

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

REBECCA SANTANA BUENO

APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O
BALANCEAMENTO DA LINHA DE CABINE DE UMA MONTADORA
DE CAMINHÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2016

REBECCA SANTANA BUENO

**APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O
BALANCEAMENTO DA LINHA DE CABINE DE UMA MONTADORA
DE CAMINHÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Luiz de Melo

PONTA GROSSA

2016



Ministério da Educação
**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ**
CÂMPUS PONTA GROSSA
Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção



TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O BALANCEAMENTO DA LINHA DE CABINE DE UMA MONTADORA DE CAMINHÕES

Por

REBECCA SANTANA BUENO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 06 de setembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Everton Luiz de Melo
Prof. Orientador

Prof. Dr. Juan Carlos Garcia
Membro titular

Prof. Dr. Shih Yung Chin
Membro titular

**- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE ARQUIVADA NA
SECRETARIA ACADÊMICA -**

RESUMO

BUENO, Rebecca Santana. **APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O BALANCEAMENTO DA LINHA DE CABINE DE UMA MONTADORA DE CAMINHÕES**. 2016. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre linha de montagem, balanceamento de linha de montagem e técnicas para o balanceamento de linha de montagem. O objetivo foi, através da modelagem matemática, balancear uma linha de montagem de uma montadora e identificar os ganhos em relação ao atual balanceamento utilizado pela empresa estudada. Ao comparar as soluções obtidas com o balanceamento adotada pela empresa, somente o modelo matemático para o SALBP-1 não apresentou ganhos. Porém, em comparação ao SALBP-1 com modelagem adaptada, os ganhos foram significativos. Obteve-se um ganho de produtividade de 12%, uma redução de aproximadamente 94% do tempo de ociosidade e uma diminuição da perda por balanceamento de quase 91%.

Palavras-chave: Balanceamento de Linha. Modelo Matemático. Linha de Montagem. SALBP.

ABSTRACT

BUENO, Rebecca Santana. **APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS FOR A CABIN LINE BALANCING OF CARMAKER**. 2016. 59 p. Term Paper (Bachelor's degree in Industrial Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2016.

In this paper it was performed a study on assembly line, assembly line balancing and techniques for assembly line balancing. The present study was aimed at balancing an assembly line of a carmaker through mathematical modeling and identify the gains from the current balancing used by the company under study. When comparing the solutions obtained with the balance adopted by the company, only the mathematical model for the SALBP-1 showed no gains. However, compared to SALBP-1 with adapted modeling the gains were significant. Obtained as an 12% gain in productivity, a reduction of approximately 94% of the idle time and decrease loss by balancing almost 91%.

Keywords: Line Balancing. Mathematical Model. Assembly Line. SALBP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de diagrama de precedência.....	13
Figura 2 - Exemplo de matriz de precedência	13
Figura 3 - Linha de montagem simples	16
Figura 4 - Linha de montagem mista.....	16
Figura 5 - Linha de montagem multimodelo	17
Figura 6 - Exemplo de montagem em linha.....	17
Figura 7 - Exemplo de montagem em forma de U.....	18
Figura 8 – Exemplo de postos paralelos	18
Figura 9 - Fluxograma de metodologia.....	36
Figura 10 - Layout da empresa Alfa	36
Figura 11 - Representação da linha de cabine 2.....	37
Figura 12 - Diagrama de precedência do modelo V	40
Figura 13 - Matriz de precedência do modelo V.....	41
Gráfico 1 - Balanceamento de Linha Utilizado pela Empresa Alfa	45
Gráfico 2 - Balanceamento Modelo Matemático SALBP-1	47
Gráfico 3 - Balanceamento Modelo Adaptado.....	48
Gráfico 4 - Balanceamento da Linha de Cabine Proposto SALBP-2.....	50
Quadro 1 - Atributos de Linha de Montagem.....	20
Quadro 2 - Tipos de Problema de Balanceamento de Linha Simples	22
Quadro 3 - Tipos de Problema de MALBP	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Duração das Tarefas do Modelo V	39
Tabela 2 - Distribuição de Tarefas Utilizada pela Empresa Alfa	44
Tabela 3 - Balanceamento Proposto Usando Modelo Matemático.....	46
Tabela 4 - Balanceamento do Modelo Adaptado	47
Tabela 5 - Resultado do Balanceamento de Linha SALBP-2.....	49
Tabela 6 - Comparativo de Desempenho dos Modelos	51
Tabela 7 - Comparação das Medidas de Desempenho	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>c</i>	Tempo de Ciclo
E	Eficiência
IS	Índice de Suavidade
<i>m</i>	Número de Postos de Trabalho
PB	Perda por Balanceamento
TO	Tempo de Ociosidade
UT	Unidade de Tempo

LISTA DE SIGLAS

ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
EMS	<i>Electrified Monorail System</i>
MALBP	<i>Mixed-model Assembly Line Balancing Problem</i>
MTM	<i>Method Time Measurement</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 Objetivo Geral.....	10
1.1.2 Objetivos Específicos.....	10
1.2 JUSTIFICATIVAS	10
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 LINHA DE MONTAGEM	12
2.2 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM	19
2.3 TÉCNICAS PARA O BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM.....	24
2.3.1 Modelagem Matemática.....	24
2.3.2 Heurísticas	25
2.3.3 Meta-heurísticas	26
2.3.4 Simulação	28
2.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO	28
2.5 MODELOS MATEMÁTICOS.....	29
3 DESENVOLVIMENTO.....	35
3.1 METODOLOGIA	35
3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA	36
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA ESTUDADA	37
3.4 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	38
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1 BALANCEAMENTO DA LINHA DE MONTAGEM DA EMPRESA ALFA.....	44
4.2 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO SALBP-1.....	45
4.3 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO.....	47
4.4 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO PARA SALBP-2.....	49
4.5 COMPARAÇÕES ENTRE AS DIFERENTES SOLUÇÕES	50
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A maior eficiência na utilização dos recursos é um desafio para as indústrias que precisam diminuir seus custos de produção e, conseqüentemente, tornarem-se mais competitivas no cenário global.

Atrelado a esse fator, o ciclo de vida dos produtos está mais reduzido e a exigência de maior variedade de produtos por parte dos clientes é maior. Logo, as empresas precisam, constantemente, repensar as configurações das linhas de produção para sempre obter o melhor aproveitamento dos recursos existentes.

Em 1913, Henry Ford concebia a primeira linha de montagem de veículos para produzir grandes quantidades do Modelo T e com um custo reduzido. O conceito de linha de montagem pode ser compreendido por postos de trabalhos dispostos sequencialmente e interligados por um sistema de transporte de materiais (SIMARIA, 2001). O produto passa por cada posto de trabalho, onde uma tarefa previamente determinada é executada.

As linhas de montagem necessitam de constantes ajustes para atender aos novos produtos, buscando sempre reduzir o custo do sistema de produção. Assim, o planejamento de uma linha de montagem envolve decisões relacionadas à capacidade do sistema de produção (equipamentos, número de postos, tempo de ciclo) e à alocação das tarefas nos postos de trabalho de acordo com as restrições de precedência (SCHOLL; BECKER, 2006; SIHOMBING et al., 2012).

O balanceamento da linha de produção é uma ferramenta utilizada para auxiliar na gestão de uma linha de montagem eficiente. Sivasankaran e Shahabudeen (2014) complementam que o balanceamento ajuda a empresa a utilizar melhor suas instalações e a produzir produtos de acordo com a demanda. Muitas vezes, modelos matemáticos são utilizados para auxiliar na alocação das tarefas visando diminuir a ociosidade, e por conseqüência, melhorar a eficiência do sistema de produção (BOYSEN et al., 2007).

Assim, esse trabalho pretende, a partir do levantamento das características de uma linha de montagem específica, aplicar técnicas para balancear tal linha de produção, comparando os resultados obtidos com o atual balanceamento usado pela empresa.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho se dividem em objetivo geral e objetivos específicos, detalhados a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é balancear a linha de produção de uma montadora de caminhões utilizando modelos matemáticos que se adequem aos atributos da linha de produção estudada.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos desse trabalho:

- i) Realizar um levantamento bibliográfico sobre balanceamento de linha, identificando conceitos relacionados à área e técnicas utilizadas para o balanceamento como, por exemplo, modelos matemáticos;
- ii) Identificar características da linha de montagem em estudo, levantando informações que permitam a aplicação das técnicas pesquisadas;
- iii) Aplicar uma técnica obtida na literatura para balancear a linha de produção em estudo; e
- iv) Analisar os ganhos conquistados através do balanceamento da linha de produção.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O balanceamento de uma linha de montagem proporciona uma melhor distribuição de tarefas, aumento de flexibilidade e aumento da capacidade produtiva. Desse modo, desperdícios de recursos produtivos, como mão de obra são minimizados e/ou eliminados.

Na literatura, a maioria dos problemas de balanceamento de linha não são condizentes com a realidade (STERNATZ, 2014), em virtude das inúmeras

particularidades que são encontradas na empresa. Por isso, torna-se interessante a realização de um estudo de caso.

A escolha de uma empresa do ramo automobilístico deve-se a sua importância na economia. Cada empresa do ramo automobilístico fomenta toda uma cadeia de suprimento, exercendo força em ambos os sentidos: a jusante e a montante. Sua cadeia de fornecedores envolve empresas de auto peças e outras ligadas ao processo de fabricação de couro, alumínio, borracha, vidro, óleos lubrificantes, combustível, entre outras (SILVA, 2010). Logo, pode-se inferir que as empresas do ramo automobilístico são importantes geradoras de emprego e renda, tanto direta quanto indiretamente (VERÍSSIMO; ARAÚJO, 2015). Entretanto, em momentos de crise econômica acentua-se a queda de produção e, conseqüentemente, aumenta-se o número de desligamentos efetivados. Portanto, devido ao seu importante papel na economia e a possíveis oscilações durante momentos de crise, deve-se buscar sempre a máxima eficácia e eficiência do sistema de produção, até mesmo para se tornar competitiva no mercado global.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em capítulos, conforme segue. No presente capítulo é feita a introdução ao tema, a apresentação dos objetivos geral e específicos e são apontadas as justificativas da escolha do tema.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica a respeito de balanceamento de linha. São apresentados conceitos a respeito da linha de montagem e caracterizados os vários tipos de linhas de montagem. Por fim, são revisadas as técnicas presentes na literatura para solucionar problemas de balanceamento de linha de montagem e apresentadas algumas medidas de desempenho para avaliar a solução encontrada.

O Capítulo 3 traz o desenvolvimento do trabalho. É descrita a metodologia e apresentada a empresa estudada. Primeiramente, caracteriza-se a linha estudada e apresenta-se o modelo matemático escolhido.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados. Finalizando, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste estudo, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizado um levantamento bibliográfico a respeito do assunto abordado. São apresentados conceitos referentes a linha de montagem. Em seguida são descritos os tipos de problema de balanceamento de linha de produção. Por fim, são abordadas técnicas existentes para solucionar tais problemas e são apresentados alguns modelos matemáticos usados na literatura.

2.1 LINHA DE MONTAGEM

As linhas de montagem consistem de postos de trabalho organizados segundo um fluxo de produção, no qual um produto é manufaturado posto por posto até a sua conclusão. Scholl e Becker (2006) acrescentam que os postos de trabalho são organizados ao longo de uma correia transportadora ou um equipamento mecânico de manuseio de material.

Em cada posto de trabalho certas operações são executadas repetidas vezes considerando o tempo de ciclo (BECKER; SCHOLL, 2006). O tempo de ciclo é o tempo entre liberações consecutivas da montagem até o fim da linha ou o tempo total alocado para cada posto de trabalho (SIVASANKARAN; SHAHABUDEEN, 2014). Ainda de acordo com Sivasankaran e Shahabudeen (2014), a fórmula do tempo de ciclo (c) é:

$$c = \frac{\text{Tempo efetivo disponível por turno}}{\text{Volume de produção por turno}} \quad (1)$$

É esperado que o tempo de ciclo e o número de postos de trabalho sejam inversamente proporcionais (SIVASANKARAN; SHAHABUDEEN, 2014). Ou seja, quanto maior o tempo de ciclo, menor o número de postos de trabalho e vice-versa. O tempo de ciclo também está relacionado com a produtividade. O quanto de trabalho é feito no tempo de ciclo de um posto se traduz em uma maior produtividade (YAZGAN et al., 2011).

A fabricação de um produto em uma linha de montagem requer fracionar a quantidade total de trabalho em tarefas (SCHOLL; BECKER, 2006). As tarefas são unidades indivisíveis de trabalho e cada tarefa é associada com um tempo de

processo conhecido como tempo da tarefa (t_i) (BOYSEN et al., 2008). Uma tarefa descreve todas as montagens de uma parte do produto incluindo deslocamentos, montagem e verificação (STERNATZ, 2015). Devido aos requisitos tecnológicos e/ou organizacionais, as tarefas não podem ser realizadas em uma sequência arbitrária, mas estão sujeitas a restrições de precedência, como pode ser visualizado pelo diagrama de precedências, como exemplificado na Figura 1 (BOYSEN et al., 2008).

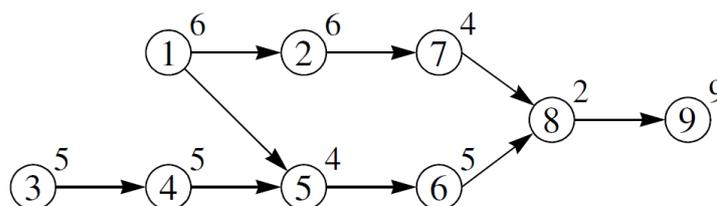


Figura 1 - Exemplo de diagrama de precedência
Fonte: Adaptado de Boysen et al. (2007).

Na Figura 1 cada círculo numerado representa uma tarefa e as setas indicam a relação de precedência entre elas. Os números fora dos círculos correspondem ao tempo de execução de cada tarefa. Nesse exemplo, a tarefa 5 requer a execução das tarefas 1 e 4 (antecessores diretos) e 3 (antecessor indireto). Assim como a tarefa 5 deve ser concluída antes dos seus sucessores (6, 8 e 9). Existem também as tarefas independentes, como, por exemplo, as tarefas 2 e 6.

A partir do diagrama de precedência, pode-se construir uma matriz de precedência, utilizada para implementação de problemas de balanceamento de linha em *software* de otimização. Trata-se de uma matriz triangular superior com entrada $a_{i,j}$ igual a 1 se o processamento da tarefa j exige a realização da tarefa i . Caso contrário, a entrada é zero. A partir da Figura 1 é traçada uma matriz de precedência, mostrada na Figura 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1	0	0	1	0	1	1	1
2			0	0	0	0	1	1	1
3				1	1	1	0	1	1
4					1	1	0	1	1
5						1	0	1	1
6							0	1	1
7								1	1
8									1
9									

Figura 2 - Exemplo de matriz de precedência
Fonte: Autoria Própria (2016).

Na Figura 2 observa-se, por exemplo, que a célula $a_{3,4}$ da matriz representa a precedência entre as tarefas 3 e 4. Nesse caso, a tarefa 4 só pode ser realizada após a tarefa 3 ser concluída.

O conjunto de todas as tarefas (S_k) alocadas em um posto de trabalho k ($= 1, \dots, m$) constitui a carga de trabalho e o tempo das tarefas acumuladas $t(S_k)$ é o tempo do posto de trabalho (SCHOLL; BECKER, 2006). Quando um tempo de ciclo fixo para todos os postos é estabelecido, um balanceamento de linha viável ocorre quando o tempo de cada posto de trabalho não ultrapassa o tempo de ciclo (BOYSEN et al., 2007). Caso a soma dos tempos de um posto seja menor que o tempo de ciclo, temos um posto de trabalho ocioso.

O problema de decisão de alocar as tarefas entre os postos de trabalho de forma otimizada com relação a algum objetivo é conhecido como Problema de Balanceamento de Linha, em inglês, *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) (SCHOLL; BECKER, 2006).

Para o exemplo das Figuras 1 e 2, um possível balanceamento de linha de montagem, considerando $c = 17$ e 3 postos de trabalho, seria: $S_1 \{1,3,4\}$, $S_2 \{2,5,7\}$ e $S_3 \{6,8,9\}$. Os postos de trabalho S_1 , S_2 , S_3 apresentam tempos ociosos de respectivos, 1, 3, 1 Unidades de Tempo (UT).

A literatura estabelece uma classificação, incluindo restrições e atributos pertinentes a uma linha de montagem.

Uma linha de montagem pode ser classificada quanto ao controle da linha. Assim, a linha pode assumir duas configurações: *paced* e *unpaced*.

Linhas de montagem com o tempo de ciclo igual para todos os postos de trabalho são chamadas *paced*. Nesse cenário, o tempo de ciclo restringe o tempo de processo em todos os postos (BOYSEN et al., 2008). Isso significa que todos os postos podem começar suas operações no mesmo tempo e também passar peças na mesma taxa (BOYSEN et al., 2008). Isso pode ser observado quando uma peça avança continuamente através de uma correia transportadora ou através de um transporte intermitente, onde a peça para em um posto é processada e automaticamente é transferida após um período de tempo decorrido.

Para esse tipo de controle de linha, o comprimento do posto de trabalho deve ser definido de acordo com o balanceamento de linha (BOYSEN et al., 2008). Se o comprimento da linha multiplicado pela velocidade da mesma for menor que o tempo de ciclo, significa que o operador não conseguirá executar todas as suas atividades

no seu posto de trabalho. Caso tal métrica exceda o tempo de ciclo, significa tempo extra, por exemplo, para compensar diferenças nos tempos de tarefas devido a uma produção mista (BOYSEN et al., 2008).

Caracteriza-se uma linha como *unpaced* quando nenhum intervalo de tempo é determinado para que a peça seja transferida de posto de trabalho. Em linhas *unpaced*, a taxa de produção não é determinada por um tempo de ciclo fixo e, sim bastante dependente dos tempos das tarefas realizadas (BOYSEN et al., 2008).

Boysen et al. (2008) distinguem linhas *unpaced* em assíncronas e síncronas. No movimento assíncrono, uma peça desloca-se logo que todas as operações necessárias em um posto de trabalho estão concluídas e o posto de trabalho seguinte não está bloqueado (BOYSEN et al., 2008). Quando não existe um tempo de ciclo comum para todos os postos, as peças podem ter que esperar antes de entrar no próximo posto e/ou o posto pode ficar ocioso esperando pela próxima peça (BECKER; SCHOLL, 2006). Nessa situação Becker e Scholl (2006), ainda, afirmam que essas dificuldades são parcialmente superadas com estoque entre os postos de trabalho.

No movimento síncrono, todos os postos de trabalho esperam o tempo do posto mais lento para enviar as peças no mesmo tempo (BOYSEN et al., 2008).

As variações dos tempos das tarefas podem ser classificadas em tempos determinísticos ou estocásticos. Quando a variação de tempo é suficientemente pequena, como a execução de tarefas simples ou postos automatizados altamente confiáveis, os tempos das tarefas são considerados determinísticos (BECKER; SCHOLL, 2006).

Tempo de tarefas do âmbito manual estão frequentemente sujeitos a desvios estocásticos, uma vez que a performance humana depende de uma variedade de fatores, como motivação, ambiente de trabalho e estresse físico e mental (BOYSEN et al., 2008).

As linhas de montagem podem ser classificadas em três tipos de acordo com o número de produtos, conforme segue.

Linha de montagem simples: apenas um tipo de produto é montado e todas as peças são iguais.

A Figura 3 representa uma linha de montagem simples, onde as diferentes figuras geométricas representam diferentes tipos de produtos.

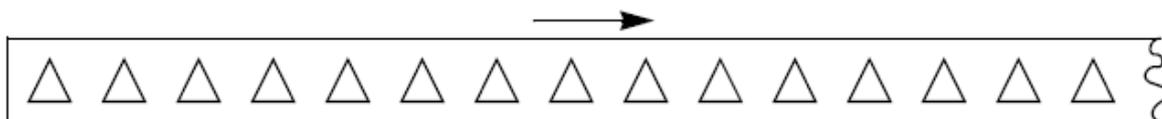


Figura 3 - Linha de montagem simples
Fonte: Becker e Scholl (2006).

Nos dias atuais, produtos sem qualquer modificação atraem poucos clientes de modo a inviabilizar a utilização rentável do sistema de montagem (BOYSEN et al., 2008). Assim, um outro tipo de linha se faz necessário.

Linhas de montagem mista: possuem produtos diferentes em uma sequência arbitrária de produção. De acordo com Boysen et al. (2008), muitas vezes, produtos diferentes tratam-se de customizações de alguns atributos específicos, os chamados opcionais. Nesse tipo de linha, o tempo de *setup* entre os tipos diferentes de produtos podem ser reduzido o suficiente para ser desconsiderado. Devido a tecnologias avançadas de produção foi possível automatizar operações de *setup* com tempo e custos insignificantes (BOYSEN et al., 2008).

A Figura 4 representa uma linha de montagem mista com três produtos diferentes.

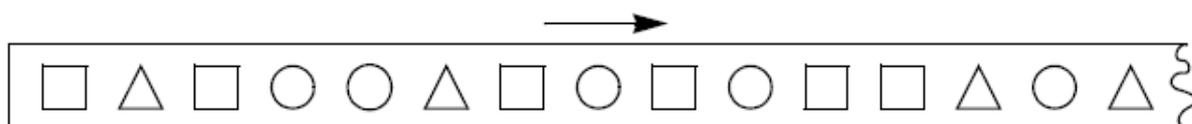


Figura 4 - Linha de montagem mista
Fonte: Becker e School (2006).

A instalação de vários opcionais pode ocasionar uma variação no tempo das tarefas, sendo que o tempo do posto de trabalho irá depender do produto específico a ser montado (BOYSEN et al., 2008). Boysen et al. (2008) afirmam que se produtos que demandam mais tempo na montagem forem colocados em linha um seguido do outro, o tempo de ciclo pode ser excedido e uma sobrecarga de trabalho gerada.

Linha multimodelo: caracterizada por uma sequência de lotes, cada um contendo unidades de um único produto ou um grupo de produtos similares, com operações intermediárias de *setup*.

A Figura 5 representa uma linha de montagem multimodelo, onde o *setup* ocorre a cada novo lote de um produto.

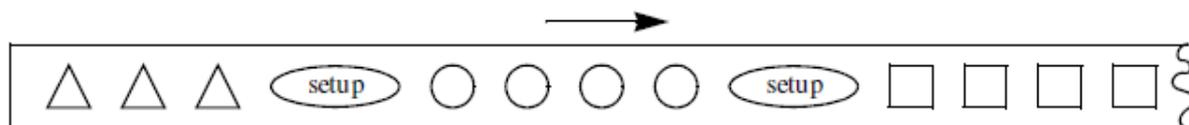


Figura 5 - Linha de montagem multimodelo
Fonte: Becker e School (2006).

A instalação de uma linha de montagem é uma decisão de longo prazo e, em geral, requer um grande investimento (ARENALES et al., 2007), por isso a importância dessa decisão. A escolha do layout da linha de montagem envolve a minimização do número de postos de trabalho, o balanceamento da carga de trabalho entre os postos de trabalho, os equipamentos necessários para execução das atividades, as atribuições de tarefas e as sequências de operações (BOYSEN et al., 2008; SIVASANKARAN; SHAHABUDEEN, 2014).

Tradicionalmente uma linha de montagem é organizada como uma linha em série, onde os postos são dispostos ao longo de uma correia transportadora em linha reta (BECKER; SCHOLL, 2006). Tal configuração é chamada de layout em linha.

Em contrapartida as linhas de montagem organizadas na forma de U necessitam de operadores polivalentes para a realização de tarefas organizadas em diferentes partes da linha de montagem (AJENBLIT; WAINWRIGHT, 1998).

A Figura 6 apresenta o layout em linha. Cada número entre parênteses indica o tempo de duração da respectiva tarefa. Suponhamos que cada posto tenha o tempo de ciclo de 12 unidades de tempo. Na montagem em linha temos 4 postos de trabalhos com eficiências iguais a 9/12, 11/12, 10/12 e 6/12. Os numeradores das frações são a soma do tempo de duração das tarefas atribuídas ao posto de trabalho.

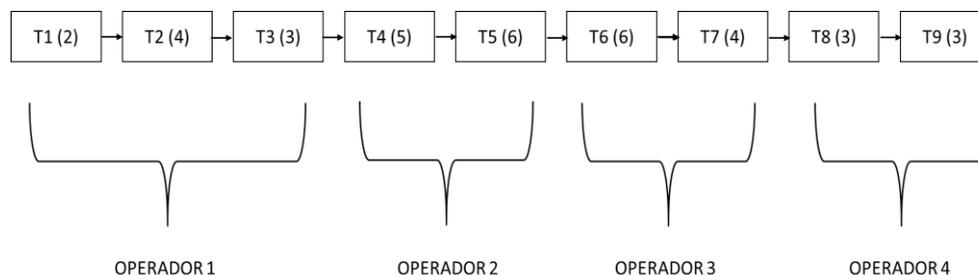


Figura 6 - Exemplo de montagem em linha
Fonte: Autoria Própria (2016).

Pode-se observar na Figura 7 uma linha de montagem em forma de U. De forma análoga, o número entre parênteses corresponde ao tempo de duração da

respectiva atividade. Comparando os dois tipos de linha, para essas mesmas tarefas, são necessários 3 operadores com 100% de eficiência na linha em forma de U.

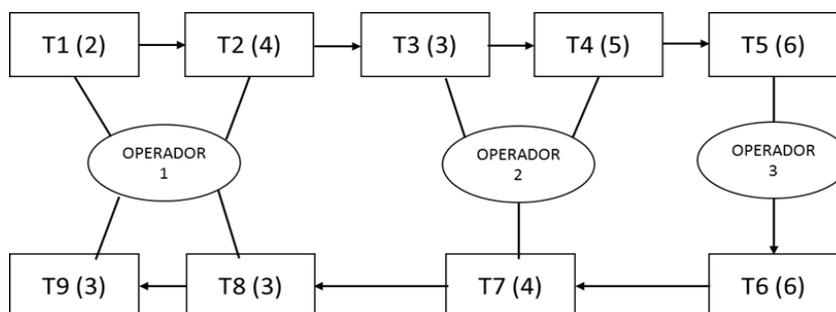


Figura 7 - Exemplo de montagem em forma de U
Fonte: Autoria Própria (2016).

Essa configuração de linha costuma ser manual e seu formato permite que duas ou mais tarefas sejam realizadas no mesmo ciclo (BATTALIA; DOLGUI, 2013). Boysen et al. (2008) apontam a flexibilidade que tal forma permite uma vez que operadores de postos adjacentes podem suportar um ao outro em caso de sobrecarga.

Os postos de trabalho paralelos podem ser utilizados quando o tempo de uma tarefa for superior ao tempo de ciclo. No paralelismo há dois postos idênticos que executam as mesmas funções e possuem os mesmos equipamentos (BECKER; SCHOLL, 2006). Ainda de acordo com Becker e Scholl (2006), o tempo de ciclo de postos duplicados é o dobro do tempo de ciclo de um posto regular.

A Figura 8 apresenta uma linha de montagem com um posto paralelo.



Figura 8 – Exemplo de postos paralelos
Fonte: Adaptado Becker e Scholl (2006).

Na Figura 8, utilizando postos paralelos, uma solução viável, supondo 5 postos de trabalho e $c = 10$ UT pode ser encontrada. Os valores de duração das tarefas foram apresentados na Figura 1. Os postos 4a e 4b apresentam um tempo de ciclo local de 20 UT. O tempo de duração das tarefas executadas em tais postos é de 16 UT e as peças são fornecidas alternadamente pelo posto 3.

O aumento da capacidade produzido pelo paralelismo aumenta o tempo máximo da tarefa, aumentando assim a taxa de produção (EGE et al., 2009). Porém, Ege et al. (2009) alertam que pode haver custo de capital adicional devido à duplicação de ferramentas e equipamentos.

O paralelismo pode tratar-se, também, de paralelismo de tarefas. Isso permite que as tarefas sejam executadas em diferentes postos de trabalho e/ou estágios (OZTURK et al., 2013).

2.2 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM

O balanceamento de linha consiste, basicamente, na distribuição das tarefas entre os postos de trabalho de modo a obter a melhor performance. Fathi e Ghobakhloo (2014) complementam que o balanceamento de linha visa organizar as operações nos postos de trabalho, de modo que todo operador tenha uma quantidade de trabalho (carga de trabalho) aproximadamente igual às dos demais trabalhadores, ou seja, que o tempo total de cada posto seja aproximadamente igual aos dos demais postos.

De acordo com Bhattacharjee e Sahu (1987), os benefícios do balanceamento de linha são:

- Produção de itens padrão em grande quantidade com baixo custo;
- Fluxo de trabalho eficiente na linha de produção;
- Os operadores menos qualificados podem ser empregados e treinados mais rapidamente;
- Aumento da produtividade;
- Redução da movimentação de materiais; e
- Menor congestionamento de trabalho.

A característica do balanceamento de linha é que uma tarefa deve ser atribuída a um posto de trabalho considerando as restrições do sistema de produção e as prioridades do trabalho (YAZGAN et al., 2011). As restrições podem incluir limitações físicas do espaço, limitações do ferramental disponível, entre outras.

Alguns atributos como, número de modelos de produtos, controle de linha, layout e tempo de tarefa caracterizam diferentes aspectos da linha de montagem. Tais atributos são resumidos no Quadro 1.

Número de modelos	Único modelo	Modelos mistos	Multi modelo
Controle de linha	<i>Paced</i>	<i>Unpaced</i> <i>assíncrono</i>	<i>Unpaced</i> síncrono
Layout	Linha	Forma de U	Estações paralelas
Tempo das tarefas	Determinístico		Estocástico

Quadro 1 - Atributos de Linha de Montagem
Fonte: Autoria Própria (2016)

Os atributos mostrados no Quadro 1, em conjunto, podem servir para classificar os problemas de balanceamento de linha. Além disso, ajudam a esclarecer se já existe um procedimento de solução para este caso ou não. Por exemplo, Ozturk et al. (2013) abordam um procedimento para uma linha mista, *paced*, com postos paralelos e tempo determinístico.

Existem algumas restrições relacionadas a tarefas e aos postos de trabalho. De acordo com Battaia e Dolgui (2013), são elas:

Restrição de zoneamento positivo: São usadas para forçar a atribuição de um conjunto de tarefas no mesmo posto de trabalho. Um conjunto de tarefas pode ser substituído por uma macro tarefa caso as tarefas usem os mesmos recursos, seja mão de obra ou equipamentos.

Restrição de zoneamento negativo: São empregados para proibir uma atribuição de determinadas tarefas ao mesmo posto de trabalho ou, por exemplo, equipamento do posto de trabalho.

Restrição de sincronismo: Agenda a execução de determinadas tarefas relacionadas a postos de trabalho paralelos.

Restrição de distância: Impõe uma distância máxima ou mínima entre as tarefas.

Restrição posicional: Proíbe a atribuição de algumas tarefas em um ou mais postos de trabalho.

Além da classificação dos tempos das tarefas em determinísticos e estocásticos é importante citar que, em alguns casos, o tempo da tarefa pode sofrer um acréscimo. Isso ocorre quando existe um tempo adicional para a mudança de ferramentas ou o reposicionamento de peças (BOYSEN et al., 2007). Outra situação na qual existe o acréscimo de tempo é se o status da tarefa completada tem efeitos nas tarefas que ainda serão executadas, seja no mesmo posto ou não (BOYSEN et al., 2007).

Os problemas de balanceamento de linha são classificados em duas vertentes: balanceamento de linha simples, em inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP), e balanceamento de linha generalizado.

O SALBP é o tipo de balanceamento mais explorado na literatura (BECKER; SCHOLL, 2006; FATHI; GHOBAKHLOO, 2014) e recebe essa denominação em virtude das várias simplificações que o fundamentam.

De acordo com Becker e Scholl (2006), as principais características do balanceamento de linha simples são:

1. Produção em massa de um produto homogêneo;
2. Ritmo de linha com tempo de ciclo fixo;
3. Tempo de operação determinístico;
4. Únicas restrições consideradas são as precedências de operações;
5. Layout em linha com m postos unilaterais;
6. Todos os postos estão igualmente equipados com máquinas e mão de obra;
7. Máxima eficiência da linha com o total de tempo das atividades; e
8. Todas as tarefas são processadas de um modo pré determinado.

Boysen et al. (2007) afirmam que as simplificações assumidas no SALBP que mais impactam no mundo real referem-se a garantir que todos os postos possuem máquinas e mão de obra equivalentes e que as tarefas são processadas de um modo pré determinado. Tais dificuldades se apresentam porque uma mesma tarefa pode ser executada de diferentes modos e/ou com diferentes recursos no dia-a-dia da empresa.

O balanceamento de linha simples pode ser classificado em quatro tipos a depender do objetivo, como é apresentado no Quadro 2.

O tipo SALBP-E é a versão mais geral do problema. Este procura maximizar a eficiência da linha, minimizando simultaneamente c e o número de postos (m), uma vez que as duas variáveis são inter-relacionadas (SCHOLL; BECKER, 2006).

SALBP-1 e SALBP-2 têm uma relação dual, porque o primeiro minimiza m dado um c fixo, enquanto que o segundo minimiza c dado certo m (SCHOLL; BECKER, 2006).

Tipo de SALBP	Objetivos
SALBP-E	Maximizar a eficiência da linha
SALBP-1	Minimizar o número de postos dado o tempo de ciclo
SALBP-2	Minimizar o tempo de ciclo dado o número de postos
SALBP-F	Solução viável para número de postos e tempo de ciclo dado

Quadro 2 - Tipos de Problema de Balanceamento de Linha Simples
Fonte: Boysen et al. (2008)

Por fim, SALBP-F é um problema de viabilidade que procura estabelecer ou não um equilíbrio viável para uma dada combinação de m e c (SCHOLL; BECKER, 2006).

Boysen et al. (2008) afirmam que a escolha do objetivo deve visar sempre as metas estratégicas da empresa devido aos efeitos de longo prazo do balanceamento de linha.

Devido às várias limitações do SALBP, ele não é muito adequado ao balanceamento de linhas de montagem do mundo real. Assim é necessário considerar aspectos técnicos ou de organização adicionais que irão afetar a estrutura do problema de planejamento. Entre as extensões consideradas na literatura estão: postos paralelos de trabalho, linhas de montagem em forma de U, sinergias de custos, processamentos alternativos, restrições de zoneamento, tempos estocásticos e tempos de processamento dependentes da sequência (BOYSEN et al., 2008).

O balanceamento de linha de montagem mista, em inglês *Mixed-model Assembly Line Balancing Problem* (MALBP) é uma variante do balanceamento de linha generalizado. Ele consiste em encontrar uma atribuição de tarefas para uma sequência ordenada de postos tal que as relações de precedência de cada produto sejam satisfeitas e algumas medidas de desempenho sejam otimizadas para determinado produto (YAGMAHAN, 2011).

Uma complexidade inerente ao MALBP refere-se aos diferentes tempos das tarefas de cada tipo de produto. Por exemplo, a instalação de um teto solar elétrico requer uma quantidade diferente de tempo comparado a instalação de um teto solar manual (BOYSEN et al., 2008). Logo, o tempo do posto é vinculado ao modelo específico a ser montado. Becker e Scholl (2006) afirmam que os tempos dos postos de diferentes modelos de produtos devem ser suavizados para cada produto (balanceamento horizontal) a fim de evitar ineficiência operacional como, sobrecarga de trabalho ou ociosidade. Yagmahan (2011) complementa que o tempo de ciclo não

é um limite superior para os tempos do posto, uma vez que ele corresponde a uma velocidade média de produção e o tempo do posto de alguns modelos pode exceder esse valor médio.

Os tipos de MALBP e seus respectivos objetivos de otimização são apresentados no Quadro 3.

Tipo de MALBP	Objetivos
MALBP – 1	Minimizar o número de postos dado o tempo de ciclo
MALBP – 2	Minimizar o tempo de ciclo dado o número de postos
MALBP – E	O tempo de ciclo e o número de postos são minimizados ao mesmo tempo

Quadro 3 - Tipos de Problema de MALBP
Fonte: Autoria Própria (2016)

O MALBP depende das mesmas suposições básicas do SALBP (BECKER; SCHOLL, 2006) e algumas suposições específicas para tal modelo (YAGMAHAN, 2011), conforme segue:

- A demanda é conhecida para cada modelo e a linha funciona de acordo com um plano de produção empurrado;
- Os tempos de operação são determinísticos para todas as tarefas; e
- As restrições de precedência são conhecidas e consistentes entre os produtos.

Linhas de montagem mistas são necessárias para quando existe uma demanda para uma variedade de produtos com preços comparativamente mais baixos (YAGMAHAN, 2011). Sua vantagem está ligada à flexibilidade que uma linha de montagem mista pode proporcionar, à redução dos estoques do produto final e à garantia de um fluxo contínuo de materiais (YAGMAHAN, 2011). Entretanto, o uso ineficaz da capacidade do modelo misto de linhas de montagem com redução da produtividade resulta em altos custos unitários devido a maiores custos de investimento inicial (YAGMAHAN, 2011).

Além do balanceamento, a programação também é um problema de uma linha de montagem mista. A programação envolve determinar a sequência e o tempo de todas as tarefas de montagem e produtos em cada posto de trabalho, com o objetivo de maximizar a performance da linha (OZTURK et al., 2013).

2.3 TÉCNICAS PARA O BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM

As técnicas usadas para o balanceamento da linha de montagem podem apresentar um caráter exato ou aproximado. Em problemas de grande escala, os métodos aproximados são mais utilizados, apesar deles não garantirem a solução ótima. Sua vantagem é atingir bons resultados em um tempo de computação aceitável (BATTIAIA; DOLGUI, 2013). Em alguns casos, por outro lado, a simulação pode ajudar a avaliar o comportamento dinâmico da linha de montagem (BATTIAIA; DOLGUI, 2013). A seguir são apresentados quatro métodos diferentes para a realização do balanceamento de linha de montagem: modelagem matemática, heurísticas, meta-heurísticas e simulação.

2.3.1 Modelagem Matemática

Os métodos exatos procuram obter uma solução ótima do problema. Os problemas de balanceamento de linha podem ser resolvidos de forma otimizada através de uma das duas abordagens seguintes: usando um *software* geral padrão (como ILOG Cplex, ILOGSolver, Dash Xpress MP, LINGO, OSL, etc.) ou um método de solução dedicada (BATTIAIA; DOLGUI, 2013). Battaia e Dolgui (2013) afirmam que o primeiro caso consiste em definir um modelo matemático apropriado para o problema e ajustar os parâmetros do *software* para resolver o problema tão rápido quanto possível.

De acordo com Battaia e Dolgui (2013), os seguintes modelos matemáticos já foram descritos na literatura:

- Programação inteira mista usando os métodos *Branch-and-Bound* ou *Branch-and-Cut*, geração da colunas, programação linear e relaxamento de Lagrange;
- Programação não linear inteira;
- *Goal e fuzzy goal programs*;
- *Chance-constrained programs*; e
- *Constraints satisfaction programs*.

Alguns métodos de solução dedicada foram desenvolvidos para lidar como uma estrutura particular de dados de entrada (BATTIAIA; DOLGUI, 2013). De acordo

com Battaia e Dolgui (2013) alguns desses algoritmos são: FABLE, EUREKA e SALOME.

A busca de uma solução ótima é inviável para problemas de médio e grande porte devido ao tempo de processamento para analisar todas as configurações possíveis do problema (HÖRNER,2009). Battaia e Dolgui (2013) destacam que a eficácia de um método exato é geralmente medida pelo tempo de cálculo necessário para resolver um problema.

Miralles et al. (2008) utilizam o método *Branch-and-Bound* para solucionar o problema de balanceamento de uma linha com recursos limitados. Eles consideram o tempo como determinístico, o controle da linha como *paced* e a utilização de um único produto.

Nazarian et al. (2010) apresentam um modelo matemático para balanceamento de uma linha multimodelo. O modelo é desenvolvido utilizando a Programação Inteira Mista para minimizar o custo da linha de produção.

Enquanto na maioria dos problemas de balanceamento de linha, os gráficos de precedência são utilizados para modelar as relações de precedência entre as tarefas, Topaloglu et al. (2012) utilizam restrições de montagem através da regra conhecida como *se-então* e solucionam o modelo através de *constraint programming*.

2.3.2 Heurísticas

Devido à complexidade computacional do problema de balanceamento de linha, reconhecido como NP-Difícil (BATTIAIA; DOLGUI, 2013), muitos pesquisadores têm desenvolvido algoritmos heurísticos eficientes (CHIANG; URBAN, 2006). Tais algoritmos são baseados em lógica e senso comum em vez de provas matemáticas (PONNAMBALAM et al., 1999). Battaia e Dolgui (2013) afirmam que, na maioria dos casos, as regras de prioridade são usadas para atribuir tarefas. Cristo (2010) complementa que as heurísticas usam uma lista ordenada de tarefas aplicada a um alocador para encontrar uma solução. Basicamente, cada heurística busca descobrir a ordenação de uma lista de tarefas que, ao ser aplicada no alocador, otimiza o objetivo desejado (CRISTO, 2010). Entende-se por aplicação do alocador, alocar a atividade em um determinado posto de trabalho. Os métodos heurísticos mais

utilizados são baseados em atributos de tarefas, tais como tempos de tarefas ou número de tarefas antecessoras (BATTAIA; DOLGUI, 2013).

Os métodos heurísticos podem ser classificados em duas categorias, de acordo com Battaia e Dolgui (2013):

- **Heurística *single-pass***: apenas uma iteração é feita para atribuir tarefas usando funções ou uma regra de prioridade. A solução é a saída final. Como consequência, o tempo de solução é muito curto, mesmo para problemas de larga escala.
- **Heurística *multi-pass***: Devido à aleatoriedade inerente destes algoritmos, diferentes resultados podem ser obtidos em cada passagem e a melhor solução encontrada após um determinado número de iterações é retornado como saída.

Capacho et al. (2009) utilizam métodos heurísticos para encontrar a solução para Problemas de Balanceamento de Linha de Montagem com Subgrafos Alternativos. As heurísticas são construídas através de regras de prioridade, tais como número mínimo de tarefas, número máximo de sucessores imediato e mecanismos de busca aleatórios para os métodos heurísticos *Single-Pass* e *Multi-Pass*.

Chiang e Urban (2006) aplicam um método heurístico para uma linha de montagem em forma de U com tempo estocástico e 111 tarefas. O algoritmo da heurística gera uma solução viável inicial utilizando a abordagem “*first fit*” e “*priority based*”. Se tais critérios não identificam a solução ótima, a solução inicial é submetida a dois procedimentos: menor número de tarefas e menor tempo de tarefas. Assim as tarefas podem ser realocadas para diminuir o número total de postos de trabalho.

Yazgan et al. (2011) desenvolvem um algoritmo heurístico para problemas nos quais uma tarefa deve ser executada por mais de um operador ao mesmo tempo. Por fim, eles utilizam o método de Taguchi para avaliar a otimização e o comportamento do processo.

2.3.3 Meta-heurísticas

Os métodos heurísticos podem ficar presos em regiões de ótimos locais, deixando de explorar regiões mais promissoras com relação a boas soluções ou a

solução ótima (SANCHES, 2010). Para minimizar tal problema, foram desenvolvidas as meta-heurísticas. As meta-heurísticas são estruturadas em componentes genéricos que são adaptados a vários tipos de problema de otimização, caracterizando-se como um método de busca flexível (HÖRNER, 2009).

As meta-heurísticas, segundo Breginski (2013), podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- **Técnica de busca local:** Parte de uma solução inicial e explora soluções vizinhas (BREGINSKI,2013); e
- **Técnica de busca populacional:** Parte de um conjunto de soluções iniciais, denominado população inicial, e são aplicados operadores na tentativa de gerar novos e melhores indivíduos para a população (BREGINSKI,2013).

São exemplos de métodos meta-heurísticos: Busca Tabu, *Greedy Randomized Adaptive Search* (GRASP), *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético, Algoritmos Competitivos Imperialistas e *Kangaroo method*, (BATTIAIA; DOLGUI, 2013).

Sabuncuoglu et al. (2009) propõem a meta-heurística Colônia de Formigas para solucionar o balanceamento de uma linha de montagem simples e em forma de U. Tal algoritmo utiliza agentes colaboradores para identificar o melhor posto para alocar a tarefa.

A meta-heurística *Simulated Annealing* foi usada por Ozcan e Toklu (2009). O algoritmo é um método de busca aleatório iterativo. Ele foi aplicado a uma linha de montagem com dois lados com o objetivo de maximizar a eficiência da linha e minimizar o índice de suavidade.

Hamta et al. (2013) apresentam uma otimização multiobjetivo baseada na combinação de *Particle Swarm Optimization* (PSO) e um algoritmo com *Variable Neighborhood Search* (VNS) para solucionar o problema. A modelagem do problema considera tempo flexível de operação, tempo de *setup* dependente da sequência de atividades e efeito de aprendizagem. Considera-se três objetivos simultaneamente: minimizar o tempo de ciclo, minimizar o custo total dos equipamentos e minimizar o índice de suavidade.

2.3.4 Simulação

A simulação é uma técnica usada para representar uma operação, processo ou sistema real por um período de tempo utilizando modelos computacionais. O objetivo é analisar o comportamento do sistema sob diversas condições (SANCHES, 2010).

A simulação não é uma técnica de otimização. Ela permite simular alguns números para a configuração do sistema e assim escolher aquele que apresenta o melhor resultado (BREGINSKI,2013), não necessitando utilizar o sistema real. Sanches (2010) afirma que tal possibilidade elimina os riscos físicos e os custos envolvidos em um estudo convencional.

Mendes et al. (2005) utilizam a simulação para avaliar uma solução obtida através de uma heurística. Os ganhos obtidos com a simulação foram: (1) melhor entendimento da linha atual de montagem; (2) validação dos pressupostos utilizados para construir o modelo; e (3) aumento de confiança para os tomadores de decisão. O objetivo do estudo de Mendes et al. (2005) era estabelecer diferentes configurações de linha para diferentes níveis de demanda.

Fan et. al (2010) utilizam um algoritmo genético para balancear uma linha de montagem com sobreposição e paradas de tarefas. A simulação é utilizada para analisar a solução obtida.

2.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO

O perfeito balanceamento da linha de montagem significa combinar os elementos de trabalho para serem feitos de tal modo que a soma dos tempos de cada posto de trabalho seja igual ao tempo de ciclo (PONNAMBALAM et al., 1999). Algumas medidas de desempenho podem ser usadas para medir a efetividade do balanceamento.

A primeira medida citada por Ponnambalam et al. (1999) é o número de postos em excesso. Uma linha com um menor número de postos de trabalho produz menor custo de mão de obra e reduz o espaço necessário, logo, obtém-se um plano mais rentável. O número mínimo de postos é calculado pela equação a seguir.

$$m_{min} = \frac{1}{c} \sum_1^m t_i \quad (2)$$

O Índice de Suavidade (IS) fornece a variação entre o tempo de ciclo e os tempos totais de trabalho dos postos. Sua equação é apresentada na sequência.

$$IS = \sqrt{\sum_{k=1}^m (c - t(S_k))^2} \quad (3)$$

Um IS igual a zero indica um perfeito balanceamento. O menor valor do índice resulta em linhas mais suaves, reduzindo assim o estoque em processo (PONNAMBALAM et al., 1999).

A eficiência (E) da linha de montagem mostra a utilização da mesma, ou seja, ela corresponde a uma fração produtiva do tempo total de operação (BOYSEN et al., 2007). Ela pode ser calculada conforme segue.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{(m \times c)} \quad (4)$$

A eficácia do balanceamento é medida pelo que se chama de Perda de Balanceamento (PB) (SLACK et al., 2009). De acordo com Slack et al. (2009) tal medida refere-se ao tempo não utilizado por meio da alocação desigual de trabalho como porcentagem do tempo total investido no processamento de um produto. Sua equação é apresenta na sequência.

$$PB = \frac{TO}{m \times c} \quad (5)$$

Fathi e Ghobakhloo (2014) apresentam uma fórmula para o cálculo do Tempo de Ociosidade (TO), conforme segue.

$$TO = m \times c - \sum_{i=1}^m t_i \quad (6)$$

Observa-se pela fórmula que diminuindo o tempo ocioso, maximiza-se a eficiência do balanceamento de linha (BOYSEN et al., 2007).

2.5 MODELOS MATEMÁTICOS

Devido à complexidade do SALBP, a formulação de um modelo matemático e a utilização de um *software* de otimização é uma opção para encontrar uma solução ideal para problemas de balanceamento de linha de montagem (SCHOLL; BECKER, 2006).

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram selecionados modelos matemáticos da literatura para o SALBP. Scholl (1999 apud Boysen; Fliedner, 2008) apresentam um modelo matemático para três tipos de SALBP, detalhados na sequência. As notações utilizadas nos modelos matemáticos são apresentadas a seguir.

Parâmetros:

- V Conjunto de todas as tarefas i ;
 E Conjunto das precedências (i, j) entre as tarefas i e j ;
 M^{St} Conjunto de todos os postos k ;
 t_i Tempo de execução da tarefa i ; e
 c Tempo de ciclo.

Variáveis:

- X_{ik} Assume 1 quando a tarefa i é atribuída ao posto k e 0 em caso contrário.

No primeiro modelo, denominado SALBP-1, o objetivo é minimizar o número de postos de trabalho, sendo que o tempo de ciclo é previamente determinado. O problema é formulado como um problema de Programação Binária no qual cada variável X_{ik} assume valor 1 quando a tarefa $i \in V$ é atribuída ao posto $k \in M^{St}$ e 0, caso contrário. Como o objetivo é minimizar o número de postos, o conjunto de postos de trabalho considerados deve ser dimensionado de forma adequada antes da solução (SCHOLL, 1999 apud BOYSEN; FLIEDNER, 2008). A formulação matemática do SALBP-1 é apresentada a seguir.

Função objetivo:

$$\text{Min } z = \sum_{k \in M^{St}} x_{nk} \times k \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (8)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} k \times x_{ik} \leq \sum_{k \in M^{St}} k \times x_{jk}, \forall (i, j) \in E \quad (9)$$

$$\max_{k \in M^{St}} \{ \sum_{i \in V} x_{ik} \times t_i \} \leq c \quad (10)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V; k \in M^{St} \quad (11)$$

Nesse modelo a função-objetivo (7) procura minimizar o índice do posto no conjunto M^{St} ao qual é atribuída a última tarefa do gráfico de precedência. Desta forma o modelo consegue minimizar o número de postos de trabalho utilizados. A restrição (8) impõe que cada tarefa é atribuída a exatamente um posto. A restrição (9) determina que uma tarefa é atribuída a um posto apenas se todos os seus antecessores já foram atribuídos. A restrição (10) estabelece que o tempo do trabalho de um posto não pode exceder a duração do tempo de ciclo previamente dado.

No segundo modelo, chamado SALBP-2, o objetivo é minimizar o tempo de ciclo à partir de um dado número de postos de trabalho m (com $M^{St} = \{1, \dots, m\}$). As notações utilizadas no problema do tipo SALBP-2 são apresentadas a seguir.

Parâmetros:

- V Conjunto de todas as tarefas i ;
- E Conjunto das precedências (i, j) entre as tarefas i e j ;
- M^{St} Conjunto de todos os postos k ; e
- t_i Tempo de execução da tarefa i .

Variáveis:

- X_{ik} Assume 1 quando a tarefa i é atribuída ao posto k e 0 em caso contrário; e
- c Tempo de ciclo.

Esse modelo é solucionado através do *Lower Bound Search*. Tal técnica parte do princípio que se o limite inferior de um problema é igual ao limite superior e este é comprovadamente o valor ótimo, o cálculo pode ser interrompido imediatamente (PAPE, 2015). Ele começa com $c = lower\ bound$ e usa um procedimento para verificar se a atribuição de todas as tarefas para os m postos de trabalho existe. Se uma solução é encontrada, o algoritmo termina, caso contrário c é aumentado em 1 e o processo é repetido. O *lower bound* pode ser computado, por exemplo, através, da equação seguinte (SCHOLL; VOB, 1996)

$$\max \left\{ \left\lceil \frac{t_{sum}}{m} \right\rceil, t_{max} \right\} \quad (12)$$

Na equação 12 t_{sum} corresponde a soma dos tempos de todas as tarefas e t_{max} corresponde ao tempo máximo de tarefa.

Pape (2015) explica que fortes limites inferiores são valiosos para avaliar a qualidade de uma solução e reduzir o tempo de processamento. Assim, nem todas

as soluções possíveis são criadas, porém todas são consideradas e implicitamente avaliadas.

O método *Branch-and-Bound*, princípio do *Lower Bound Search*, fundamenta-se na realização de sucessivas subdivisões do espaço das soluções diminuindo a gama de combinações através da consideração de limites calculados ao longo da enumeração. Assim estabelece-se um limite inferior \underline{c} , obtido através de uma solução inteira já conhecida. O limite superior \bar{c} é determinado pelo maior valor da função objetivo dentro de todas as combinações possíveis.

À medida que o tempo de ciclo pode agora variar entre um limite superior e inferior ($\underline{c} \leq c \leq \bar{c}$), problemas de caminho mínimo têm que ser resolvidos repetidamente para cada tempo de ciclo que começa com o limite inferior \underline{c} (BOYSEN; FLIEDNER, 2008). Assim que o número mínimo de postos m' calculado para um determinado tempo de ciclo coincide com o número requerido de postos m , o procedimento pode ser interrompido, uma vez que o tempo de ciclo ótimo foi encontrado (BOYSEN e FLIEDNER, 2008). A modelagem matemática tem a seguinte forma:

Função objetivo:

$$\text{Min } z = c \quad (13)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (14)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} k \times x_{ik} \leq \sum_{k \in M^{St}} k \times x_{jk}, \forall (i, j) \in E \quad (15)$$

$$\max_{k \in M^{St}} \{ \sum_{i \in V} x_{ik} \times t_i \} \leq c \quad (16)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{|V|k} \times k \leq m \quad (17)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V; k \in M^{St} \quad (18)$$

Para o SALBP-2 a restrição 17 é acrescentada. Tal inequação garante que nenhuma tarefa seja atribuída a um posto de trabalho inexistente.

O SALBP-E procura um valor de c e m , respectivamente, dentro de um intervalo $\underline{c} \leq c \leq \bar{c}$ e $\underline{m} \leq m \leq \bar{m}$. De modo semelhante a obtenção do limite superior e inferior de c , é obtido o limite inferior \underline{m} e o limite superior \bar{m} para o número de

postos m . As notações utilizadas no problema do tipo SALBP-E são apresentadas a seguir.

Parâmetros:

- V Conjunto de todas as tarefas i ;
 E Conjunto das precedências (i, j) entre as tarefas i e j ;
 M^{St} Conjunto de todos os postos k ; e
 t_i Tempo de execução da tarefa i .

Variáveis:

- x_{ik} Assume 1 quando a tarefa i é atribuída ao posto k e 0 em caso contrário;
 c Tempo de ciclo; e
 m Postos de Trabalho.

O objetivo é minimizar alguma medida de eficiência, por exemplo, o produto do tempo de ciclo pelo número de postos de trabalhos. A formulação matemática do SALBP-E é fornecida em seguida.

Função objetivo:

$$\text{Min } z = c \times m \quad (19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (20)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} k \times x_{ik} \leq \sum_{k \in M^{St}} k \times x_{jk}, \forall (i, j) \in E \quad (21)$$

$$\max_{k \in M^{St}} \{ \sum_{i \in V} x_{ik} \times t_i \} \leq c \quad (22)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V; k \in M^{St} \quad (23)$$

$$\underline{m} \leq m \leq \bar{m} \quad (24)$$

$$\underline{c} \leq c \leq \bar{c} \quad (25)$$

Similarmente ao SALBP-2, para o SALBP-E o problema de caminho mínimo é aplicado até encontrar um valor ótimo. Porém, ele parte de uma abordagem conhecida como *Upper Bound Search*. Boysen e Fliedner (2008) explicam que se todas as combinações de c e m são avaliadas por ordem ascendente, a pesquisa pode

ser anulada assim que uma combinação viável de c e m é encontrada. De tal combinação obtém-se a atribuição ótima para uma dada sequência.

Gokcen e Erel (1997) usam uma técnica de pesquisa operacional conhecida como *Goal Programming*. Eles utilizam um modelo de preferências, devido à dificuldade de atribuir pesos para os vários objetivos. Os objetivos envolvem o número de postos de trabalhos, o tempo de ciclo e as atribuições de tarefas a determinados postos de trabalho.

Por meio de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, Ozturk et al. (2013) abordam 3 subproblemas separadamente: 1) atribuição e programação de tarefas de todo produto para exatamente um posto na linha de montagem; 2) atribuição de tarefas para ao menos um posto; e 3) atribuição e programação do produto para exatamente um posto paralelo em todas as fases. Tal modelagem é feita para uma linha de montagem com postos de trabalho paralelos.

Fattahi e Turkay (2015) propõe um modelo de Programação Linear Inteira para a modelagem de uma linha de montagem em forma de U. O modelo é construído a partir de um SALBP, com exceção das restrições de precedência. Para as restrições de precedência eles utilizam variáveis com valores 1 ou 0 para representar o cenário ou-ou.

Ozcan e Toklu (2009) sugerem um modelo de Programação Inteira para minimizar o número de postos dado o tempo de ciclo. Em seu modelo são consideradas restrições de zoneamento, restrição posicional e tarefas síncronas.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta a metodologia de trabalho, descrevendo as etapas para alcançar os objetivos propostos no Capítulo 1. Ele também traz uma breve descrição da empresa e um detalhamento da linha de montagem. Com base no referencial teórico, são feitas as considerações a respeito da linha de montagem escolhida e, na sequência, é apresentada a aplicação do modelo proposto para o balanceamento de linha simples.

3.1 METODOLOGIA

Esse trabalho caracteriza-se por um estudo de caso realizado em uma empresa do ramo automobilístico. O caráter de pesquisa é classificado como quantitativo, uma vez que visa maior objetividade e a coleta de dados usa instrumentos estruturados.

O objeto de estudo compreende uma das linhas de montagem de uma montadora, mais precisamente a Linha de Cabine 2. A Linha de Cabine 2 caracteriza-se pela finalização e montagens externas da cabine. Os dados foram levantados junto com o departamento de engenharia de manufatura através de análise documental e observações da linha de montagem. O documento analisado para extração do tempo foi a folha de métodos. A folha de método apresenta as tarefas que são realizadas em cada posto de trabalho e os respectivos tempos de execução.

Os desenhos de montagem e observação espontânea auxiliaram a determinar a precedências das tarefas, identificar as características da linha de montagem e, assim, identificar o modelo matemático mais adequado presente na literatura para esse caso. Por fim, o modelo matemático foi implementado em um *software* de programação matemática.

O fluxograma, ilustrado na Figura 9, apresenta as etapas necessárias para a conclusão desse trabalho.

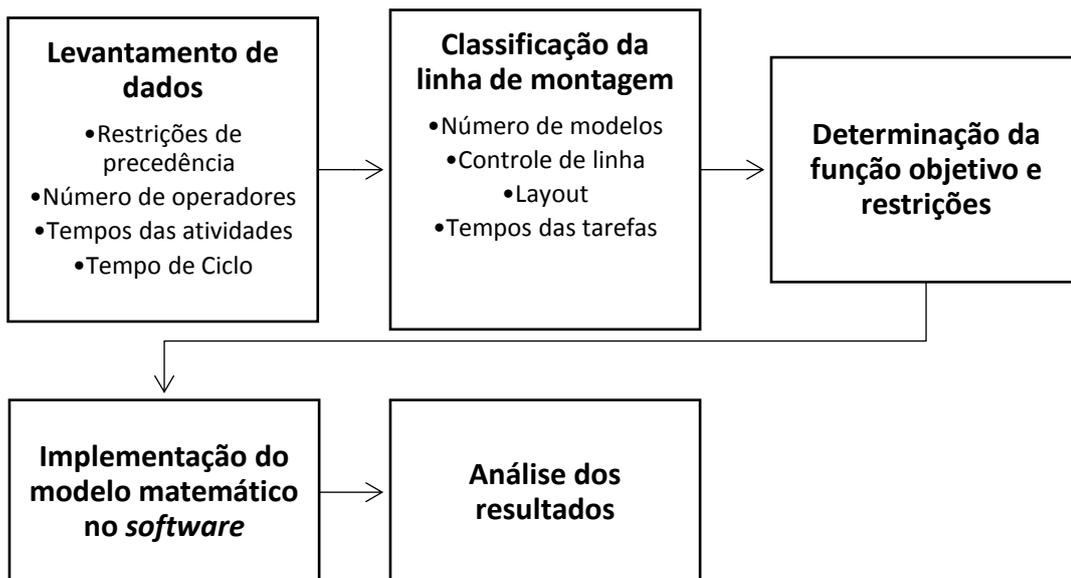


Figura 9 - Fluxograma de metodologia
Fonte: Autoria própria (2016).

3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada, por questões de sigilo, é designada neste trabalho como empresa Alfa, é uma automobilística multinacional localizada na região sul do Brasil.

Na Figura 10 é apresentado um esquema do layout da empresa, demonstrando qual é o fluxo do produto, desde o início da linha até a estação final.

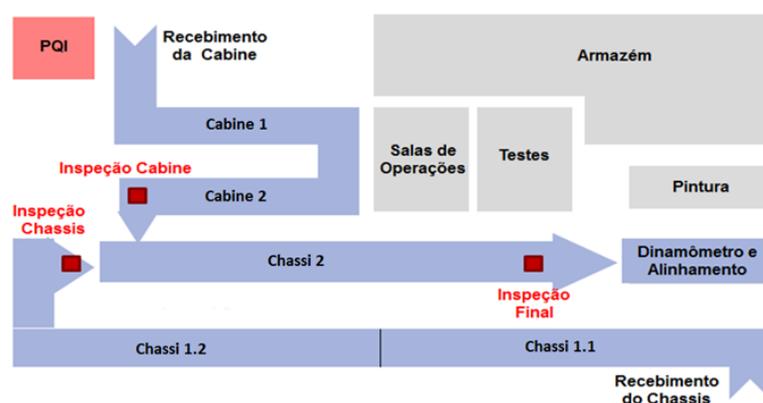


Figura 10 - Layout da empresa Alfa
Fonte: Empresa Alfa (2016).

A montagem do chassi inicia-se na Linha de Chassi 1.1 e segue por uma esteira até a Linha de Chassi 1.2. No final da Linha de Chassi 1.2 é feita uma inspeção de qualidade. Então, o chassi é transportado por meio de uma ponte rolante até a

Linha de Chassi 2. Paralelamente inicia-se a montagem da cabine da linha de Cabine 1 e segue por meio de uma esteira até a Linha de Cabine 2, onde as montagens da cabine são finalizadas. Então, por meio de trilhos suspensos a cabine é transferida para a Linha de Chassi 2, onde ocorre o casamento da cabine com o chassi. Após o casamento, mais algumas montagens são realizadas, tais como a instalação do para-choque, das rodas, entre outras. Com a finalização das montagens é feita um teste no dinamômetro e, em seguida, o alinhamento final. Na área de testes são realizados alguns retrabalhos quando necessários. Por fim, uma última inspeção é realizada no PQI. Existe uma sala para a pintura de peças plásticas. No armazém, uma área logística, são armazenadas as peças necessárias para o abastecimento de linha. A sala de operações é um espaço destinado a área de qualidade.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA ESTUDADA

A linha estudada é a Linha de Cabine 2. Ela foi escolhida por apresentar uma maior flexibilidade para alocação de tarefas em diferentes postos em virtude da relação de precedência das mesmas e da disposição atual dos equipamentos.

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Figura 11 - Representação da linha de cabine 2
Fonte: Autoria Própria (2016).

Tal linha é formada por 16 estações, como observa-se na Figura 11, cada uma com um tamanho de 1,8 metros. As estações 28 e 29 são usadas somente para inspeção da qualidade. A nomenclatura de estações é usada para facilitar o endereçamento logístico e nesse trabalho com o intuito de especificar o posicionamento das ferramentas e manipuladores. Um posto de trabalho pode incluir uma ou mais estações.

A linha de cabine 2 é a única que possui um robô. Ele executa a aplicação de cola no para-brisa, que posteriormente é colado na estação 18, em razão do manipulador de pressão de fixação utilizado.

Existem 6 apertadeiras elétricas alocadas ao longo da linha. Na estação 18, uma apertadeira elétrica *wireless* é utilizada para aperto da alça traseira. Na estação 23 o aperto do banco é feito com apertadeira elétrica, assim como o aperto do volante.

Na estação 25, uma apertadeira elétrica é utilizada para o aperto da alça frontal e uma apertadeira elétrica *wireless* é utilizada para o aperto do batente da porta. Por fim, na estação 28, uma apertadeira elétrica *wireless* é utilizada para o aperto do *sun visor* ou protetor de sol.

Além das ferramentas de aperto, são utilizados manipuladores para auxiliar a montagem de peças grandes. Na estação 18 é utilizado um manipulador para fixação do para-brisa. Para a instalação do banco é utilizado um manipulador disposto na estação 22. O posicionamento da porta, feito na estação 24, também é realizado com o auxílio de um manipulador.

Algumas montagens, como a escada, o para-lama e *sider* são feitas nas estações 31 e 32, onde a cabine encontra-se suspensa por meio do EMS (*electrified monorail system*) possibilitando tais montagens. Devido a obrigatoriedade de realização de tais montagens nas estações 31 e 32, elas não são abordadas no problema de balanceamento.

Após a finalização de todas as montagens, a cabine segue através de um trilho automático até a Linha de Chassi 2, onde ocorre o casamento do chassi com a cabine.

3.4 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Os dados necessários para a implementar o modelo foram obtidos através da folha de método. A folha de método descreve a ordem das atividades e o tempo necessário para execução das mesmas.

A empresa em questão utiliza o *Method Time Measurement* (MTM) para estabelecer a duração de cada atividade. Portanto pode-se considerar tais tempos como determinísticos. O conceito básico de MTM é analisar uma tarefa em seus micro movimentos, aplicar a cada micro movimento um tempo padrão pré-determinado e sintetizá-los em um tempo total (GIRONIMO et al., 2012). Portanto, a performance do operador não é considerada nesse método. Para preservar o sigilo dos números fornecidos pela empresa, os mesmos foram multiplicados por um fator α , com $0 < \alpha < 1$ e expressos em UT, conforme observa-se na Tabela 1.

Na Tabela 1 estão listadas as tarefas e seus tempos referente ao modelo de caminhão denominado V. As tarefas apresentadas na Tabela 1 são parte da

montagem da cabine do caminhão V, sendo executadas na Linha de Cabine 2 e, portanto, devem ser distribuídas entre os postos dessa linha.

Para diminuir o número de variáveis e tornar possível obter um resultado ótimo dentro de um tempo de processamento viável, algumas tarefas menores foram agrupadas. As tarefas que foram agrupadas eram, obrigatoriamente, sequenciais e utilizam os mesmos recursos.

Todos os postos de trabalhos possuem o mesmo tempo de ciclo e a cabine é transportada através de uma correia transportadora com velocidade constante. Isso configura uma linha de montagem *paced*. O tempo de ciclo necessário para atender a demanda é de 126 UT. O valor foi fornecido pela empresa e, por questões de sigilo, foi multiplicado por um fator α , com $0 < \alpha < 1$, do mesmo modo que os tempos de execução das tarefas.

Quanto ao número de produtos, a empresa possui mais de um modelo de caminhão. Entretanto, foram fornecidos os tempos de atividades de um único caminhão, sendo esse o que possui maior demanda. Por isso, optou-se por caracterizar a linha como simples.

Por observação, o layout é em linha. Todos os postos estão organizados em série ao longo do fluxo da linha.

Tabela 1 - Duração das Tarefas do Modelo V

(continua)

Tarefas	Duração (UT)
Tarefa 1	8
Tarefa 2	7
Tarefa 3	34
Tarefa 4	2
Tarefa 5	4
Tarefa 6	2
Tarefa 7	2
Tarefa 8	2
Tarefa 9	6
Tarefa 10	3
Tarefa 11	11
Tarefa 12	10
Tarefa 13	5
Tarefa 14	5
Tarefa 15	2
Tarefa 16	6
Tarefa 17	2

Tabela 1 – Duração das Tarefas do Modelo V

Tarefas	Duração (UT)
Tarefa 18	3
Tarefa 19	13
Tarefa 20	14
Tarefa 21	4
Tarefa 22	14
Tarefa 23	3
Tarefa 24	2
Tarefa 25	23
Tarefa 26	21
Tarefa 27	9
Tarefa 28	18
Tarefa 29	13
Tarefa 30	8
Tarefa 31	19
Tarefa 32	8

(conclusão)

Fonte: Autoria Própria (2016)

O próximo passo corresponde a elaboração do diagrama de precedências e, em seguida, da matriz de precedências. O diagrama de precedência é apresentado na Figura 12 e mostra as relações de dependência entre as tarefas.

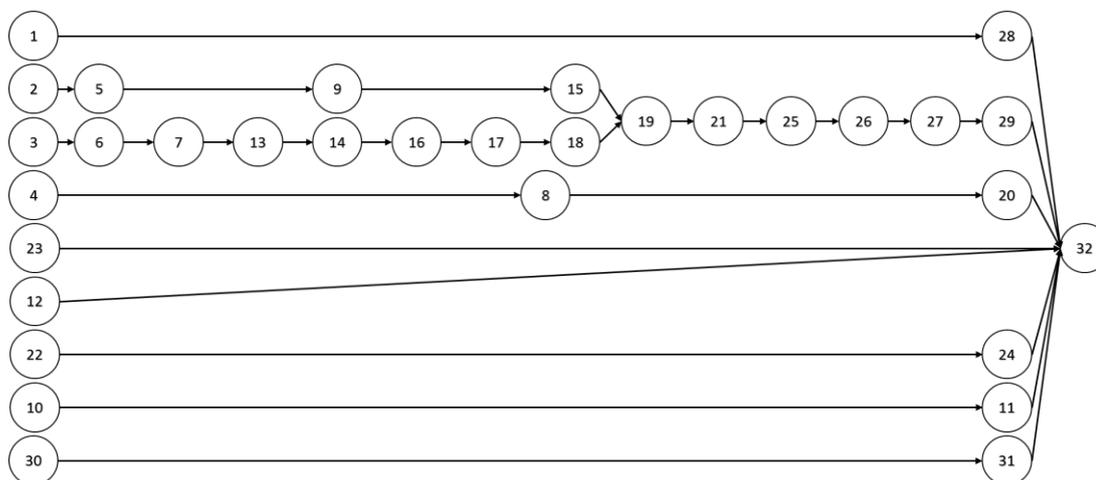


Figura 12 - Diagrama de precedência do modelo V

Fonte: Autoria Própria (2016).

A Figura 12 apresenta um grafo com 32 nós, no qual cada nó corresponde a uma tarefa. O grafo apresenta vários nós iniciais, mas sempre um único nó final, no caso a tarefa 32. Enquanto a maioria das tarefas apresentam somente um antecessor

Etapa 1

Inicialmente tal modelo foi implementado e resolvido no *software* de otimização com o objetivo de definir o número mínimo de postos de trabalho para o tempo de ciclo da empresa.

Etapa 2

Em seguida, visando diminuir o desbalanceamento entre os diferentes postos de trabalho, o modelo foi adaptado. Nessa adaptação foi inserida uma variável chamada e_{max} , que indica o tempo total de trabalho do posto com a maior carga de trabalho em termos de tempo. Tal variável foi utilizada na função-objetivo e em uma nova restrição do modelo adaptado. O modelo proposto é apresentado a seguir.

Parâmetros:

- V Conjunto de todas as tarefas i ;
- E Conjunto das precedências (i, j) entre as tarefas i e j ;
- M^{St} Conjunto de todos os postos k ;
- t_i Tempo de execução da tarefa i ; e
- c Tempo de ciclo.

Variáveis:

- X_{ik} Assume 1 quando a tarefa i é atribuída ao posto k e 0 em caso contrário; e
- e_{max} Maior tempo de um posto de trabalho.

Função objetivo:

$$\text{Min } z = \sum_{k \in M^{St}} x_{nk} \times k + e_{max}/(c \times 10) \quad (26)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (27)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} k \times x_{ik} \leq \sum_{k \in M^{St}} k \times x_{jk}, \forall (i, j) \in E \quad (28)$$

$$\max_{k \in M^{St}} \{ \sum_{i \in V} x_{ik} \times t_i \} \leq e_{max} \quad (29)$$

$$e_{max} \leq c \quad (30)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V; k \in M^{St} \quad (31)$$

Desse modo, a função objetivo (26) assume um caráter multiobjetivo com dois fatores. O fator 1 indica que a função objetivo prioriza a diminuição do número de postos de trabalho. O valor assumido no fator 2 é pequeno o suficiente para não interferir no número de postos de trabalho. Observa-se que a ordem de grandeza do primeiro termo da função-objetivo (somatório) sempre será maior que a do segundo termo da função-objetivo (divisão que envolve e_{max}). Desse modo o modelo proposto sempre buscará minimizar o número de postos utilizados e, sem prejudicar esse valor, irá buscar como um objetivo secundário um maior balanceamento entre os tempos de trabalho dos postos. Assim a minimização do número de postos de trabalho jamais será prejudicada para se alcançar melhor balanceamento.

Etapa 3

A terceira etapa envolveu as equações e inequações (13) a (18) e tinha por objetivo definir o tempo de ciclo mínimo prevendo um aumento da demanda.

Parâmetros:

- V Conjunto de todas as tarefas i ;
- E Conjunto das precedências (i, j) entre as tarefas i e j ;
- M^{St} Conjunto de todos os postos k ; e
- t_i Tempo de execução da tarefa i .

Variáveis:

- X_{ik} Assume 1 quando a tarefa i é atribuída ao posto k e 0 em caso contrário; e
- c Tempo de ciclo.

Função objetivo:

$$\text{Min } z = c \quad (32)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (33)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} k \times x_{ik} \leq \sum_{k \in M^{St}} k \times x_{jk}, \forall (i, j) \in E \quad (34)$$

$$\max_{k \in M^{St}} \{ \sum_{i \in V} x_{ik} \times t_i \} \leq c \quad (35)$$

$$\sum_{k \in M^{St}} x_{|V|k} \times k \leq m \quad (36)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V; k \in M^{St} \quad (37)$$

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos modelos matemáticos implementados para o problema de balanceamento da linha de cabine estudada. Na primeira seção é apresentada a solução atual da empresa Alfa

4.1 BALANCEAMENTO DA LINHA DE MONTAGEM DA EMPRESA ALFA

O balanceamento adotado atualmente pela empresa Alfa parte do princípio de minimizar o número de postos de trabalho, uma vez que o tempo de ciclo é estabelecido pela alta gerência. Entretanto, nenhum *software* de otimização é usado para realizar o balanceamento.

Tabela 2 - Distribuição de Tarefas Utilizada pela Empresa Alfa

Postos de Trabalho	Tarefas	Tempo de Operação (UT)
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	81
2	12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	106
3	26,27,28,29,30,31,32	96

Fonte: Adaptado Empresa Alfa (2016)

Conforme pode-se ver na Tabela 2, as trinta e duas tarefas são distribuídas entre 3 postos de trabalho. O tempo de ciclo real é determinado pelo posto com maior carga de trabalho, no caso 106 UT. O tempo ocioso calculado em relação ao tempo de ciclo real (106 UT) é de 35 UT e em relação ao teórico (126 UT) é de 95 UT.

O desbalanceamento entre os postos de trabalho pode gerar um desconforto no chão de fábrica, uma vez que a carga de trabalho não é similar ou próxima para todos os postos de trabalho. Com a distribuição de tarefas apresentadas na Tabela 2, a perda por desbalanceamento chega a 11%. Tal valor foi obtido utilizando o tempo de ciclo real. Para o tempo de ciclo teórico a perda por desbalanceamento é de 25 %.

No Gráfico 1, a linha preta contínua representa o tempo de ciclo teórico, no caso 126 UT. A linha preta pontilhada indica o tempo de ciclo real. Além disso, observa-se que 3 postos de trabalho satisfazem a condição de que o tempo total do posto deve ser menor ou igual ao tempo de ciclo.

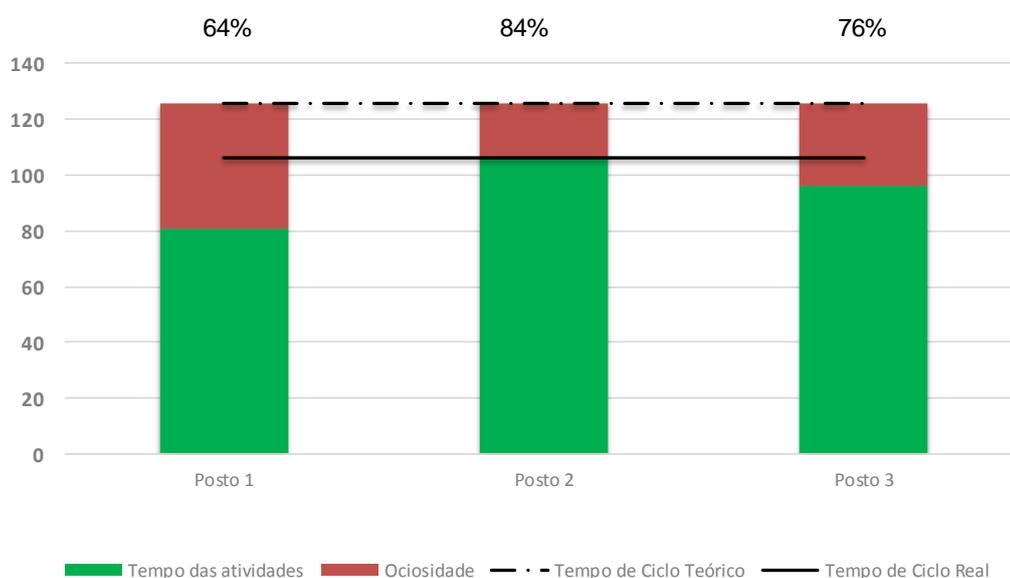


Gráfico 1 - Balanceamento de Linha Utilizado pela Empresa Alfa
Fonte: Adaptado da Empresa Alfa (2016)

No Gráfico 1, a ociosidade e a carga de trabalho foram calculadas a partir do tempo de ciclo teórico. O posto mais ocioso é o posto 1 que apresenta carga de trabalho igual a 64%. O tempo de ciclo real representa um aumento da capacidade de produção de aproximadamente 19%. O tempo ocioso representa um recurso desperdiçado, uma vez que o tempo de produção disponível não é usado integralmente. Portanto, deve-se sempre buscar diminuir o tempo ocioso.

Além do desperdício gerado, a ociosidade pode dificultar um processo de padronização que resultaria em diminuição de defeitos de fabricação e de riscos de acidentes.

4.2 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO SALBP-1

Nessa etapa buscou-se o número mínimo de postos de trabalho para o tempo de ciclo fornecido pela empresa. Para tanto foi utilizado o modelo de Scholl (1999 apud Boysen; Fliedner, 2008). A Tabela 3 apresenta a distribuição de tarefas e o tempo de operação obtido com o modelo matemático proposto na literatura.

Tabela 3 - Balanceamento Proposto Usando Modelo Matemático

Postos de Trabalho	Tarefas	Tempo de Operação (UT)
1	2, 3, 5, 22	59
2	1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 30	99
3	20, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32	125

Fonte: Autoria Própria (2016)

O modelo propõe 3 postos de trabalho, semelhante ao balanceamento utilizado pela empresa em estudo. Porém, a distribuição das tarefas é diferente, o que resultou em um maior desbalanceamento. Esse modelo matemático não possui uma restrição que vise proporcionar uma distribuição de tarefas de modo que os postos de trabalho possuam tempo de operação similares. Ele procura alocar as tarefas em um posto, respeitando as restrições de precedência, com o único objetivo de diminuir o número total de postos de trabalho.

O tempo de ciclo real obtido com o modelo matemático é 125 UT. O tempo ocioso calculado em relação ao tempo de ciclo real é 92 UT e a perda por balanceamento chega a 24%. Desse modo, nenhum ganho foi obtido em relação ao atual balanceamento utilizado pela empresa Alfa. O tempo ocioso em relação ao teórico é 95 UT, mesmo valor obtido no balanceamento utilizado pela empresa em estudo.

O Gráfico 2 apresenta as cargas de trabalhos para os postos de trabalho de acordo com o resultado do modelo matemático proposto na literatura.

Gráfico de Balanceamento

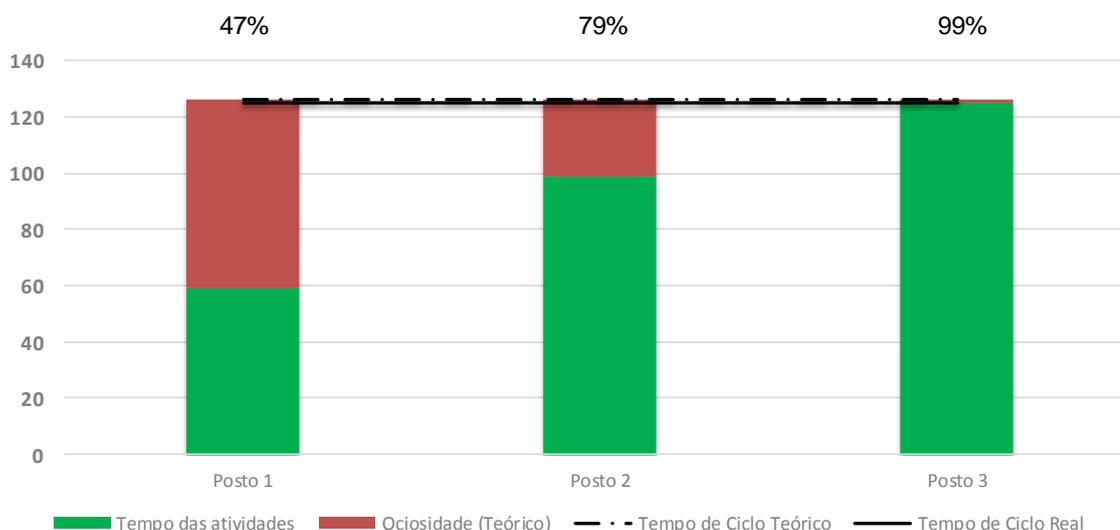


Gráfico 2 - Balanceamento Modelo Matemático SALBP-1
Fonte: Autoria Própria (2016)

No Gráfico 2, a ociosidade e a carga de trabalho foram calculadas a partir do tempo de ciclo teórico. O posto mais ocioso é o posto 1 que apresenta carga de trabalho igual a 47%.

4.3 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO

Com o mesmo objetivo, porém procurando diminuir também a perda por balanceamento, o modelo adaptado foi aplicado e o resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Balanceamento do Modelo Adaptado

Postos de Trabalho	Tarefas	Tempo de Operação (UT)
1	2, 3, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 22	93
2	5, 9, 11, 15, 19, 21, 23, 24, 25, 30, 31	95
3	1, 4, 8, 20, 26, 27, 28, 29, 32	95

Fonte: Autoria Própria (2016)

O tempo de ciclo real para o modelo adaptado é 95 UT e a perda de balanceamento diminuiu para menos de 1%. O tempo ocioso calculado em relação ao tempo de ciclo real é 2 UT e em relação ao teórico é 95 UT.

Observa-se que o número de operados é o mesmo, porém a alocação de tarefas é diferente.

Para a implantação do resultado obtido pelo modelo matemático adaptado as mudanças necessárias envolvem o estabelecimento de um novo ponto de abastecimento para o fornecimento das peças nas estações adequadas.

O Gráfico 3 apresenta as cargas de trabalhos para os postos de trabalho de acordo com o resultado do modelo matemático adaptado.

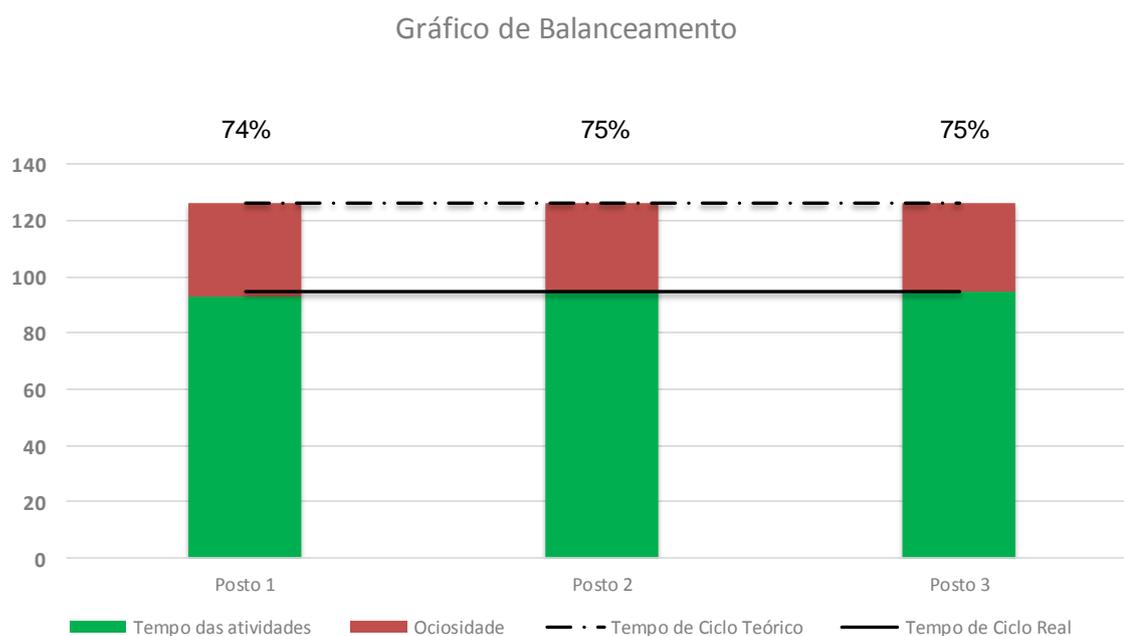


Gráfico 3 - Balanceamento Modelo Adaptado
Fonte: Aatoria Própria (2016)

O Gráfico 3 ilustra a distribuição de tempo entre os 3 postos de trabalho e o tempo ocioso de cada um deles. Com a observação do gráfico, verifica-se que o posto 1 apresenta uma carga de trabalho de 74 %, resultante das tarefas alocadas a ele. O segundo posto apresenta carga de trabalho igual a 75% seguida por um posto com a mesma carga de trabalho.

Com a utilização do modelo matemático adaptado, foi possível obter um ganho de 10,38% no tempo de ciclo real da linha. O valor é obtido pelo seguinte cálculo:

$$\frac{106-95}{106} \times 100 \quad (38)$$

Esse ganho do tempo de ciclo real permitiu um aumento na capacidade de produção de 11,58%.

4.4 RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO PARA SALBP-2

Na terceira etapa, foi analisado qual o tempo de ciclo para 4 postos de trabalho. Foram escolhidos 4 postos de trabalho por esse cenário se aproximar mais da realidade da empresa. O tempo de ciclo tende a diminuir, a partir do aumento de demanda. Por isso, tal análise é importante para auxiliar na tomada de decisões sobre um aumento de produção. O tempo de ciclo e a alocação das tarefas são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado do Balanceamento de Linha SALBP-2

Postos de Trabalho	Tarefas	Tempo de Operação (UT)
1	2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 23	71
2	4, 8, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 25	71
3	1, 20, 26, 27, 28	70
4	11, 12, 24, 29, 30, 31, 32	71

Fonte: Autoria Própria

O tempo de ciclo adotado para esse balanceamento é de 71 UT. O número de postos de trabalho irá sempre variar de acordo com o tempo de ciclo, de modo que quanto menor o tempo de ciclo, mais postos de trabalho são necessários. Uma vez que o número de postos de trabalho varia, a alocação de tarefas para os mesmos também sofre mudanças.

O gráfico de balanceamento para o SALBP-2, Gráfico 4, mostra uma linha de montagem com postos de trabalho com carga de trabalho similar ou muito próxima e ociosidade baixa.



Gráfico 4 - Balanceamento da Linha de Cabine Proposto SALBP-2
Fonte: Autoria Própria (2016)

Para esse cenário, o tempo ocioso é de 1 UT e a perda por balanceamento é de 0,35 %. A capacidade produtiva considerando o tempo de ciclo real aumentou em torno de 49 %. Esse aumento é explicado, principalmente pelo aumento de um posto de trabalho.

4.5 COMPARAÇÕES ENTRE AS DIFERENTES SOLUÇÕES

São usadas algumas medidas de desempenho para avaliar se a distribuição de tarefas entre os postos de trabalhos foi bem-sucedida. As fórmulas são apresentadas na Seção 2.4. A Tabela 6 sintetiza os resultados obtidos. Os cálculos foram baseados no tempo de ciclo real, uma vez que ele já representa um ganho se for menor que o tempo de ciclo teórico. Isso significa que a distribuição de tarefas adotadas permitiu um aumento da capacidade de produção.

A empresa estudada vem aplicando o balanceamento de linha para melhorar o processo produtivo, prova disso são os resultados mostrados na Tabela 6.

Em termos de índice de suavidade, os melhores resultados são obtidos com SALBP-1 Adaptado e SALBP-2 derivado das distribuições mais uniformes de tarefas entre os postos de trabalho. Desse modo, não existe um posto com sobrecarga de trabalho em contraste com um posto ocioso. No caso do SALBP-1 adaptado obtém-

se um tempo de ciclo real mais baixo que o tempo de ciclo teórico, o que permite um aumento da capacidade produtiva sem contratação de mão de obra nova.

Tabela 6 - Comparativo de Desempenho dos Modelos

Medidas de Desempenho	Empresa Alfa	SALBP -1	SALBP-1 Adaptado	SALBP -2
Índice de Suavidade	27	71	2	1
Eficiência da Linha	88,99%	75,47%	99,30%	99,65%
Tempo de Ociosidade	35	92	2	1
Perda por balanceamento	11%	25%	1%	0,40%

Fonte: Autoria Própria (2016)

Analisando a eficiência da linha, conclui-se que o modelo SALBP-2 e o modelo SALBP-1 Adaptado possuem uma maior utilização da mão de obra e, conseqüentemente, uma menor ociosidade.

O menor tempo de ociosidade foi encontrado para o SALBP-2, sendo o tempo de 1 UT. Tal valor pode ser explicado pela relação de precedência entre as tarefas, na qual uma tarefa com tempo maior precisa ser alocada antes de uma tarefa menor. Ou ainda, pelo fato de algumas tarefas possuírem tempo de duração grande e não poderem ser divididos entre os postos de trabalho.

A perda por balanceamento é o percentual de tempo disponível para produção que não é utilizado de forma produtiva, indicando um grande desperdício de recursos. A maior perda foi encontrada para o SALBP-1 e o melhor resultado foi encontrado para o SALBP-2.

A Tabela 7 faz um comparativo entre o balanceamento da Empresa Alfa e o balanceamento obtido através do SALBP-1 Adaptado, uma vez que esse último mantém o mesmo número de postos de trabalho e apresenta melhores resultados do que o atual balanceamento da empresa Alfa.

O novo balanceamento não foi implantado na empresa, entretanto sua implantação não é custosa. O treinamento dos operadores para as novas atividades e o estabelecimento dos novos pontos de abastecimentos seriam necessários.

Tabela 7 - Comparação das Medidas de Desempenho

Medidas de Desempenho	Empresa Alfa	SALBP-1 Adaptado	Melhorias
Índice de Suavidade	27	2	93%
Eficiência da Linha	89%	99%	11%
Tempo de Ociosidade	35	2	94%
Perda por Balanceamento	11%	1%	91%
Tempo de Ciclo Real	106	95	10 %

Fonte: Autoria Própria (2016)

As melhorias de 93% no índice de suavidade, de 11% na eficiência da linha, de 94% no tempo de ociosidade, de 91% de perda por balanceamento e de 10% no tempo de ciclo real obtidas com o SALBP-1 Adaptado, em termos práticos, não diminuem o número de postos de trabalho. Entretanto, as melhorias obtidas com a nova distribuição de tarefas garantem o melhor uso da mão de obra disponível o que gera um aumento da capacidade produtiva de 11,58 %.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou problemas relacionados ao balanceamento de linha de montagem. Foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre linha de montagem, balanceamento de linha de montagem e técnicas para o balanceamento de linha de montagem. A revisão da literatura revelou que novos métodos de resolução do problema de balanceamento de linha têm surgido, procurando cada vez mais representar fielmente a realidade das empresas.

O problema do balanceamento de linha foi aplicado a uma empresa do setor automobilístico, mais especificamente a uma linha de cabines. Dos 4 tipos de SALBP existentes foram analisados dois tipos: SALBP-1 e SALBP-2, sendo que foi proposta uma adaptação ao modelo SALBP-1. Os modelos foram implementados utilizando o *software* de programação matemática.

A solução encontrada para o SALBP-1 foi comparada com a solução utilizada pela empresa, pois ambas tinham o mesmo objetivo, no caso, diminuir o número de postos de trabalho. Quando a solução encontrada não apresentou ganhos, o modelo matemático foi adaptado para diminuir a diferença de carga de trabalho entre os postos. Essa adaptação resultou em ganhos para todas as medidas de desempenho analisadas.

Desse modo, o SALBP-1 Adaptado melhorou os índices de suavidade, eficiência, ociosidade e perda por balanceamento. Os ganhos obtidos em relação ao balanceamento da empresa indicam um ganho de produtividade de quase 12%, uma redução de aproximadamente 94% do tempo de ociosidade e uma diminuição da perda por balanceamento de quase 91%.

O SALBP-2 apresentou ótimos resultados, com perda de balanceamento inferior a 1% e eficiência superior a 99%, num cenário de 4 postos de trabalho.

Os resultados obtidos evidenciam a importância do balanceamento de linha como forma de alcançar melhores resultados no processo produtivo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise dos problemas do tipo MALBP, os quais envolvem mais de um produto. Observa-se que a tendência é a inserção de novos produtos na linha de montagem para conquistar outras parcelas do mercado. Logo, a atribuição adequada de tarefas entre os postos de trabalho, maximizando a eficiência da linha e diminuindo o tempo de ociosidades dos postos é essencial para

não aumentar os custos da empresa. Nesse sentido, pode-se, também, introduzir o problema de sequenciamento.

REFERÊNCIAS

- AJENBLIT, D. A.; WAINWRIGHT, R. L. **Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem.** Evolutionary Computation Proceedings. P. 96-101. 1998.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional.** 3ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BATTAIA, O.; DOLGUI, A. **A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches.** Int. J. Production Economics. V. 142, p. 259-277. 2013.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. **A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing.** European Journal of Operational Research. V. 168, p. 694-715. 2006.
- BHATTACHARJEE, T.K.; SAHU, S. **A Critique of Some Current Assembly Line Balancing Techniques.** International Journal of Operations & Production Management. V. 7, p. 32 – 43. 1987.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. **A classification of assembly line balancing problems.** European Journal of Operational Research. V. 183, p. 674-693. 2007.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. **A versatile algorithm for assembly line balancing.** European Journal of Operational Research. V. 184, p. 39-56. 2008.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. **Assembly line balancing: Which model to use when?** International Journal of Production Economics. V. 111, p. 509-528. 2008.
- BREGINSKI, R. B. **Balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem de modelo misto: um estudo de caso da indústria automotiva no Brasil.** Dissertação-Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.
- CAPACHO, L.; PASTOR, R.; DOLGUI, A.; GUSCHINSKAYA, O. **An evaluation of constructive heuristic methods for solving the alternative subgraphs assembly line balancing problem.** Journal of Heuristics. V. 15, p. 109-132. 2009.

CHIANG, W-C.; URBAN, T. L. **The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure.** European Journal of Operational Research. V. 175, p. 1767-1781. 2006.

CRISTO, R. L. **Balanceamento de Linhas de Montagem com Uso de Algoritmo Genético para o Caso de Linhas Simples e Extensões.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção. Departamento de Engenharia de produção e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.

EGE, Y.; AZIZOGLU, M.; OZDEMIREL, N. E. **Assembly line balancing with station paralleling.** Computers & Industrial Engineering. V. 57, p. 1218-1225. 2009

FAN, W.; GAO, Z.; XU, W.; XIAO, T. **Balancing and simulating of assembly line with overlapped and stopped operation.** Simulation Modelling Practice and Theory. V. 18, p. 1069-1079. 2010.

FATHI, M. GHOBAKHLOO, M. **A technical comment on “a review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches”.** Int. J. Adv. Manuf. Technol. V. 71, p. 2033 -2042, 2014.

FATTAHI, A.; TURKAY, M. **On the MILP model for the U-shaped assembly line balancing problems.** European Journal of Operational Research. V. 242, p. 343-346. 2015.

GOKCEN, H.; EREL, E. **A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem.** Int. J. Production Economics. V 48, p. 177-185. 1997.

GIRONIMO, G. D.; MARTINO, C.D.; LANZOTTI, A.; MARZANO, A.; RUSSO, G. **Improving MTM-UAS to predetermine automotive maintenance times.** International Journal on Interactive Design and Manufacturing. V. 6, p. 265-273. 2012.

HAMTA, H.; GHOMI, S. M.T.F.; JOLAI, F.; SHIRAZI, M. A. **A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect.** Int. J. Production Economis. V. 141, p. 99-111. 2013.

HÖRNER, D. **Resolução do problema das p-mediana não capacitado: Comparação de algumas técnicas heurísticas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

MENDES, A. R.; RAMOS, A. L.; SIMARIA, A. S.; VILARINHO, P. M. **Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line.** Computers & Industrial Engineering. V. 49, p. 413-431. 2005.

MIRALLES, C.; GARCÍA-SABATER, J.P.; ANDRÉS, C.; CARDÓS, M. **Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled.** Discrete Applied Mathematics. V. 156, p. 352-367. 2008.

NAZARIAN, E.; KO, J.; WANG, H. **Design of multi-product manufacturing lines with the consideration of product change dependent inter-task times, reduced changeover and machine flexibility.** Journal of Manufacturing Systems. V. 29, p. 35-46. 2010.

OZCAN, U.; TOKLU, B. **Balancing of mixed-model two-sided assembly lines.** Computers & Industrial Engineering. V. 57, p. 217-227. 2009.

OZTURK, C.; TUNALI, S.; HNICH, B.; ORNEK, A. **Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations.** Int. J. Adv. Manuf. Technol. V. 67, p. 2577- 2591. 2013.

PAPE, T. **Heuristics and lower bounds for the simple assembly line balancing problem type 1: Overview, computational tests and improvements.** European Journal of Operational Research. V. 240, p. 32-42. 2015.

PONNAMBALAM, S.G; ARAVINDAN, P.; NAIDU, G. M. Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. V. 15, p. 577 -586. 1999.

SABUNCUOGLU, I.; EREL, E.; ALP, A. **Ant colony optimization for the single model U-type assembly line.** Int. J. Production Economics. V. 20, p. 287-300. 2009.

SANCHES, A. L. **Sequenciamento de linhas de montagem múltiplas em ambiente de produção enxuta utilizando simulação.** 2010. 142 f. Tese – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2010.

SCHOLL, A.; BECKER, C. **State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing.** European Journal of Operation Research. V. 168, p. 666-693. 2006.

SCHOLL, A.; VOB, S. **Simple Assembly Line Balancing—Heuristic Approaches.** Journal of Heuristic. V. 2, p. 217-244. 1996.

SIHOMBING, H.; AKBAR, H.; PERUMAL, P.; YAAKOB, M. Y.; RAZAK, J. A. **Real of simply assembly line balancing using fact-model.** International Journal of Computer and Electrical Engineering. V. 4, n. 6. 2012.

SILVA, M. V. **A indústria automobilística em Catalão/Goiás: da rede ao circuito espacial da produção da MMC Automotores do Brasil S.A.** Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SIMARIA, A. S. A. **Uma Metodologia para o Balanceamento de Linhas de Montagem.** 2001. 103 f. Dissertação – Escola de Gestão do Porto. 2001.

SIVASANKARAN, P.; SHAHABUDEEN, P. **Literature review of assembly line balancing problems.** Int. J. Adv. Manuf. Technol. V. 73, p. 1665-1694. 2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 3ª edição. Trad. Maria Teresa Corrêa de Oliveira. São Paulo: Atlas, 2009.

STERNATZ, J. **Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry.** European Journal of Operational Research. V. 235, p. 740-754. 2014.

STERNATZ, J. **The joint line balancing and material supply problem.** Int. J. Production Economics. V. 159, p. 304-318. 2015.

TOPALOGLU, S.; SALUM, L.; SUPCILLER, A. **Rule-based modeling and constraint programming based solution of the assembly line balancing problem.** Expert Systems with Applications. V. 39, p. 3484-3493. 2012.

VERISSIMO, M. P.; ARAUJO, V. M. **Desempenho da indústria automobilística brasileira no período 2000-2012: uma análise sobre a hipótese de desindustrialização setorial.** Econ. soc., V. 24, n. 1, p. 151-176. Campinas. 2015.

YAGMAHAN. B. **Mixed- model assembly line balancing using a multi-objective ant colony optimization approach.** Expert Systems with Applications. V.38, p. 12453- 12461. 2011.

YAZGAN, H. R.; BEYPINAR, I.; BORAN, S.; OCAK, C. **A new algorithm and multi-response Taguchi method to solve line balancing problem in an automotive industry.** *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* V. 57, p. 379-392. 2011.