização do tempo de ciclo (SALBP-2). Alterando-se a proposta de Battini *et al.* (2009), na equação (1), a função objetivo tem como objetivo a minimização do tempo de ciclo (c). Na equação (2), a variável binária $X(i,w)$ é igual a 1 se, e somente se, a tarefa i for realizada na máquina w . Cada tarefa tem um tempo de processamento definido $t_{i,w}$. As restrições são apresentadas nas expressões (2) a (6), indicadas a seguir.

A equação (2) impõe a restrição de que uma tarefa i seja executada em uma única máquina w . A inequação (3) restringe que a soma dos tempos de todas as operações em uma

máquina w não ultrapasse o tempo de ciclo c . A restrição (3) é usada quando há apenas uma máquina disponível para executar uma tarefa i e quando a máquina w processa apenas uma peça por vez. A restrição (3) é frequentemente encontrada na literatura de sobre SALBP (e.g., Scholl, 1999; Becker e Scholl, 2004), mas, neste trabalho, será substituída pela restrição (6), explicada na sequência. A expressão (4) impõe que as precedências entre execuções das tarefas serão cumpridas. As relações de precedência da tarefa j são identificadas por $prec(j)$, que representa o conjunto de operações i que deve preceder a tarefa j .

$$(minimizar) \quad z = c \quad (1)$$

$$\sum_w X(i, w) = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i X(i, w) * t_{i,w} \leq c \quad \forall w \quad (3)$$

$$\sum_w w * X(i, w) \leq \sum_w w * X(j, w) \quad \forall i, j / i \in prec(j) \quad (4)$$

Especificamente para a linha de usinagem em questão, algumas tarefas devem ser usinadas na mesma máquina. Por exemplo, quando há uma tolerância crítica de posição entre duas tarefas, essas tarefas devem ser usinadas na mesma máquina. Para contemplar essas restrições, a equação (5) foi implementada, impondo que: se a tarefa i é processada na máquina w , então, se $i \in mmaq(j)$, a tarefa j também será processada na mesma máquina w .

A restrição (6) é um caso particular da restrição (3), presente no problema proposto, quando pode haver mais de uma máquina disponível para executar uma tarefa i e quando mais de uma peça pode ser usinada por vez numa máquina. Nesta restrição, $nm(w)$ e $np(w)$ indicam, respectivamente, o número de máquinas do tipo w disponíveis e o número de peças usinadas por vez na máquina w . No problema proposto, a restrição (6) substituirá a restrição (3). Todas as demais expressões apresentadas (1, 2, 4 e 5) serão usadas na solução do problema proposto.

$$\sum_w w * X(i, w) = \sum_w w * X(j, w) \quad \forall i, j / i \in mmaq(j) \quad (5)$$

$$\sum_i \frac{X(i, w) * t_{i,w}}{nm(w) * np(w)} \leq c \quad \forall w \quad (6)$$

4. Resultados

A fim de validar a abordagem matemática proposta, foram realizados dois estudos de caso. No caso 1, verificou-se o balanceamento da linha de usinagem estudada considerando-se um cenário real de uma indústria de autopeças na região de Curitiba-PR. No caso 2, realizou-se a análise estatística de instâncias geradas aleatoriamente, considerando-se uma dimensão realista para o problema de balanceamento de linhas de usinagem. Este estudo de caso 2 tem objetivo de avaliar a robustez da abordagem proposta em obter respostas para diferentes cenários do problema de balanceamento em estudo.

4.1. Caso 1: Avaliação de um caso real

Como estudo de um caso real, foi analisada uma linha de usinagem na região metropolitana de Curitiba que possui quatro máquinas, sendo que as máquinas 3 e 4 são idênticas e operam em paralelo, tal que uma peça será processada apenas por uma destas duas máquinas. Na Tabela 1, a terceira, quarta e quinta colunas (Tempo Máq1, Tempo Máq2, Tempo Máq3/4) representam, respectivamente, os tempos de processamento das tarefas nas máquinas 1, 2 e 3/4. A fim de preservar as informações da empresa, todos os tempos são apresentados em unidades de tempo (u.t.), após terem sido multiplicados por um fator definido pelos autores.

Tabela 1. Possibilidade de Usinagem nas Máquinas: Estudo de Caso Real

Tarefa	Descrição	Tempo Máq1 (u.t.)	Tempo Máq2 (u.t.)	Tempo Máq3/4 (u.t.)
01	Fresamento Face Inferior	53,2		
02	Desbaste dos index de posição	19,3		
03	Acabamento dos index de posição	11,7		
04	Fresamento Assento	13,5	9	18,4
05	Furação A	29,4	18,3	
06	Desbaste B	39,2	30,5	71,6
07	Furação para Roscas C	16,1		
08	Furação para Roscas D e E	26,7		
09	Rosqueamento D	26		
10	Rosqueamento E	6,9		
11	Rosqueamento C	15		
12	Furação Inclinada F	18		
13	Furação G	6,4	4,1	8,8
14	Fresado de alívio		10	22,7
15	Furo piloto para Roscas H		17,8	
16	Fresamento do Canal	7,9	6,2	
17	Furação para Roscas H		24,7	
18	Furação para Roscas I		6,1	12,9
19	Chanfros para Roscas H		5	
20	Rosqueamento H		29,2	
21	Rosqueamento I		10,1	16,8
22	Usinagem Faces J e K			26,3
23	Furação L	9,2	6,5	15
24	Desbaste M + Furação para Roscas N	29,4	24,1	54,1
25	Rosqueamento N	7,9	5,3	11,8
26	Acabamento M			34,3
27	Acabamento O			42,9
28	Desbaste dos index de posição 2	13	8,9	17
29	Acabamento dos index de posição 2			16,9
30	Desbaste e Acabamento P			22,8
31	Furação Inclinada Q			24,9
32	Fresamento Faces Laterais			32,7
33	Furação R			8,8
34	Desbaste S + Furação T	14,6		27
35	Rosqueamento T	12,1		19,8
36	Acabamento S	11,5		17
37	Furação U			12,9
38	Rosqueamento U			15,4
39	Desbaste V + Chanfro			20,2
40	Pré Acabamento V + M			33
41	Acabamento V + M			26,2
42	Giro de pallet Máq1	6		
43	Giro de pallet Máq2		3,4	
44	Giro de pallet Máq3/4			12

A configuração atual de cada tarefa é ilustrada na cor amarela. Ou seja, cada tarefa terá uma indicação (em amarelo) da máquina que, atualmente, realiza esta tarefa. Por exemplo, as tarefas 01 a 12 são atualmente executadas em Maq1. As demais possibilidades de alocação para as tarefas são exibidas com um tempo de execução estimado, ao contrário das indicações em amarelo que foram cronometradas. Por exemplo, a tarefa 04 tem um tempo estimado de execução de 9 u.t. em Maq2 e 18,4 u.t. em Maq3/4. A ausência de um tempo de processamento associado a uma das máquinas indica a impossibilidade de realizar esta tarefa nesta máquina. Os tempos de giro de *pallet* são fixos e dependem apenas da máquina em que cada tarefa é executada.

Existem, também, restrições decorrentes da fixação da peça na máquina. Dado um determinado dispositivo de fixação, só é possível a usinagem das faces paralelas ao eixo de giro de mesa da máquina. Existem tarefas que são fixadas a determinadas máquinas devido a alguma condição especial do processo. Dessa forma, na Tabela 1, as tarefas destacadas com a mesma cor, na coluna mais a esquerda da tabela, devem ser usinadas na mesma máquina, conforme restrição (5) da seção anterior. Isto ocorre devido às restrições impostas pelas posições de fixação da peça em cada máquina e às características da peça. Por exemplo, devem respeitar estas condições específicas as tarefas 18 e 21; 24 e 25; e, 34, 35 e 36.

Num processo de usinagem, muitas operações são pré-requisitos para outras operações. Por exemplo, uma broca de pré-furo deve ser utilizada antes da broca de furação, para, por fim, usinar-se a rosca. No contexto de balanceamento, essas operações pré-sequenciadas são vistas como restrições. Portanto, foi gerado um diagrama de precedência, englobando todas as operações. O diagrama de precedência do problema proposto é apresentado na Figura 1. Nesta figura, nota-se, por exemplo, a precedência das tarefas 06 e 25 em relação à tarefa 26. Ou seja, a tarefa 26 poderá ser realizada somente quando as operações 06 e 25 estiverem concluídas.

A linha de usinagem estudada contém quatro máquinas e cada máquina contém dois *pallets*. Na máquina 1, cada *pallet* suporta duas peças, sendo que essa máquina possui dois eixos árvores, o que permite usinar duas peças simultaneamente. Na máquina 2, cada *pallet* suporta apenas uma peça. As máquinas 3 e 4 operam em paralelo, tal que, após passar pela máquina 2, as peças serão enviadas ou para a máquina 3 ou para a máquina 4. Nas máquinas 3 e 4, cada *pallet* suporta duas peças. Assim como na máquina 1, a cada giro de *pallet* são usinadas duas peças nas máquinas 3 e 4, porém, não simultaneamente.

A Tabela 2 apresenta, respectivamente, o número de máquinas do tipo w disponíveis, indicado por $nm(w)$, e o número de peças usinadas por vez na máquina w , indicado por $np(w)$. Estas informações são requeridas na expressão (6). Além dessas informações, cada máquina usina apenas um *pallet* contendo as peças de cada vez, enquanto o outro *pallet* está disponível para o operador efetuar a carga e descarga de peças. Dessa forma, não há influência humana nos tempos de ciclo das máquinas.

O problema de balanceamento da linha de usinagem, que foi apresentado neste trabalho, foi solucionado baseado nas informações das expressões matemáticas (1), (2), (4), (5) e (6), apresentadas na seção 3, das Tabelas 1 e 2, e das relações de precedência apresentadas na Figura 1. Este problema de Programação Linear Inteira Mista foi resolvido usando-se um computador com processador Intel Core i5-3210M, CPU de 2,50 GHz e 6 GB de memória RAM. O *software* usado para solucionar este problema de Programação Linear Inteira Mista foi o Gams/CPLEX, versão 23.3.3.

A Tabela 3 e a Figura 2 apresentam os tempos de ciclo nas máquinas 1, 2 e 3/4. Antes da otimização (identificada como situação atual), o tempo de ciclo da linha de usinagem, definido pelo maior tempo entre todas as máquinas, era de 140,5 unidades de tempo. Após identificação da solução ótima, o tempo de ciclo foi reduzido para 127,2 unidades de tempo, implicando uma redução de 9,47 % do tempo de ciclo, ou um ganho de produtividade de 10,46 %. A solução ótima foi obtida após 106 iterações e 0,14 segundos de tempo de CPU.

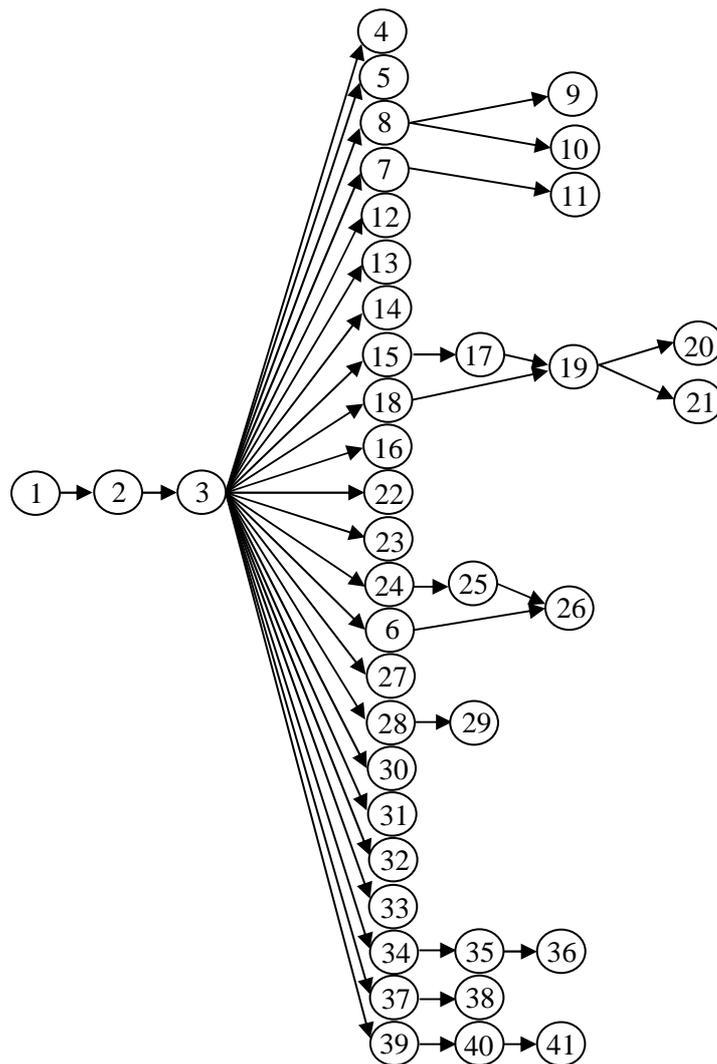


Figura 1. Diagrama de precedência do problema real proposto.

Tabela 2. Número de máquinas disponíveis e de peças usinadas por máquina.

Máquina	$nm(w)$	$np(w)$
1	1	2
2	1	1
3/4	2	2

A Tabela 3 compara os tempos de cada operação por peça e o tempo *takt*. Após a otimização, nota-se o desbalanceamento máximo de 2,6 unidades de tempo (u.t.) entre as máquinas 3/4, que serão o “gargalo de produção”, e a máquina 2, representando grande melhoria em relação à situação atual. Na situação atual, o “gargalo de produção” é a máquina 1, com desbalanceamento máximo de 23,9 u.t. para a máquina 2. O tempo *takt* desejado (de 121 u.t.) não foi alcançado e ainda há uma diferença entre a demanda e a produção diária. Porém, analisando-se as diferenças entre o tempo *takt* e o tempo de ciclo na máquina “gargalo de produção”, respectivamente, na situação atual e após a otimização, o déficit de tempo foi reduzido de 19,0 u.t. para 6,2 u.t.. Assim, com a otimização do balanceamento, uma melhoria (redução) posterior nos tempos de usinagem (de ao menos 4,87%) poderá levar a um tempo de ciclo inferior ao tempo *takt*, o que é viável do ponto de vista de otimização de parâmetros de corte das máquinas. Anteriormente, o déficit de 19,0 u.t. desencorajava ajustes nos parâmetros de

usinagem, já que havia a necessidade de melhorias significativas de, em média, 13,52% nos tempos de usinagem.

A Tabela 4 resume a solução ótima obtida para o balanceamento da linha de usinagem apresentada. Nesta tabela, as mudanças na alocação das tarefas, em relação à situação atual apresentada na Tabela 1, foram realçadas em amarelo. Por exemplo, a tarefa 05 estava alocada inicialmente à máquina 1 e foi realocada pelo modelo de otimização para execução na máquina 2.

Tabela 3. Tempo *takt* e tempos de ciclo atual e após a otimização do balanceamento.

Máquina	Tempo <i>takt</i> (u.t.)	Tempo de Ciclo Atual (u.t.)	Diferença Tempo Real (u.t.)	Tempo de Ciclo Otimiz (u.t.)	Diferença Tempo Otimiz (u.t.)
1	121	140,5	-19,0	126,7	-5,7
2	121	116,6	5,0	124,6	-3,6
3/4	121	122,8	-1,8	127,2	-6,2

Tabela 4. Alocações de tarefas na solução ótima e resumo das informações de processamento.

Alocações de tarefas	Máq 1	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 23, 24, 25, 42
	Máq 2	5, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 43
	Máq 3/4	4, 6, 13, 22, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44
Total de iterações da busca		106 iterações
Tempo de CPU da busca		0,14 segundos

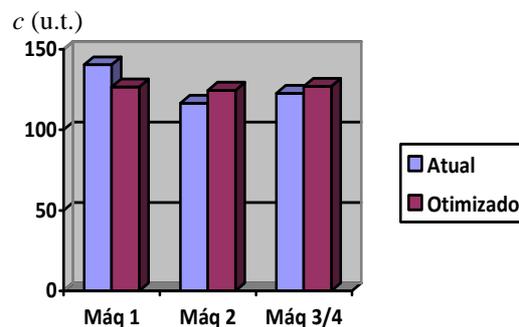


Figura 2. Tempo de ciclo atual (u.t.) e após a otimização do balanceamento.

4.2. Caso 2: Instâncias geradas aleatoriamente

A fim de estender a validação da abordagem proposta, foram geradas quatro novas instâncias. Cada instância foi repetida 1000 vezes, gerando-se os dados aleatoriamente, conforme expressão 7, onde “*aleatorio()*” é um número aleatório que varia entre zero e um. No estudo realizado, os tempos de processamento $t_{i,w}$ de cada tarefa i em cada máquina w puderam variar de 20 a 50 u.t..

As instâncias 1, 2 e 3, conforme Tabela 5, têm 44 tarefas, seguindo as relações de precedência indicadas na Figura 1. O que diferencia cada uma das três instâncias é o número de máquinas disponíveis. A instância 1 tem 4 máquinas, sendo as máquinas agrupadas em três etapas de processamento que conterão, respectivamente, 1, 1 e 2 máquinas. A instância 2 tem 10 máquinas, sendo as máquinas agrupadas em três etapas de processamento que conterão, respectivamente, 3, 2 e 5 máquinas. A instância 3 tem 20 máquinas, sendo as máquinas agrupadas em cinco etapas de processamento que conterão, respectivamente, 4 máquinas por etapa. A instância 4 tem 72 tarefas e foi inspirada nas relações de precedência propostas por Magatão *et al.* (2011), apresentadas na Figura 3. Nesta instância, haverá 20 máquinas agrupadas em cinco etapas de processamento que conterão, respectivamente, 4 máquinas por etapa.

$$t_{i,w} = 20 + 30 * aleatorio() \quad \forall i, w \quad (7)$$

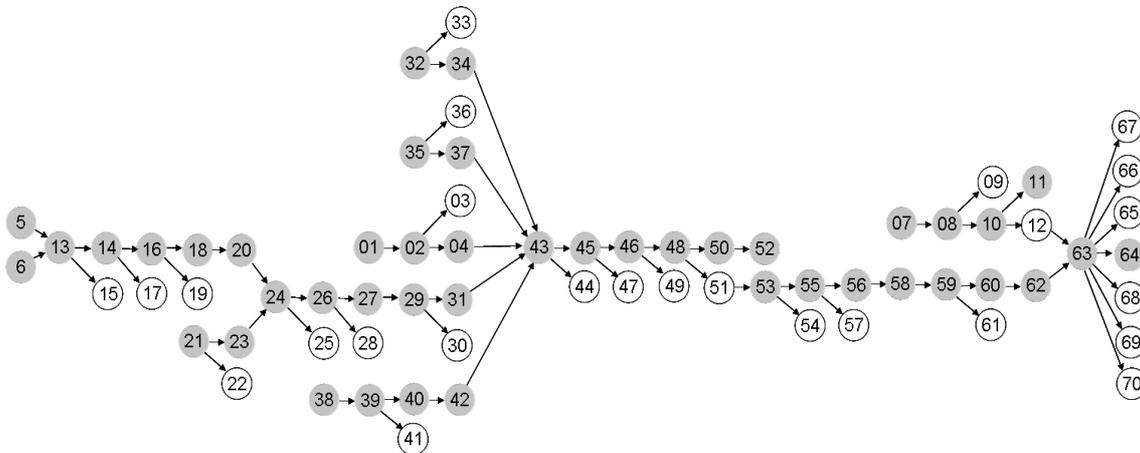


Figura 3. Diagrama de precedências entre tarefas da instância 4 (Magatão *et al.*, 2011).

Tabela 5. Características das instâncias 1 a 4.

	Instância 1	Instância 2	Instância 3	Instância 4
Número de tarefas	44	44	44	72
Total de máquinas	4 (1-1-2)	10 (3-2-5)	20 (4-4-4-4-4)	20 (4-4-4-4-4)

Em todas as instâncias, cada uma das 1000 repetições da solução da instância foi solucionada até a finalização do *branch-and-bound* pelo *software* Gams/CPLEX, obtendo-se a solução ótima para o conjunto de dados em análise. A Tabela 6 sumariza os resultados obtidos para as quatro instâncias, indicando valores médios e valores de desvio padrão. A primeira e a segunda linha dos resultados apresentam, respectivamente, o número total de iterações e o tempo total de CPU (em segundos) para cada uma das instâncias. Nestas duas primeiras linhas dos resultados observou-se que o número de iterações e o tempo total de CPU tendem a aumentar à medida que as instâncias se tornaram maiores. Observa-se que o aumento no número de máquinas na instância 2, quando comparado à instância 1, não alterou de forma significativa o total de iterações e o tempo de CPU.

Na terceira linha dos resultados da Tabela 6, apresenta-se o valor da solução ótima. Conforme esperado, à medida que aumentou-se o número total de máquinas disponíveis, houve redução no tempo de ciclo, identificado pela solução ótima, indicado nas instâncias 1, 2 e 3. A quarta linha dos resultados indica o percentual de ocupação das máquinas para cada uma das instâncias. Provavelmente, os resultados superiores a 99% de ocupação, em média, são o melhor indicador de que as soluções obtidas foram de boa qualidade. Cabe aqui ressaltar que os tamanhos dos problemas de balanceamento de linha de usinagem reais, normalmente, não superam a 10 máquinas. Porém, infelizmente, a maioria das empresas da região de Curitiba e, talvez, do Brasil não utilizam o balanceamento de suas operações de usinagem, o que as induz a maiores investimentos na aquisição de máquinas ao invés do otimizado uso dos recursos disponíveis.

Tabela 6. Resumo do balanceamento das instâncias 1 a 4.

	Instância 1	Instância 2	Instância 3	Instância 4
Total de iterações	1230,13±893,93	1096,69±854,78	11387,59±11563,14	30665,95±25209,5
Tempo de CPU (s)	0,269±0,153	0,265±0,411	1,181±0,913	5,145±4,173
Solução ótima	190,67±6,02	74,27±2,36	38,65±1,06	69,21±1,72
Ocupação (%)	99,47±0,42	99,52±0,37	99,00±0,83	99,40±0,32

5. Conclusões

O presente artigo considerou um estudo de balanceamento aplicado a uma linha de usinagem numa indústria de autopeças na região de Curitiba-PR. Com o objetivo de otimizar o balanceamento de produção da linha, foi proposto um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Este modelo objetiva, em suma, minimizar o tempo de ciclo das máquinas. Em particular, a linha analisada trabalha com máquinas em paralelo e a possibilidade de usinar uma ou duas peças por vez. Além disto, para a linha de usinagem em questão no caso 1, algumas tarefas devem ser usinadas na mesma máquina devido a questões de tolerância crítica de posição entre duas tarefas. As condições de operação particulares da linha foram observadas na modelagem matemática proposta, conforme restrições (5) e (6) da seção 3.

A proposta de instâncias geradas aleatoriamente, no caso 2, permitiu concluir a validade do modelo proposto em problemas de maior dimensão. O resultado obtido com o modelo se mostrou promissor para os dois casos estudados (com dados reais e dados gerados aleatoriamente), já que se obteve uma redução significativa nos tempos de ciclo do processo (*e.g.*, Tabela 3 e Figura 2). Outra contribuição deste trabalho foi o uso de um *software* de programação matemática, Gams/CPLEX, como uma alternativa viável para modelagem e solução em ambiente industrial de um problema real de balanceamento usando uma formulação PLIM. Na indústria analisada, a solução ficava a encargo do “bom senso” dos membros mais experientes na área.

Melhorias no processo de usinagem são ainda necessárias, pois o tempo de ciclo resultante após o balanceamento da linha mostrou-se maior do que o tempo *takt* e, conseqüentemente, ainda há incapacidade da linha de produção em atender a demanda. Essa melhoria no processo de fabricação (*e.g.*, ajustes de parâmetros de corte) pode ser melhor analisada e explorada em trabalhos futuros.

Agradecimentos

À bolsa CAPES/Ciências Sem Fronteiras (processo 2545-13-6) e ao projeto produtividade CNPq (processo 305405/2012-8).

Referências

- ALB-Research-Group** (2013), *ALB: Assembly Line Balancing*. Universidade Jena, Alemanha, (www.assembly-line-balancing.de).
- Almeida, A. T., Souza, F. M. C.**, *Produção & Competitividade: Aplicações e Inovações*. Editora UFPE, Recife, 2000.
- Alvarez, R. R. A., Antunes Jr., J. A. V.** (2001), Takt-time: Conceitos e Contextualização Dentro do Sistema Toyota de Produção, *Gestão & Produção*, 8, 1-18.
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A. e Sgarbossa, F.** (2009), Balancing–sequencing procedure for a mixed model assembly system in case of finite buffer capacity, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 44, 345-359.
- Becker, C., Scholl, A.** (2004), A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168, p. 694–715.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A.** (2007), A classification of assembly line balancing problems, *European Journal of Operational Research*, 183, 674-693.
- Magatão, L. Rodrigues, L.C.A., Marcilio, I., Skraba, M.** (2011), Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista, *Atas do XLIII SBPO*.
- Scholl, A.** *Balancing and sequencing of assembly lines*, 2ª ed., Physica Verlag Heidelberg, 1999.
- 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, 666-693.