

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO GARCIA LEAL
LUCAS AMPESSAN GRESPAN

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE
MOTORES DIESEL POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2 – Nº de inscrição 05)

CURITIBA

2018

EDUARDO GARCIA LEAL
LUCAS AMPESSAN GRESPAN

BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES DIESEL POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES DIESEL POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA", realizado pelos alunos Eduardo Garcia Leal e Lucas Ampessan Grespan, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Leandro Magatão

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Osvaldo Verussa Junior

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Luiz Carlos A. Rodrigues

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 28 de junho de 2018.

RESUMO

LEAL, Eduardo Garcia; GRESPAN, Lucas Ampessan. Balanceamento da linha de montagem de motores diesel por Programação Matemática. 2018. 53f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A otimização dos processos produtivos com a redução de desperdícios e aumento de produtividade é o ângulo das montadoras do ramo automobilístico. O balanceamento de linha de montagem tem, na redução do tempo de ciclo da linha, um de seus objetivos principais, possibilitando reduzir o custo de produção e aumentar sua produtividade por meio do equilíbrio nos tempos de processamento das estações de trabalho. Neste trabalho levantou-se as condições e características de um trecho final da linha de montagem de uma montadora de motores diesel nacional, estabeleceu-se relações de precedência entre as tarefas desempenhadas e, por meio da resolução computacional de uma modelagem matemática em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), verificou-se a possível otimização da linha, reduzindo-se o tempo de ciclo. O estudo foi aplicado aos dois motores de maior produção da fábrica; observou-se uma distribuição mais equilibrada entre os tempos das estações de trabalho e uma melhora nos indicadores da linha de montagem, possibilitando galgar a desejada redução de custos na produção dos motores.

Palavras-chave: Balanceamento de linha de montagem. Modelagem em Programação Matemática. Otimização da manufatura.

ABSTRACT

LEAL, Eduardo Garcia; GRESPLAN, Lucas Ampessan. Assembly line balancing of diesel engines by Mathematical Programming. 2018. 53f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The optimization of production processes with reduction of waste and increase in productivity is the focus of automotive assembly lines. The assembly line balancing problem has the reduction of the line cycle time as one of the main objectives, enabling decreases in production costs and increase in productivity through balancing processing times across workstations. In this report, the conditions and characteristics of a final part assembly line of diesel engines was analyzed. The precedence relations of performed tasks was identified. In addition, by the computational solution of a mathematical model in Mixed Integer Linear Programming (MILP), the possibility of optimizing the line was verified, decreasing the cycle time. The study was applied for the two most produced engines in factory; it was observed a balancing in workstations productive times and better assembly line indicators, making possible to achieve the desired cost reduction in the engine production.

Keywords: Assembly line balancing problems. Modeling in Mathematical Programming. Manufacturing optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático da disposição da linha de montagem estudada.....	11
Figura 2 - Tempo das estações da linha de montagem para os motores de maior produção.....	12
Figura 3 - Exemplo de diagrama de precedências.....	17
Figura 4 - Linha de montagem de um ou mais produtos.....	19
Figura 5 - Diagrama do método utilizado.....	29
Figura 6 - Exemplo de linha sendo otimizada pela função MaxDifS.....	32
Figura 7 - Comparação entre as coletas de dados.....	35
Figura 8 - Diagrama de precedências.....	37
Figura 9 - Resposta da abordagem de solução proposta para os modelos A e B.....	40
Figura 10 - Resposta da abordagem de solução proposta para o mix dos modelos A e B.....	40
Figura 11 - Comparação dos tempos atuais e proposto.....	41
Figura 12 - Comparação entre os tempos de ciclo - proposto e atual.....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - <i>Mix</i> de produção.....	11
Quadro 2 - Cronoanálise Modelo A.....	35
Quadro 3 - Diferença entre estações e tempo médio.....	39
Quadro 4 - Posição das tarefas para o modelo atual e proposto.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores da linha de montagem.....	43
--	----

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
GALBP	<i>General Assembly Line Balancing Problem</i>
MALBP	<i>Mixed-model Assembly Line Balancing Problem</i>
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PPP	Proposta de Projeto de Pesquisa
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTO DO TEMA	11
1.2	CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE	12
1.3	OBJETIVO.....	14
1.3.1	Objetivo Principal.....	14
1.3.2	Metas	14
1.4	JUSTIFICATIVAS	15
1.5	CONTEÚDO DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	ARRANJO FÍSICO.....	16
2.2	FUNDAMENTOS DE LINHAS DE MONTAGEM.....	17
2.2.1	Terminologia utilizada na análise de uma linha de montagem	17
2.2.2	Indicadores de linhas de montagem	18
2.2.3	Classificação das linhas de montagem	19
2.3	BALANCEAMENTO DE LINHA	22
2.3.1	Problema de Balanceamento de Linha de Montagem de modelo Simples (SALBP)	22
2.3.2	Balanceamento de Linha de Montagem de modelo Misto (MALBP).....	23
2.3.3	Linhas paralelas ou de alimentação	24
2.3.4	Suprimento de materiais na linha de montagem	24
2.3.5	Tempo adicional por relações dependentes da sequência	25
2.3.6	Balanceamento de linha de montagem orientadas pelo custo	25
2.4	PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	26
2.4.1	Hipóteses da Programação Linear	26
2.4.2	Formulação de um problema linear.....	27
2.4.3	Programação Linear Inteira e Inteira Mista.....	27
3	MÉTODO UTILIZADO.....	29
3.1	APRESENTAÇÃO DO MÉTODO	30
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO MÉTODO	30

3.3	EMPREGO DO MODELO MATEMÁTICO.....	32
3.3.1	Minimização do tempo de ciclo (<i>CT</i>).....	32
3.3.2	Minimização da máxima diferença (<i>MaxDifS</i>)	33
3.3.3	Minimização do tempo de ciclo máximo (<i>RefCT</i>)	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA VIDEOANÁLISE DA LINHA ATUAL	35
4.2	DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS.....	37
4.3	RESULTADOS OBTIDOS PELA MODELAGEM MATEMÁTICA	39
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO ATUAL E O PROPOSTO	42
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DAS TAREFAS	51
	APÊNDICE B – SOLUÇÕES GERADAS	53

1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo será abordado como e porque a otimização dos processos produtivos é necessária, de que modo o balanceamento de linha otimiza os processos produtivos e porque a linha de montagem estudada neste trabalho se apresenta como uma oportunidade para a aplicação dessa técnica.

1.1 CONTEXTO DO TEMA

Em 1997, Ohno apontou que num período de alto crescimento as perdas geradas pela superprodução não são perceptíveis, ao passo que, num período de crescimento econômico lento essas se tornam evidentes. Segundo ele, essas perdas derivam da busca pela grande quantidade e velocidade de produção.

A concorrência entre empresas industriais e o aumento da exigência dos consumidores obrigou as organizações a evoluir seu processo produtivo. Fatores como variedade de produtos, dinâmica da entrega e baixo custo têm forçado as empresas a adaptarem-se a esse cenário, de modo a aprimorar suas linhas de montagem (OLIVEIRA, et al., 2012).

Como as empresas visam a redução de custos em seus processos produtivos, toda e qualquer ideia de melhoria, necessariamente, deve estar vinculada à redução de custos (OHNO, 1997). Assim, (MAGATÃO, ARRUDA e NEVES-JR, 2001) afirmam que mesmo objetivando melhorias, os setores industriais ainda tomam decisões operacionais empiricamente, de maneira conservativa. A necessidade industrial mostrou que este processo não encontra soluções ótimas, tornando necessário o emprego de técnicas de otimização que possibilitam a análise criteriosa de sistemas operacionais complexos.

Neste contexto, a Pesquisa Operacional (*Operational Research* ou *Operations Research*) ou Análise de Decisão (*Decision Science* ou *Management Science*), descrita por Wagner (1986), visa a obtenção de soluções otimizadas em problemas reais. De modo geral, o processo de solução tem por base a fragmentação de um problema de grande porte em segmentos menores, facilitando sua análise e manipulação. A partir disso, os resultados são sintetizados para constituir o entendimento do problema original.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE

Após a concepção do Fordismo, termo utilizado para os sistemas de produção em massa e idealizado por Henry Ford, em 1914, as linhas de produção tornaram-se comuns nas empresas do setor automotivo e assim permanecem até os dias de hoje (GOUNET, 1999).

A linha de montagem, que será estudada neste trabalho, está presente em uma fábrica do setor automotivo desde 1997. Desde então, sofreu alterações em sua gama de produtos: com relação ao avanço de tecnologias, capacidade volumétrica dos motores e necessidades do mercado. A fábrica detém grande parte do processo produtivo em sua sede brasileira, englobando toda a usinagem dos blocos fundidos, a montagem de todos os componentes em processos automatizados e manuais e a presença de células de abastecimento e de testes ao fim do processo, contemplando, ao todo, mais de setenta estações. A linha final de montagem é composta por nove estações de trabalho, idealizadas no modelo esquemático da Figura 1. Nela, os componentes são montados manualmente por operadores, constituindo a etapa do processo mais suscetível a melhorias oriundas de balanceamento, justificando, portanto, sua escolha como objeto de estudo do presente trabalho.

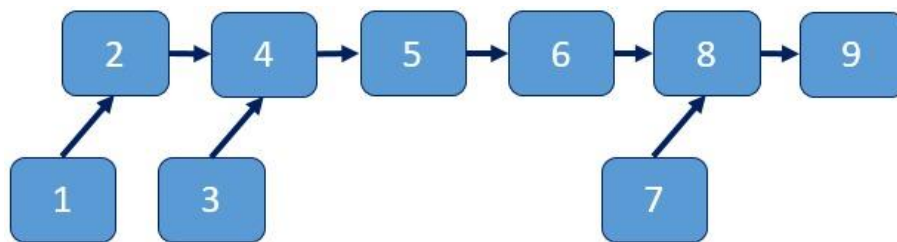


Figura 1 - Desenho esquemático da disposição da linha de montagem estudada
Fonte: Os autores, 2018.

Atualmente, a empresa produz sete modelos diferentes de motores nesta linha, que neste projeto de pesquisa serão denominados por letras (A a G). O volume de produção de cada modelo foi multiplicado por um coeficiente para assegurar o sigilo dos dados da empresa. O Quadro 1 a seguir ilustra os dados de *mix* produtivo em análise.

Quadro 1 - Mix de produção

Modelo	Quantidade produzida	
	2016	2017 (jan-ago)
A	10.815	8.979
B	3.245	2.187
C	773	426
D	658	552
E	409	216
F	345	324
G	44	41

Fontes: Os autores, 2018.

Com base no Quadro 1, é possível constatar que os modelos A e B juntos apresentam 86,3% da produção total de 2016 e 87,7% do realizado até agosto de 2017, justificando o foco de estudo nesses dois modelos. Uma vez definido isto, se faz necessário avaliar o *mix* de um modelo em relação ao outro, assumindo como hipótese para a análise que apenas os modelos A e B são produzidos na linha estudada. O resultado deste procedimento revela que o Modelo A representa 80,6% do *mix* produtivo analisado, restando 19,4% para o Modelo B.

O dinamismo da fábrica fez com que sua linha de montagem fosse replanejada diversas vezes, sendo que, atualmente, é balanceada cerca de três vezes ao ano, conforme variação da demanda. Esse balanceamento é realizado de modo empírico, por meio de um *software* desenvolvido pela própria empresa, no qual o colaborador insere as descrições das atividades e as reorganiza entre as estações, verificando as respostas de tempo de ciclo.

A Figura 2 retrata o tempo de operação das nove estações da linha final, obtido por meio de cronoanálise por colaboradores da própria empresa. Ressalta-se que os valores temporais apresentados no trabalho recebem a aplicação de um coeficiente numérico, de modo a preservar os reais dados da empresa. Os valores temporais são, então, apresentados em unidades de tempo ou, simplificada, pela sigla ut (unidade de tempo).

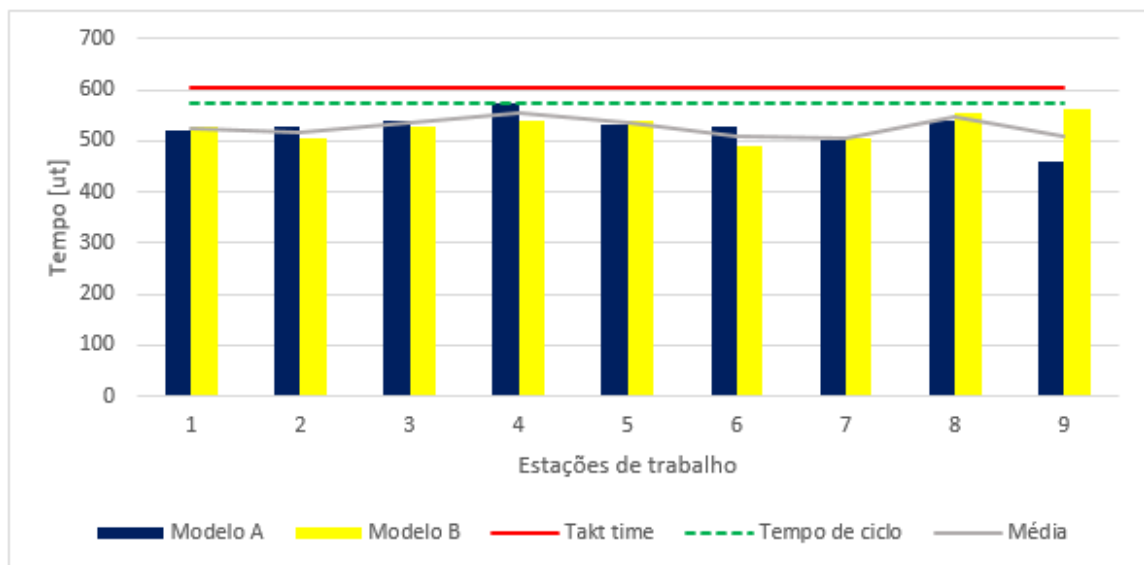


Figura 2 - Tempo das estações da linha de montagem para os motores de maior produção
Fonte: Os autores, 2018.

Nota-se pela Figura 2 que ambos os modelos apresentam variações de tempo entre suas estações, chegando a 25% entre o menor e o maior tempo para o modelo A (estações 4 e 9) e 15% para o modelo B (estações 6 e 9) justificando, assim, uma análise mais aprofundada para equalizar os tempos entre as estações, viabilizando a redução do tempo de ciclo.

Como os dados fornecidos pela empresa foram obtidos através de cronoanálise, optou-se por realizar um novo levantamento de dados na linha de montagem, aplicando a videoanálise.

Este procedimento tem como propósito obter dados mais precisos que os disponibilizados, de modo que a técnica de balanceamento seja aplicada a valores numéricos mais próximos da realidade operacional.

O processo de videoanálise mostrou-se, contudo, bastante oneroso, demandando excessivas horas de coleta de informações *in loco*, seguido de numerosas horas de edição quadro a quadro das imagens obtidas. Assim, grande parte do desafio de aplicação prática da técnica otimizada de balanceamento originou-se da necessidade de conhecimento técnico do processo produtivo, fundamental para elencar as tarefas e seus respectivos tempos de execução.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho embasou-se em metas que foram elencadas com o intuito de se alcançar o objetivo principal, descrito na próxima Seção.

1.3.1 Objetivo Principal

Este Projeto de Pesquisa tem por objetivo principal otimizar um trecho de uma linha de montagem de motores diesel de uma fábrica nacional, realizando o balanceamento desta linha por meio da utilização de um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). No contexto avaliado, considerou-se a otimização como sendo a redução do tempo de ciclo da linha em conjunto com o nivelamento dos tempos de processamento de cada estação, a fim de proporcionar uma melhor equalização entre as cargas de trabalho a elas associadas.

1.3.2 Metas

Para alcançar o objetivo principal, estabeleceram-se as seguintes metas:

- a) Compreender detalhadamente as etapas e tarefas do processo final de montagem dos motores diesel, a fim de evidenciar potenciais desperdícios no processo de montagem.
- b) Avaliar as precedências de cada atividade de acordo com as restrições de montagem e de equipamento disponível em cada estação.
- c) Extrair, por meio de videoanálise, os tempos de cada atividade.
- d) Confrontar os dados entre crono e videoanálise para cada estação.
- e) Por meio de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista, da literatura (SIKORA, LOPES e MAGATÃO, 2017), encontrar uma solução para o balanceamento otimizado da linha de montagem.
- f) Avaliar os resultados, analisando a factibilidade e viabilidade da implementação.

- g) Apontar os ganhos obtidos com a realização do balanceamento proposto por meio de indicadores utilizados no contexto de balanceamento de linhas.

1.4 JUSTIFICATIVAS

A estratégia de operações empresariais é desenvolvida através de um processo contínuo e dinâmico, no qual suas competências devem ser periodicamente analisadas para desafiar as prioridades do mercado (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009).

Segundo Krajewski et al. (2009), “Para reduzir custos, os processos devem ser projetados e operados de modo a torná-los eficientes, usando rigorosa análise de processo que abrangem equipe de trabalho, método, refugo ou retrabalho, custos fixos e outros fatores para baixar o custo por unidade do serviço ou produto. Muitas vezes, a redução dos custos exige um processo completamente novo, que pode exigir novos investimentos e novas instalações ou tecnologias”.

Neste contexto, o balanceamento de linha através de uma análise técnica e matemática almeja tornar a carga de trabalho das estações de trabalho e dos operadores mais equilibrada, aumentar a eficiência da linha e, por conseguinte, reduzir os custos de fabricação do produto.

1.5 CONTEÚDO DO TRABALHO

O presente trabalho é exposto em cinco Capítulos. Nesse Capítulo inicial foi apresentado o tema, seu contexto e o motivo para realização deste estudo. No Capítulo 2, expõem-se os conhecimentos e os alicerces teóricos necessários para a compreensão desse projeto de pesquisa. O Capítulo 3 aborda o método utilizado para seu desenvolvimento e as etapas e hipóteses consideradas. No Capítulo 4 são apresentados os resultados, análises e discussões com relação à proposta de balanceamento de linha para a linha de montagem, considerando-se os dois modelos de maior demanda. Por fim, no Capítulo 5 realizam-se considerações finais acerca do método utilizado e dos resultados obtidos neste projeto de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo serão apresentadas as formas dos arranjos físico numa fábrica (Seção 2.1), alguns fundamentos da linha de montagem (Seção 2.2, o balanceamento de linha e suas duas vertentes (Seção 2.3) e a Programação Linear (Seção 2.4), a fim de embasar o desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 ARRANJO FÍSICO

A maneira com que são alocados fisicamente os recursos de transformação como instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção é denominado arranjo físico, segundo (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009). Este arranjo determina de que maneira irá fluir as operações nos recursos transformados (materiais, informação e clientes).

O arranjo físico pode ser dividido em quatro grupos (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009):

- a) Arranjo físico posicional;
- b) Arranjo físico por processo;
- c) Arranjo físico celular;
- d) Arranjo físico por produto.

No arranjo físico posicional os recursos de transformação deslocam-se até os recursos transformados para realizar o processamento. Como, por exemplo, a construção de grandes embarcações, no qual o produto é muito grande para ser movido (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009).

Em um arranjo físico por processo as necessidades, características e funções dos recursos transformadores constituem sua disposição física. Esse arranjo tem como qualidade sua flexibilidade, de maneira a atender as demandas menos previsíveis, como a divisão das áreas em um supermercado (PEINADO e GRAEMIL, 2007).

O arranjo físico celular é aquele no qual o produto é pré-selecionado a percorrer uma célula que terá os recursos de transformação necessários para atender as necessidades imediatas deste produto (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009).

No arranjo físico por produto os recursos de transformação são dispostos de maneira a atender a sequência de montagem/fabricação dos recursos transformados, apresentando alta produtividade e baixa flexibilidade (PEINADO e GRAEMIL, 2007). As linhas de montagem são um exemplo desse tipo de arranjo, que serão o escopo desse trabalho.

Os tipos de arranjos físicos determinam o fluxo que os recursos transformados irão tomar, que será ditado pelas características de volume e variedade desses (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009).

2.2 FUNDAMENTOS DE LINHAS DE MONTAGEM

Orientadas pelo fluxo produtivo, as linhas de montagem são sistemas de produção que consistem em estações de trabalho dispostas em série, por onde peças serão movimentadas de estação para estação, sendo que em cada estação serão realizadas tarefas e, o somatório destas, resultará no tempo de ciclo (BECKER e SCHOLL, 2006)

Conforme citado na Seção 2.1, as linhas de montagem fazem parte do arranjo por produto, com as seguintes vantagens (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009):

- Para grandes volumes de produção, apresenta baixo custo unitário;
- Devido à particularização das estações, facilita a especialização dos equipamentos;
- Controle da produtividade, gerenciando a movimentação de materiais.

Segundo (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2009) apresentam desvantagens como:

- Baixa flexibilidade para *mix* de produtos;
- Pouco robusta contra interrupções;
- As funções dos operadores podem ser repetitivas e monótonas.

2.2.1 Terminologia utilizada na análise de uma linha de montagem

Para facilitar a compreensão do presente trabalho é necessário o conhecimento de termos relativos à análise de uma linha de montagem:

- **Tarefa:** de acordo com Krajewski et al. (2009) são as unidades de trabalho mais específicas podendo ser executada de maneira independente.
- **Duração de uma tarefa:** tempo necessário para a realização de uma tarefa por um operador ou uma máquina não assistida (GAITHER e FRAZIER, 2002).
- **Precedência entre tarefas:** Para Gaither e Frazier (2002), é a ordem ou sequência na qual as tarefas devem ser realizadas.
- **Diagrama de precedências:** Diagrama para facilitar a visualização gráfica da precedência entre as tarefas (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009).

Portanto, as tarefas são indicadas pelos círculos e as setas direcionam o sentido da tarefa seguinte, como é ilustrado na Figura 3 a seguir:

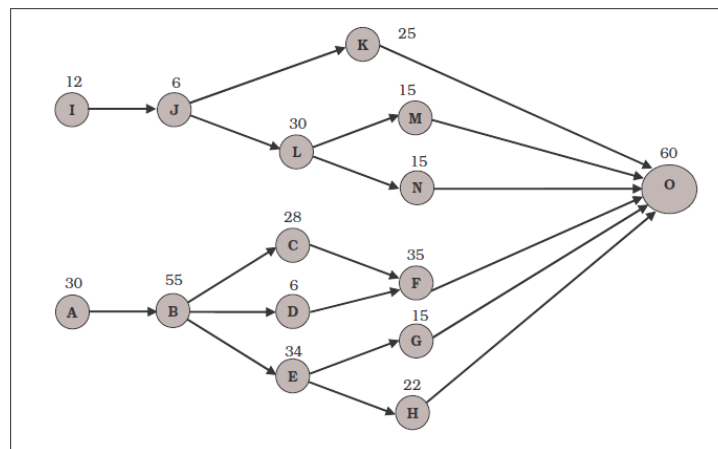


Figura 3 - Exemplo de diagrama de precedências
Fonte: Peinado e Graeml (2007, p.211).

- **Estação de trabalho:** ou posto de trabalho é definida por Gaither e Frazier (2002) como “localização física onde um conjunto particular de tarefas é executado”.
- **Tempo de ciclo:** é o tempo entre duas entradas consecutivas de um produto na linha de montagem (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007).
- **Tempo *Takt*:** para Magatão (2016) “tempo de ciclo teórico dentro do qual uma unidade de produto deve ser retirada da linha. Em tese, para que a demanda possa ser atendida, o tempo de ciclo deve ser menor ou igual ao valor do tempo *takt*”. Para (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009) pode ser compreendido através da Equação (1):

$$tt = \frac{1}{r} \quad (1)$$

Onde: tt – tempo *takt*

r – taxa de produção exigida pela demanda (em unidade de produto por intervalo de tempo)

2.2.2 Indicadores de linhas de montagem

A fim de quantificar e qualificar a linha de montagem existem alguns indicadores de desempenho que serão utilizados nesse trabalho e estão descritos na sequência.

A eficiência da linha é calculada através da razão entre o somatório dos tempos das tarefas e o produto do número real de estações de trabalho (K) pelo tempo de ciclo teórico (C), considerando-se N tarefas presentes na linha. Conforme aponta (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009), na Equação (2):

$$Eficiência (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{K.C} \cdot 100 \quad (2)$$

A mensuração do tempo ocioso total de uma linha é obtida pela subtração entre o produto do número real de estações de trabalho e o tempo de ciclo teórico pelo somatório do tempo de cada estação, conforme Equação (3) (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009):

$$Ociosidade = K.C - \sum_{i=1}^N t_i \quad (3)$$

O atraso de balanceamento representa, segundo Rao (1971), o percentual do tempo ocioso em relação ao tempo total do produto na linha de montagem, também descrito como tempo de ineficiência da linha, tempo improdutivo, conforme Equação (4):

$$Atraso de balanceamento (\%) = \frac{K.C - \sum_{i=1}^N t_i}{K.C} \cdot 100 \quad (4)$$

Na prática, mesmo com tarefas que despendem menos tempo que o tempo de ciclo, os operadores não ficam imóveis, mas sim, realizam suas atividades de maneira mais lenta, conforme apontado por (RAO, 1971).

Outro índice relacionado à eficiência da linha de montagem é o índice de suavidade da linha que, segundo Gerhardt (2005), expressa a variação entre o tempo total máximo ($S_{máx}$) e o tempo obtido nas estações, representado pela Equação (5):

$$Índice de Suavidade = \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_{máx} - S_i)^2} \quad (5)$$

Portanto, conforme Gerhardt (2005, p.39) aponta, “Quanto maior o índice, maior a variação dos tempos totais de operação entre as estações, evidenciando a baixa eficiência e necessidade de um balanceamento mais eficaz”.

2.2.3 Classificação das linhas de montagem

A classificação de uma linha de montagem apresentada por Saif et al. (2014) é dividida em seis vertentes: abordagem, *layout*, variedade de produto, fluxo, função objetivo e tempo de execução de tarefas. A abordagem do problema de balanceamento de linha de montagem será discutida no Capítulo 2.3 para um melhor detalhamento.

Saif et al. (2014) apresentam quatro tipos de *layout*: linha em série, linhas em paralelo, em forma de U e linhas *two-sided*. Nas linhas em série o tempo de ciclo é determinado pela estação gargalo, sendo que os produtos percorrem as estações sucessivamente, posicionadas em

série. A fim de dividir a demanda entre as estações, são utilizadas linhas paralelas. Comumente são utilizadas em tarefas e operações que requerem mais tempo, com o propósito de diminuir o tempo de ciclo da linha principal. A linha em formato de U apresenta como vantagem o reaproveitamento dos postos de trabalho, para realização de outras tarefas ou revisar as já realizadas. E por fim, as linhas *two-sided* são utilizadas no processamento de produtos de grande porte, quando há a necessidade de trabalhar mais de um operador por estação, normalmente distribuídos em cada um dos “lados” do produto.

Quanto à variedade de produtos, segundo Becker e Scholl (2006), pode ser diferenciada em três grupos:

- **Linhas de modelo único:** é produzida uma única versão do produto na linha. De modo que as tarefas não se alteram ao longo do ciclo de produção.
- **Linhas de modelo misto:** são produzidos mais de um modelo simultaneamente. Esses modelos apresentam pequenas variações no processo entre si, sendo estas incluídas no processo como tarefas específicas de cada modelo.
- **Linhas multi-modelo:** são produzidos diferentes produtos na mesma linha. Ao passo que, a linha deve ser rebalanceada para aceitar o novo lote.

A Figura 4 retrata as três variações de linhas conforme a variedade de produtos.

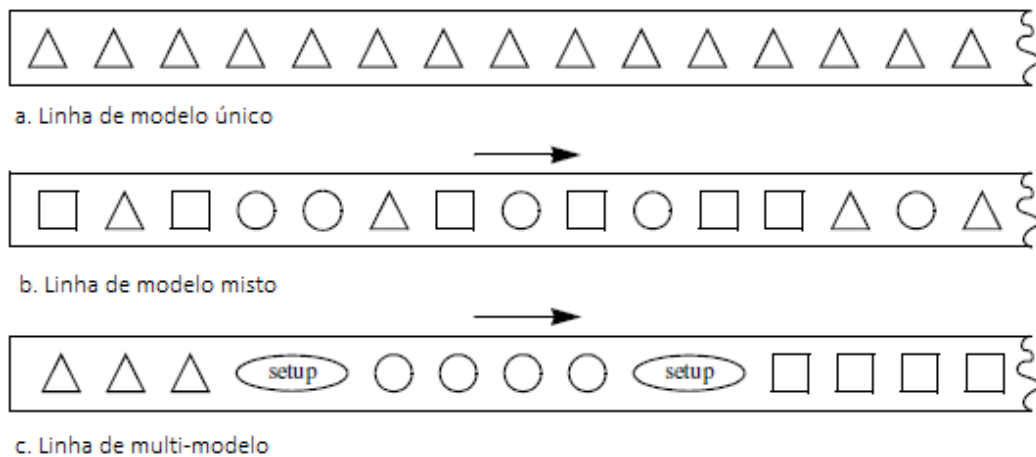


Figura 4 - Linha de montagem de um ou mais produtos
Fonte: Adaptado de BECKER e SCHOLL, 2006.

O fluxo da linha é dividido em dois grupos, passo contínuo e passo não contínuo (SAIF, *et al.*, 2014). Em uma linha de passo contínuo o produto se movimenta de modo ininterrupto, normalmente deslocado em um transportador (*conveyor*). Cada operador se desloca ao longo de sua estação de trabalho de modo a acompanhar o fluxo do produto em movimento. Já nas linhas de passo não contínuo o produto é transferido para a próxima estação apenas quando

todas as tarefas da estação considerada são realizadas e a estação seguinte está apta a receber o produto.

Segundo Saif et al. (2014), o grupo das linhas de passo não contínuo apresenta duas variantes: passo sincronizado e passo não sincronizado. Na primeira o avanço do produto ocorre simultaneamente para todas as estações. Já na de passo não sincronizado, o avanço ocorre em tempos de ciclos diferentes, devido à diferença de tempo de execução das tarefas em cada estação. Para suavizar o desbalanceamento entre estações adjacentes são colocados *buffers* intermediários, que funcionam como estoques temporários, disponíveis entre os postos de trabalho (LOPES, SIKORA e MAGATÃO, 2016).

Segundo Erel e Sarin (1998), os objetivos de balanceamento de linha mais comuns podem ser classificados em duas categorias: tipo I – minimização do tempo ocioso total dado o tempo de ciclo e o tipo II – minimização do tempo de ciclo dado um número fixo de estações. Em um grande número de aplicações práticas, é buscada a minimização da quantidade de estações com o tempo de ciclo imposto, objetivo tipo I.

A função objetivo geral é, então, minimizar a ociosidade da linha e expressa pela Equação (6) (EREL e SARIN, 1998):

$$\min z = K \cdot C - \sum_{i=1}^N t_i \quad (6)$$

A abordagem do tempo de operação, apresenta duas vertentes, para uni-modelo e multi-modelos, a determinística e a estocástica (EREL e SARIN, 1998).

O comportamento determinístico estabelece que os tempos de execução de cada tarefa sejam constantes, sem variações significativas. Então, o objetivo é realocar as tarefas de maneira ordenada nas estações, respeitando as relações de precedência, de modo a otimizar o desempenho da linha (EREL e SARIN, 1998).

Já na abordagem estocástica, o tempo de uma tarefa desempenhada na linha de montagem é abordado como uma variável desconhecida, com comportamento probabilístico (SAIF, GUAN, *et al.*, 2014). Gerhardt (2005), distingue a execução das tarefas de duas maneiras: completas, na qual a tarefa é finalizada durante o tempo de ciclo, e incompleta, na qual há um evento que faz com que a mesma não se consolide, como por exemplo a realização de um retrabalho. Para Saif et al. (2014), a análise estocástica é muito mais complexa que a determinística; deve ser utilizada em alguns caso específicos para que apresente um real ganho com sua utilização.

2.3 BALANCEAMENTO DE LINHA

A atribuição de tarefas a postos de trabalho em uma linha produtiva visando a otimização do número de postos necessários, a fim de atingir o índice de produção desejado, conceitua o significado de balanceamento de linha para (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009).

Segundo Boysen et al. (2007), a montagem ou manufatura de um produto exige que uma série de tarefas sejam realizadas. As quais requerem tempo, equipamentos e mão-de-obra para serem executadas. Devido a condições de precedência essas tarefas são inter-relacionadas, não podendo ser praticadas de maneira arbitrária. Assim, um ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) resume-se em três elementos básicos: um diagrama de precedências, suas estações de trabalho e um escopo a ser otimizado.

O objetivo do balanceamento de linha é a minimização do tempo ocioso dos postos de trabalho, os quais são derivados da distribuição desproporcional de tarefas. Essa minimização tende a homogeneizar a distribuição de tarefas entre os postos de trabalho e os operadores, maximizando o fluxo produtivo e minimizando, também, o estoque, define (DESSOUKY, ADIGA e PARK, 1995).

Becker et al. (2006), divide a abordagem utilizada em uma linha de montagem em dois grupos: SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*) e GALBP (*General Assembly Line Balancing Problem*).

Nesse trabalho, para o segundo grupo será apresentado o Balanceamento de Linha de Montagem de modelo Misto (MALBP).

2.3.1 Problema de Balanceamento de Linha de Montagem de modelo Simples (SALBP)

Segundo Boysen et al. (2007), com hipóteses simplificadoras, existem técnicas eficientes para resolver problemas SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*) – que caracterizam a versão mais simples de um problema de balanceamento de linha de montagem.

Conforme declara Boysen et al. (2007), o tempo de ciclo é um valor único para toda a linha em análise. Os tempos das estações podem, em tese, ser menores do que o tempo de ciclo, apresentando tempo ocioso na estação até que o tempo de ciclo seja atingido.

Segundo Boysen et al. (2007), os problemas de balanceamento de linha de montagem simples podem ser classificados em quatro tipos:

- **SALBP-1:** tempo de ciclo determinado, como função objetivo minimizar a quantidade de estações de trabalho.

- **SALBP-2:** número de estações predeterminado, como função objetivo minimizar o tempo do ciclo.
- **SALBP-E:** Se ambos, número de estações e o tempo de ciclo podem ser alterados, a eficiência de linha é maximizada.
- **SALBP-F :** Se ambos, número de estações e o tempo de ciclo forem predeterminados, o problema consiste em encontrar um equilíbrio viável (factível, do inglês, *feasible*).

Esses quatro tipos de SALBP são baseados nas seguintes hipóteses restritivas (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007):

1. Produção em massa de um produto homogêneo.
2. Todas as tarefas são realizadas de um modo predeterminado.
3. Linha de montagem com um tempo de ciclo sincronizado entre todas as estações.
4. *Layout* tipo série, sem linhas de alimentação ou elementos paralelos.
5. Sequência de processamento das tarefas sujeita a restrições de precedência.
6. Tempo das tarefas determinístico.
7. Sem restrições de atribuição de tarefa, além de restrições de precedência.
8. Uma tarefa não pode ser dividida em duas ou mais estações.
9. Todas as estações estão igualmente equipadas (equipamentos e mão-de-obra).

Segundo Boysen et al. (2007), essas hipóteses são utilizadas para simplificar problemas reais.

2.3.2 Balanceamento de Linha de Montagem de modelo Misto (MALBP)

O problema das linhas de montagem mais modernas, no qual a demanda é caracterizada pela alta versatilidade e distribuição entre os volumes de cada modelo (*mix* produtivo) é apresentado como balanceamento de linha de montagem de modelo misto (MALBP – *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*). Um MALBP apresenta considerações adicionais entre as interações dos modelos montados em relação a um SALBP, aumentando a complexidade da abordagem de solução a ser empregada (BUKCHIN e RABINOWITCH, 2006).

As primeiras tentativas de tratar linhas de modelo misto são oriundas dos trabalhos desenvolvidos por Thomopoulos (1967, 1970). O autor, em essência, adapta técnicas de balanceamento de linhas de modelo simples e prioriza a resolução de um “modelo equivalente”, orientado por um “diagrama de precedências equivalente”. Os valores de *mix* produtivos dos diferentes produtos que são produzidos na linha determinam tempos equivalentes. Por exemplo, supondo-se uma linha produtiva com os produtos A e B, com demandas aproximadas de 80%

e 20%, respectivamente. Supondo-se que uma tarefa t , exista tanto em A quanto em B, mas com tempos diferentes, por exemplo, 10 ut para A e 15 ut para B. No modelo equivalente, o tempo da tarefa equivalente será considerado com duração de 11 ut ($10 \times 0,8 + 15 \times 0,2$). O diagrama de precedências equivalente é construído de modo a conter todas as tarefas de todos os modelos de produtos envolvidos. Se acaso uma tarefa for inexistente para um dado produto, então sua duração é considerada como zero. Desta forma, viabiliza-se o tratamento de uma linha de montagem de modelo misto com abordagens desenvolvidas para linhas de modelo simples pela adição de considerações de tempos/diagramas equivalentes.

Conforme detalhado em (SIKORA, LOPES e MAGATÃO, 2017), esta abordagem tende a ser mais adequada quando as diferenças entre modelos não são estruturantes.

2.3.3 Linhas paralelas ou de alimentação

Segundo Grzechca et al. (2005), em alta demanda de mercado a duplicação ou a inclusão de linhas paralelas à linha de montagem é comum a fim de proporcionar um aumento na taxa de produção. Tempelmeier (2003), aponta estações *buffers* ao lado de estações gargalo como uma medida menos drástica para suprir essa demanda.

Conforme Bukchin e Rubinovitz (2003), com o acréscimo de linhas paralelas idênticas, com o mesmo tempo de ciclo da linha original, o aumento da eficiência global da linha de montagem apresenta um fator igual ao número de linhas incluídas. Outra vantagem das linhas paralelas é o aumento da confiabilidade da linha devido ao fato de que em uma linha em série, se algum dos postos de trabalho atrasar ou falhar, as linhas em paralelo continuam suprimindo a demanda, porém com uma taxa de produção menor (BUKCHIN e RUBINOVITZ, 2003).

2.3.4 Suprimento de materiais na linha de montagem

Podendo causar uma parada de linha, a falta de estoque é um fator extremamente crítico em uma linha de montagem, pois sua ocorrência pode gerar um custo extremamente alto para a empresa. Portanto, gerenciar a quantidade de insumos para a linha de montagem deve ser levado em conta na análise do balanceamento da linha (BUKCHIN e MELLER, 2005).

Segundo Bukchin e Meller (2005), o modo de transporte desses insumos para as estações de trabalho deve ser analisado quanto às suas dimensões, características e alocação na linha de montagem, pois o mesmo pode afetar na busca do material pelo operador. Sendo essa distância variável entre os operadores em cada estação, torna-se necessário resolver um problema de balanceamento.

2.3.5 Tempo adicional por relações dependentes da sequência

As tarefas comumente inseridas na análise de balanceamento de linha apresentam um período de duração bem definido. Porém, há algumas tarefas que dependendo do momento e ordem em que são realizadas apresentam um acréscimo de tempo advindo de suas características (BUXEY, 1974).

Segundo Kalayci e Grupta (2013), a interação entre duas tarefas pode acarretar distorções em relação ao tempo de execução das duas ou de uma delas devido a ordem que são executadas. Esse fato pode ser justificado pelo fato de uma montagem influenciar no grau da montagem da seguinte, aumentando ou diminuindo seu tempo de duração.

2.3.6 Balanceamento de linha de montagem orientadas pelo custo

Segundo Amen (2000), o objetivo do problema de balanceamento de linha de montagem é orientado para minimizar os desperdícios de tempo total ocioso das estações da linha. Aponta, então, o balanceamento orientado pelo custo como uma ferramenta para minimizar o custo total por unidade de produto.

Os custos de investimento de capital dos componentes de uma linha de montagem são divididos em duas categorias, conforme (PADRÓN, 2009):

- Custos de investimentos relacionados à natureza da tarefa: que estão as ferramentas, equipamentos, máquinas e acessórios especiais utilizados para desempenhar a tarefa.
- Custo total de investimento em capital de uma estação de trabalho: dependente de quais tarefas serão desempenhadas na estação de trabalho.

Segundo Padrón (2009), espera-se que o custo de cada estação de trabalho seja o mesmo para todas as estações, exceto as que necessitem de equipamentos especiais. Em particular, a linha de montagem do presente trabalho apresenta basicamente os mesmos equipamentos em suas estações como as parafusadeiras elétricas e automática bifuso.

O balanceamento orientado pelo custo difere do orientado pelo tempo apenas na função objetivo, este último também gerará uma solução viável para o primeiro, todavia com aspectos diferentes. Um exemplo disso é o fato do orientado pelo tempo utilizar como foco a utilização da carga máxima da estação, o que não necessariamente resultará numa solução ótima para o balanceamento orientado pelo custo (AMEN, 2006).

A dificuldade de realizar uma análise de custos é a coleta de dados, os quais são sigilosos das empresas, motivo pelo qual se decidiu não realizar esse tipo de análise no presente trabalho.

2.4 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Segundo Goldbarg e Luna (2005), “Os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada”. Portanto, a similaridade do modelo com a realidade faz com que sejam obtidas conclusões, através de análise, que compreendam a realidade por meio da avaliação do modelo.

Dentre os modelos de programação matemática a programação linear é um caso particular em que as variáveis, as restrições e a função objetivo são contínuas e apresentam comportamento linear (GOLDBARG e LUNA, 2005).

Apontado por Goldbarg e Luna (2005), são três os conjuntos principais de elementos em um modelo matemático:

- **Função objetivo:** função matemática que se deseja otimizar, considerando maximizá-la ou minimizá-la (PUCCINI, 1975);
- **Restrições:** expressas na forma de um conjunto de equações ou inequações lineares, as quais devem ser respeitadas pelas variáveis (PUCCINI, 1975);
- **Variáveis de decisão e parâmetros:** variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Parâmetros são valores fixos no problema; dados de entrada a serem considerados (LISBOA, 2002).

2.4.1 Hipóteses da Programação Linear

Conforme apontado por Puccini (1975), as hipóteses fundamentais da Programação Linear são:

- **Certeza (Determinístico):** os coeficientes do modelo são considerados constantes conhecidas;
- **Divisibilidade:** os parâmetros do modelo e os valores das variáveis podem assumir valores fracionados;
- **Proporcionalidade:** os parâmetros utilizados variam proporcionalmente em relação ao valor da variável do modelo, apresentando um coeficiente de proporcionalidade;
- **Aditividade:** considera-se as atividades independentes, podendo somar as variáveis individuais do sistema.

2.4.2 Formulação de um problema linear

Conforme descrito anteriormente, a programação linear visa otimizar uma função objetivo, maximizando-a ou minimizando-a, com um conjunto de restrições lineares (BRADLEY, HAX e MAGNANTI, 1977). Expressa por Puccini (1975), como:

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (7)$$

Devendo satisfazer as seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

e

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Onde: m número de recursos disponíveis;

n número de atividades para fabricação dos produtos;

b_i representa a quantidade de recursos;

x_j representa o nível de produção da atividade;

c_j representa o lucro unitário por produto;

a_{ij} representa a quantidade de recurso i consumida de uma unidade de

produto j .

Resolvendo o modelo linear, a solução pode oferecer três situações distintas, segundo Bradley et al. (1977):

- Modelo inviável, i.e. não há valores para as variáveis de decisão (x_1, x_2, \dots, x_n) que satisfaçam as restrições simultaneamente;
- Modelo com solução ilimitada, i.e. a função objetivo cresce ou decresce indefinidamente sem que seja violada qualquer restrição;
- Solução finita ótima, i.e. apresentando ao menos uma solução finita ótima para a função objetivo.

2.4.3 Programação Linear Inteira e Inteira Mista

Os modelos de programação linear, conforme visto na Seção 2.4.1 admitem variáveis com valores fracionários. Contudo, para alguns problemas práticos essas variáveis devem assumir, necessariamente, valores inteiros. Para tanto, aplica-se a Programação Linear Inteira (PLI), de modo a restringir à valores discretos (LISBOA, 2002).

Segundo Bradley et al. (1977), para modelos nos quais apenas algumas variáveis são reduzidas a valores inteiros, aplica-se a Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Magatão (2005) apresenta a formulação PLIM da seguinte maneira:

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j + \sum_{i \in I} c_i y_i \quad (10)$$

Devendo satisfazer as seguintes restrições:

$$\sum_{j \in J} a_{kj} x_j + \sum_{i \in I} a_{ki} y_i \{\rho\} b_k \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (13)$$

Onde: x_j representa as variáveis de decisão contínuas;

y_i representa as variáveis de decisão inteiras;

c_i, c_j representam os coeficientes de custo;

a_{kj} representa os coeficientes das restrições das variáveis contínuas;

a_{ki} representa os coeficientes das restrições das variáveis inteiras;

b_k representa as restrições de recursos;

J conjunto de variáveis contínuas;

I conjunto de variáveis inteiras;

K conjunto de restrições.

ρ notação para as relações matemáticas (e.g. $\leq, \geq, =$)

O processo de modelagem em Programação Linear Inteira Mista é realizado somente por meio de relações algébricas compostas por inequações e equações. Contudo, várias restrições práticas envolvem a correta representação de conjunções e disjunções complexas, tornando o processo de modelagem oneroso e propenso a erros. Porém, ainda assim, PLIM possui uma ampla aplicabilidade, restando superar-se as relativas dificuldades de representação do problema por meio de uma adequada modelagem (MAGATÃO, 2005).

Deste modo, a partir da exposição no presente Capítulo de elementos relevantes ao entendimento do contexto do trabalho, o Capítulo 3 a seguir detalha o método adotado para a consecução do objetivo principal do trabalho, definido na Seção 1.3.

3 MÉTODO UTILIZADO

Neste projeto de pesquisa, o balanceamento de linhas de montagem de modelo misto é estudado. Considera-se um estudo de caso prático, aplicado a dois modelos de motor de maior produção em uma fábrica, conforme dados apresentados no Capítulo 1, Quadro 1. Apenas a parte da linha composta majoritariamente por operações manuais (Figura 1, Capítulo 1) é explorada, pois considerou-se que as estações automatizadas já possuem um balanceamento satisfatório e os custos para implementar mudanças nas referidas estações automáticas provavelmente não proporcionariam um equilíbrio entre os investimentos e os benefícios que gerariam.

A oportunidade de melhoria no balanceamento foi constatada ao avaliar os dados da cronoanálise, os tempos de processamento de cada uma das nove estações (Figura 2, Capítulo 1) fornecidos pela empresa. Contudo, por meio dos dados disponibilizados não foi possível identificar quanto tempo os operadores levam para executar cada uma das atividades que são desenvolvidas em cada estação, uma vez que no levantamento de dados da empresa sintetiza-se o tempo total de todas as atividades executadas em cada estação.

Com os dados disponibilizados de cronoanálise também não se pode identificar as ociosidades praticadas pelos operadores durante a realização das tarefas de sua estação.

Diante disso, optou-se por determinar os tempos exatos necessários para a execução de cada tarefa pelos operadores por meio de filmagens. Essas foram realizadas em cada uma das estações de trabalho e para cada um dos dois modelos de motores estudados, sendo estas filmagens realizadas exclusivamente para este fim. O tempo de duração de todos os vídeos somados resultou em um total de 9 horas e 33 minutos de gravação e um total de 92,5Gb de arquivos. Eles foram obtidos com o auxílio de uma câmera *GoPro HERO3 Silver Edition*.

Em seguida, o material gravado foi examinado através de análises quadro a quadro, com a finalidade de se detalhar as tarefas e o tempo exigido para sua respectiva execução. Este procedimento foi assessorado através dos arquivos de trabalho padrão utilizados pela empresa para padronizar as atividades dos operadores, os quais foram disponibilizados para a execução do presente estudo.

Com este detalhamento, foi possível ordenar as atividades de acordo com suas restrições de montagem e gerar o diagrama de precedências, processo fundamental para possibilitar a alimentação do modelo matemático.

3.1 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

O método utilizado para o seguimento do presente trabalho é retratado pelo diagrama apresentado na Figura 5:

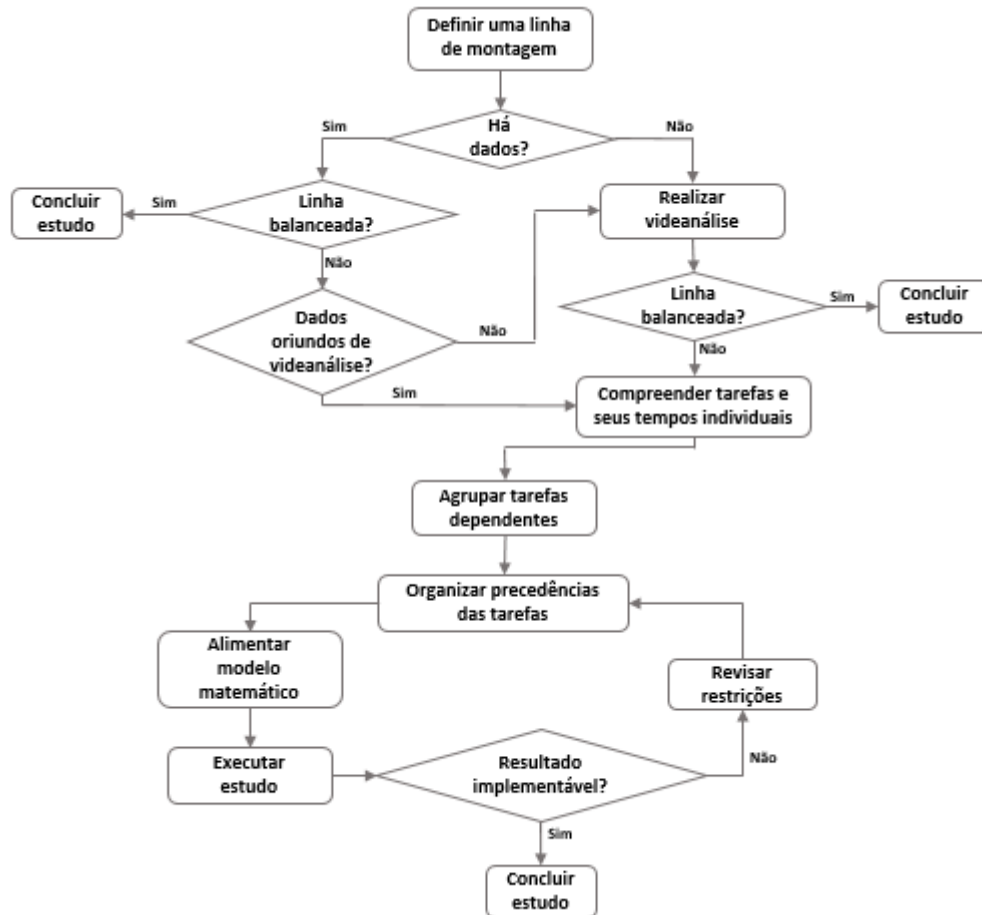


Figura 5 - Diagrama do método utilizado
Fontes: Os autores, 2018.

3.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO MÉTODO

A descrição das etapas do diagrama (Figura 5) são apresentadas a seguir:

- **Definir uma linha de montagem:** definir a linha (ou trecho de linha) que será o objeto de estudo do balanceamento proposto;
- **Há dados:** verificar a existência de informações do tempo total de cada estação de processamento da linha de montagem;
- **Linha balanceada:** não apresenta variações de tempos significativas entre as estações;
- **Realizar videanálise:** filmar as tarefas desempenhas pelo operador nas estações de trabalho e, posteriormente, com o auxílio do plano de trabalho, discriminar o escopo e o tempo de realização de cada uma das tarefas;

- **Dados oriundos de videoanálise:** dessa forma o operador tende a ser menos influenciado do que quando um colaborador está a coletar os dados *in loco*; ressalta-se que a presença de dados temporais precisos é fundamental para a aderência da resposta obtida com o modelo matemático às necessidades operacionais;
- **Compreender tarefas e seus tempos individuais:** obtenção de dados específicos de cada uma das atividades a fim de facilitar o agrupamento das mesmas e identificar realocações possíveis de tarefas para outras estações;
- **Agrupar tarefas dependentes:** concatenar atividades que obrigatoriamente devem ser realizadas em sequência em “blocos de tarefas”, que devem ser executados de modo conjunto; este agrupamento em blocos pode ocorrer por questões de limitação de equipamentos, por exigências de qualidade que não permitem a separação (distanciamento) entre tarefas específicas, ou mesmo para simplificar o estudo, diminuindo-se o número de tarefas a serem consideradas no modelo matemático de balanceamento;
- **Organizar precedência das tarefas:** estabelecer o fluxo de atividades de modo a respeitar as restrições de montagem, resultando no diagrama de precedências;
- **Alimentar modelo matemático:** inserir informações relativas às tarefas, suas precedências e demais restrições que a linha possa apresentar em um modelo matemático padrão ou desenvolvido; no presente estudo será utilizado o modelo matemático para balanceamento de linhas em PLIM apresentado em Sikora, Lopes e Magatão (2017); customizações da função de avaliação (função objetivo) serão realizadas no modelo referenciado, conforme explicado na Seção 3.3 e algebricamente expresso na Seção 4.3;
- **Executar estudo:** por meio da implementação matemática e resolução em *software* específico (*solver*), obter resultados do balanceamento a ser executado;
- **Resultado implementável:** verificar a viabilidade da proposta obtida pelo modelo matemático por meio de análise detalhada da resposta sugerida, verificando-se tarefa a tarefa se as mudanças sugeridas pelo modelo são operacionalmente viáveis;
- **Revisar restrições:** o resultado do modelo matemático não será implementável se restrições inerentes ao caso em estudo não foram corretamente incorporadas ao modelo; a revisão e posterior inclusão de restrições a princípio não colocadas tem por finalidade encontrar possíveis causadores da não viabilidade da proposta de balanceamento; ressalta-se que pode não ser tarefa trivial definir a princípio todas as restrições presentes

no sistema, as quais refletem as relações de precedência, dado que o entendimento do processo pode ser uma tarefa onerosa; contar com o auxílio de especialistas da linha em estudo nesta fase é fato importante;

- **Concluir estudo:** estudo finalizado pela implementação do modelo matemático e obtenção de resposta implementável ou pela não necessidade de balanceamento.

3.3 EMPREGO DO MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática utilizada no presente trabalho resulta de uma adaptação do modelo PLIM apresentado por Sikora, Lopes e Magatão (2017). No referido trabalho, utiliza-se o conceito de modelo equivalente, proposto por Thomopoulos (1967, 1970), para o tratamento de uma linha de modelo misto. Assim, os valores de *mix* produtivos dos diferentes produtos produzidos na linha determinam tempos equivalentes para as tarefas, conforme detalhado na Seção 2.3.2.

A função objetivo base apresentada por Sikora, Lopes e Magatão (2017) é simplesmente a minimização do tempo de ciclo (*CT – Cycle Time*). Contudo, os autores ressaltam que variantes da referida função devem ser avaliadas para melhor representar problemas específicos. Para a composição da função objetivo no presente estudo, testou-se inicialmente a inclusão de três fatores distintos: (i) a minimização do tempo de ciclo (*CT*) levando em conta os tempos equivalentes das tarefas; (ii) a minimização da máxima diferença (*MaxDifS*) de tempo entre estações; e, (iii) a minimização do tempo de ciclo máximo (*MaxCT*) entre todos os modelos. As subseções 3.3.1 a 3.3.3 a seguir discutem o propósito de cada um dos termos mencionados.

3.3.1 Minimização do tempo de ciclo (*CT*)

Este termo que pode compor a função objetivo tem a intenção de minimizar o tempo de ciclo ponderado da linha. Este valor é obtido através do *mix* de produção, ou seja, em cada estação de trabalho é avaliado o tempo total de processamento das tarefas de cada um dos dois modelos de motores produzidos. Em seguida, estes valores são multiplicados por seu respectivo fator de *mix* produtivo. Para o estudo em análise, foram utilizados os valores de 0,806 para o modelo A e 0,194 para o modelo B. Com os tempos das tarefas ponderados se encontra o tempo de ciclo a ser minimizado na composição da função objetivo.

3.3.2 Minimização da máxima diferença (*MaxDifS*)

Este termo que pode ser utilizado na composição da função objetivo busca minimizar a diferença entre o tempo total da estação que se encontra mais distante do tempo médio da linha e o tempo médio da linha propriamente dito. Ressalta-se que são considerados os tempos ponderados pelo *mix* produtivo para compor o tempo total associado a cada estação de trabalho. Adicionalmente, o tempo médio da linha pode ser obtido pelo somatório das durações de todas as tarefas equivalentes, dividido pelo número de estações da linha. A Figura 6 a seguir ilustra um caso em que a minimização da variável *MaxDifS* tende a fazer com que a estação 3 fique mais próxima ao tempo médio da linha. Caso durante as iterações a Estação 3 deixe de ser a mais distante do tempo médio, o modelo automaticamente passará a buscar a otimização da nova estação que ocupará a condição de ser a mais distante da média.

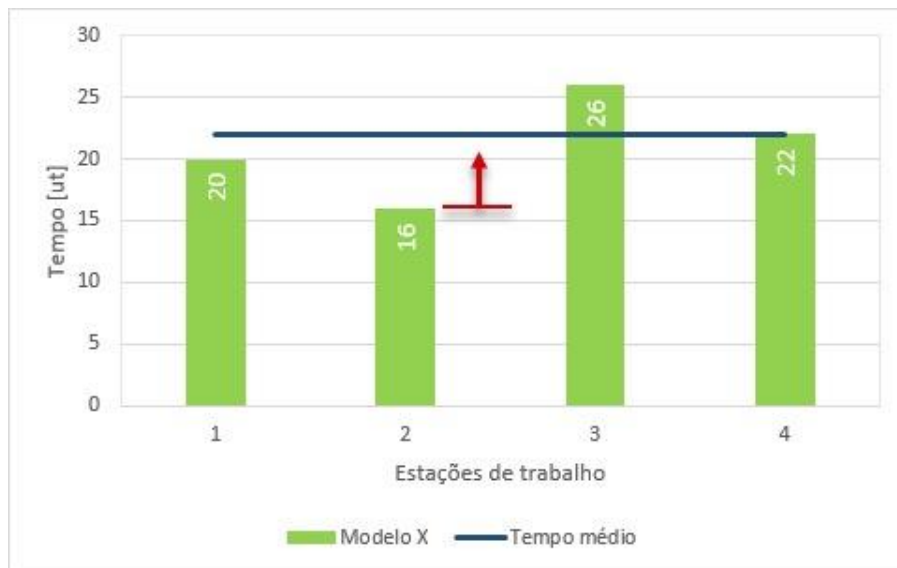


Figura 6 - Exemplo de linha sendo otimizada pela função *MaxDifS*
 Fonte: Os autores, 2018.

Na prática, o que se percebe com a minimização de *MaxDifS* na função objetivo é uma equalização entre os tempos de processamento de cada estação de trabalho, mesmo que exista uma estação gargalo com um tempo notoriamente superior às demais. Como resultado final, evita-se que os trabalhadores fiquem grandes parcelas de tempo parados, aguardando as demais estações finalizarem suas tarefas, diminuindo, portanto, a ociosidade da linha como um todo.

3.3.3 Minimização do tempo de ciclo máximo (*RefCT*)

Diferentemente das análises anteriores, não são utilizados os dados ponderados para a obtenção do valor do termo *RefCT*. O objetivo aqui é minimizar o tempo de ciclo da estação com o maior tempo de execução dentre todas as estações consideradas.

Em termos práticos, a minimização do termo *RefCT* evita que um modelo possua um tempo de ciclo relativamente elevado em uma estação específica (tempo possivelmente maior que o valor assumido pela variável *CT*), fato que poderia não ser corretamente percebido se somente os tempos equivalentes (ponderados pelo *mix* produtivo) fossem avaliados no modelo. Esta situação tende a ocorrer com maior frequência, por exemplo, quando existe um modelo com tempos de processamento relativamente elevados, mas com uma contribuição ao *mix* produtivo relativamente baixa.

Deste modo, a partir do detalhamento do método de pesquisa utilizado, segue-se no Capítulo 4 a apresentação dos principais resultados obtidos no contexto do estudo de caso em análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelo balanceamento das nove estações da linha final de montagem para os dois modelos de maior produção da fábrica. Os dados referentes às tarefas e suas precedências estão presentes no Apêndice A bem como uma comparação entre a posição atual das atividades e o proposto pelo modelo.

Os resultados computacionais foram obtidos por meio do *software* de modelagem e resolução IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.6.3, com o auxílio de um computador com processador Core i7-5500U e 16GB de memória RAM.

A Seção 4.1 apresenta os dados obtidos por intermédio da videoanálise para a linha atual. O diagrama de precedências obtido pela análise das tarefas está disponível na Seção 4.2. Na Seção 4.3 expõe-se os dados obtidos pela modelagem matemática. E por fim, na Seção 4.4, confronta-se os resultados com os dados atuais da linha final de montagem.

4.1 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA VIDEOANÁLISE DA LINHA ATUAL

Na Seção 1.2, Figura 2, foram apresentados os tempos de processamento de cada estação fornecidos pela empresa, tempos estes que foram obtidos por meio da cronoanálise. Conforme previamente indicado, esta técnica não necessariamente fornece dados satisfatórios para um estudo de balanceamento, pois pode influenciar diretamente no desempenho do operador, devido a presença do cronometrista coletando os dados e podendo provocar diversas alterações na rotina padrão do trabalhador.

O Quadro 2 ilustra os dados obtidos por cronoanálise para as nove estações de trabalho, em três coletas de tempos distintas, referentes ao motor de modelo A. Na última coluna da tabela, são reportadas as médias aritméticas das coletas realizadas. É possível notar que há uma variação significativa entre os tempos coletados em cada amostragem realizada, para uma mesma estação, chegando a 16,7% para a medição destacada na tabela. A partir da análise destes dados preliminares, e da falta de acurácia dos valores obtidos, optou-se pela realização de um procedimento mais detalhado para a coleta de dados por meio de videoanálise.

Ressalta-se, adicionalmente, que os dados de cronoanálise fornecidos pela empresa apresentavam somente a informação referente ao tempo total de processamento em cada estação de trabalho, tornando necessária a coleta dos tempos individuais de cada atividade isolada, dentro das estações. Pelos motivos anteriormente citados, optou-se por realizar esta coleta com a técnica de filmagens e posterior análise.

Quadro 2 - Cronoanálise Modelo A

MODELO A				
	Tempo 1 [ut]	Tempo 2 [ut]	Tempo 3 [ut]	Média [ut]
Estação 1	520	485	557	521
Estação 2	470	564	548	527
Estação 3	522	-	557	540
Estação 4	588	581	550	573
Estação 5	548	501	549	533
Estação 6	490	545	547	527
Estação 7	528	492	484	501
Estação 8	495	416	463	458
Estação 9	521	558	542	540

Fonte: Os autores, 2018.

Cada estação de trabalho foi filmada por no mínimo 50 minutos, de modo a garantir ao menos um ciclo completo de montagem para cada modelo de motor (A e B). Dos vídeos, obteve-se os tempos utilizados pelo operador para a execução de cada atividade, por meio de uma análise “quadro a quadro”. Nas tarefas que tiveram mais de uma amostra de tempo coletada, foi realizada a média aritmética das amostras para definição do tempo. Esta análise detalhada permitiu melhor evidenciar ociosidades isoladas, tornando possível desconsiderar estes tempos ociosos do tempo de trabalho real das estações.

Na Figura 7 está retratada a comparação entre os resultados fornecidos pela empresa e os obtidos pela videoanálise. Ambos os dados são resultados da média ponderada entre os valores obtidos para cada um dos modelos de motor. A necessidade de um balanceamento na linha fica ainda mais evidente quando se observa os novos dados, que indicam uma diferença entre os tempos das estações 2 e 3 superior a 30%.

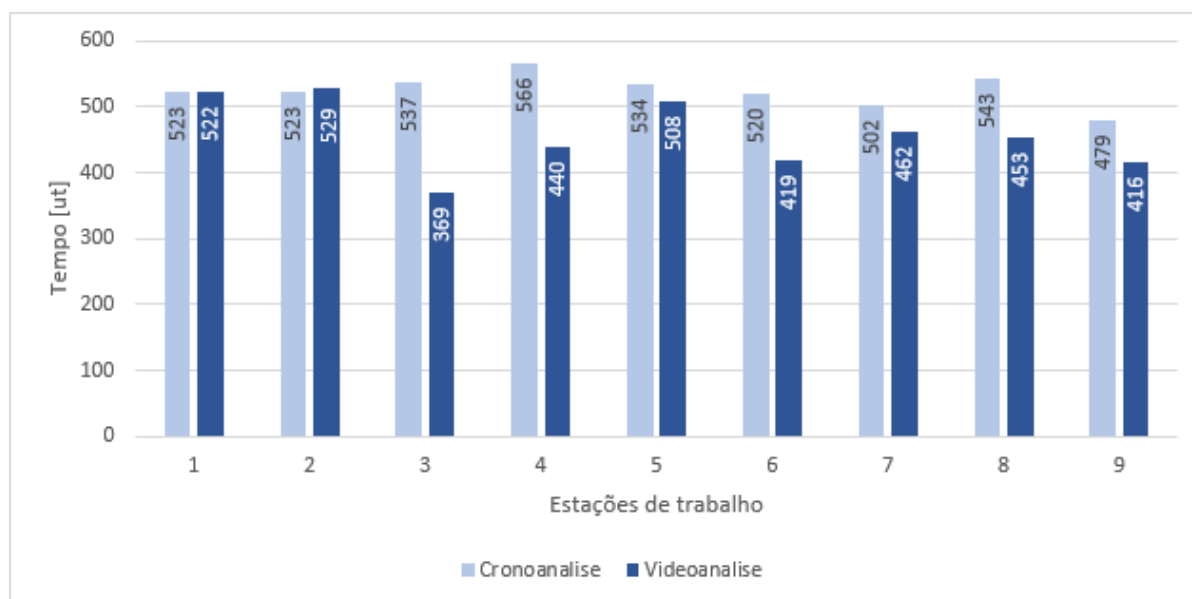


Figura 7 - Comparação entre as coletas de dados

Fonte: Os autores, 2018.

Uma vez em que não se há o conhecimento sobre como os dados oriundos da cronoanálise foram coletados, não se pode chegar a uma conclusão incontestável sobre as razões pelas quais as diferenças de tempo se mostram tão acentuadas em relação à videoanálise, para uma mesma estação de trabalho. Por outro lado, constatou-se durante a análise dos vídeos que em alguns ciclos os operadores chegaram a ficar 200ut sem realizar nenhuma atividade produtiva, enquanto aguardavam a liberação de um novo motor para recomeçarem as atividades. Tomando-se o tempo total de todas as estações obtido pela cronoanálise e o obtido pela videoanálise, nota-se uma diferença de aproximadamente 609ut. Esta diferença temporal totaliza um valor maior que o tempo da estação com maior tempo, no caso a estação 4 para a cronoanálise (566ut).

Uma possível conclusão é de que este tempo ocioso gerado pela espera de um novo motor, após finalizadas as atividades, tenha sido considerado no tempo total da estação durante a cronoanálise. Na análise via vídeos, pode-se isolar com maior rigor o tempo efetivo de cada tarefa, propiciando melhor acurácia na detecção do tempo total da estação de trabalho devido a execução das tarefas. Desta forma, para a execução do modelo matemático, adotam-se os dados obtidos por meio da videoanálise.

4.2 DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS

Para desenvolver o diagrama de precedência foram levadas em consideração as restrições quanto a precedência de montagem dos componentes e a localização dos equipamentos na linha de montagem.

Os componentes são arranjados e montados respeitando algumas ordens e procedimentos de montagem. Por exemplo, a instalação dos anéis de vedação deve ser realizada instantaneamente após a lubrificação do canal, pois caso não ocorra nessa ordem e com essa agilidade, pode acarretar na contaminação da região. A ordem de montagem também é influenciada pela posição do motor, que rotaciona em torno do eixo horizontal de um suporte móvel, para facilitar a montagem dos componentes e o transporte dos motores entre as estações de trabalho. Na atual configuração da linha, ilustrada na Figura 1, as estações 1, 3 e 7 aparecem como postos de preparação para, respectivamente, estações 2, 4 e 7. Em termos práticos, contudo, fez-se uma análise detalhada das precedências entre as tarefas e não se impôs, *a priori*, que as tarefas originalmente alocadas aos postos 1, 3 e 8 devessem neles permanecer, mas fez-se uso de restrições específicas (*zoning constraints*) que impunham as tarefas como flexíveis entre certas estações, mas respeitando-se o fluxo produtivo viável. Assim, remanejamentos de

tarefas foram considerados válidos entre os postos, desde que o respeito ao diagrama de precedências fosse observado, diagrama este construído de modo a levar em conta as restrições específicas da linha em estudo. A linha de montagem final dos motores utiliza equipamentos semiautomáticos e automáticos, como parafusadeiras elétricas e pneumáticas de modelo convencional ou multifuso. Estas parafusadeiras possuem um torque específico configurado, de acordo com o parafuso que será apertado com elas. Diante disso, é comum ver parafusadeiras iguais em uma mesma estação de trabalho.

Por estarem localizados em estações específicas da linha, estes equipamentos limitam a movimentação de algumas tarefas no processo de balanceamento. Essa limitação não é algo natural e obrigatório no balanceamento por programação matemática, conforme detalhado no Capítulo 2. No estudo em questão, ele ocorre, pois foram impostas restrições no modelo matemático, visando redução no custo através da minimização de modificações na linha.

Na Figura 8 é apresentado o diagrama de precedências com todas as tarefas presentes nas nove estações estudadas, com a representação das tarefas livres, flexíveis entre duas estações e as fixas em uma estação. As tarefas foram diferenciadas dessa maneira devido às limitações das estações e restrições de montagem.

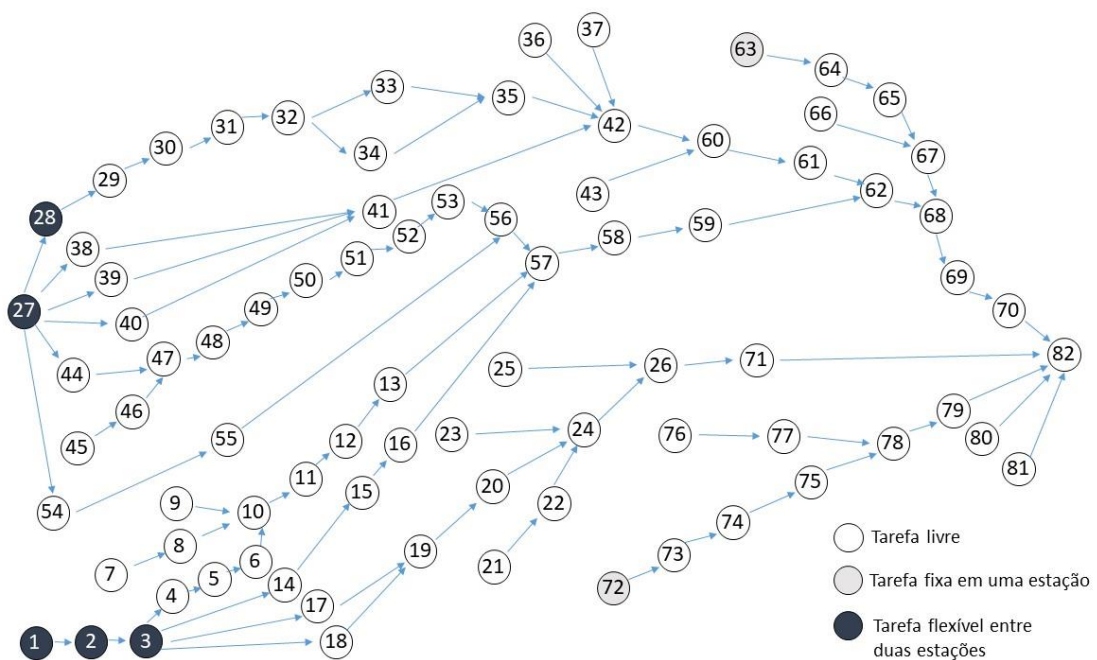


Figura 8 - Diagrama de precedências

Fonte: Os autores, 2018. Para a análise do diagrama optou-se por deixar o maior número de tarefas livres para que se pudesse analisar as respostas fornecidas pelo *software*. Respeitando as limitações da linha de montagem e suas precedências, a Figura 8 é a representação visual dessas relações.

O diagrama não indica as estações de trabalho às quais as tarefas estão inicialmente vinculadas, mas esta informação está detalhada no Apêndice A. Por exemplo, no referido apêndice nota-se que as tarefas 1 a 9 estão inicialmente vinculadas à estação 1.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS PELA MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático apresentado por Sikora, Lopes e Magatão (2017) foi adaptado e aplicado aos dados do cenário em análise. Este cenário envolve, em essência, os valores temporais de cada tarefa obtidos conforme Seção 4.1 e as dependências geradas pelo diagrama de precedências da Seção 4.2. Originou-se, então, uma formulação matemática com 3.961 restrições, 2.089 variáveis, sendo 2.067 variáveis binárias. Todos os experimentos foram executados até a otimalidade e o tempo computacional para a convergência foi inferior a 10 segundos em todos os casos avaliados.

Foram realizados testes com a função objetivo englobando de modos distintos as três opções descritas na Seção 3.3. As funções que foram geradas a partir das variáveis CT , $RefCT$ e $MaxDifS$ são apresentadas nas equações (14) a (20) a seguir indicadas:

$$\min f(x) = CT \quad (14)$$

$$\min f(x) = RefCT \quad (15)$$

$$\min f(x) = MaxDifS \quad (16)$$

$$\min f(x) = CT + MaxDifS \quad (17)$$

$$\min f(x) = CT + RefCT \quad (18)$$

$$\min f(x) = RefCT + MaxDifS. \quad (19)$$

$$\min f(x) = CT + RefCT + MaxDifS. \quad (20)$$

Reduzindo-se o primeiro termo (CT), conforme exemplificado na equação (14), viabiliza-se o aumento da produção pela diminuição do tempo de ciclo. Como foram permitidas somente mudanças viáveis a relativo baixo custo no diagrama de precedências, a minimização de CT deve ocorrer sem investimentos no quadro de funcionários ou maquinário. Com o termo da equação (15) sendo minimizado ($RefCT$), obtém-se um resultado semelhante, porém sem considerar o *mix* de produção na solução. Adicionalmente, buscou-se minimizar a máxima diferença entre os tempos de cada estação e o tempo médio ($MaxDifS$), conforme ilustrado na

equação (16). Desta maneira, os operadores tendem a ficar menos tempo ociosos esperando o próximo ciclo.

No Apêndice B é possível encontrar todos os gráficos que foram gerados com base nas soluções obtidas através da programação matemática, para cada uma das funções de avaliação descritas nesta Seção, equações (14) a (20). Os gráficos apresentam os tempos para ambos os modelos de motor, e uma reta que indica o tempo médio ponderado para cada estação.

O tempo médio de processamento da linha de montagem desse estudo, considerando a ponderação pelo *mix* produtivo, é a razão entre tempo total de todas as tarefas a serem executadas (4.140ut) e número de estações (9), resultando em 460ut. Para cada solução encontrada, calculou-se a diferença percentual do tempo proposto em cada estação pelo tempo médio de 460ut. Estas diferenças foram somadas e obteve-se um delta total para cada proposta, apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Diferença entre estações e tempo médio

Station	CT	MaxDifS	RefCT	CT + MaxDifS	CT + RefCT	RefCT + MaxDifS	CT + RefCT + MaxDifS
1	2,2%	7,0%	4,8%	0,9%	5,6%	5,9%	8,7%
2	6,3%	1,1%	6,8%	5,7%	0,6%	1,9%	5,9%
3	2,3%	0,2%	0,2%	9,0%	9,2%	4,9%	3,4%
4	1,9%	8,8%	1,0%	9,2%	5,4%	7,8%	9,2%
5	9,2%	9,2%	9,2%	0,8%	4,4%	7,5%	7,4%
6	19,9%	7,6%	8,6%	1,7%	6,2%	9,2%	3,8%
7	1,3%	5,5%	5,3%	4,1%	1,0%	1,6%	4,2%
8	6,9%	1,3%	1,7%	7,5%	12,1%	6,2%	7,5%
9	0,8%	9,0%	8,3%	0,8%	5,0%	2,6%	0,8%
Total	50,8%	49,6%	45,8%	39,6%	49,6%	47,5%	51,0%

Fonte: Os autores, 2018.

A análise indicada na Quadro 3 reflete um nivelamento entre os tempos de trabalho nas estações, o que é de interesse da presente pesquisa, conforme indicado no objetivo principal na Seção 1.2, e o objetivo do balanceamento de linha – Seção 2.3. Pelo critério de avaliação proposto, infere-se que a função objetivo (17), a qual propõe a minimização de $CT + MaxDifS$ como a mais adaptada para o estudo de caso em análise.

Na Figura 9 é apresentado o gráfico com a proposta de balanceamento para cada modelo de motor. Por meio da reta dos tempos médios entre estações subsequentes é possível perceber uma harmonização considerável na linha, fato que não estava evidente na linha anteriormente ao balanceamento, segundo os dados obtidos pela videoanálise.

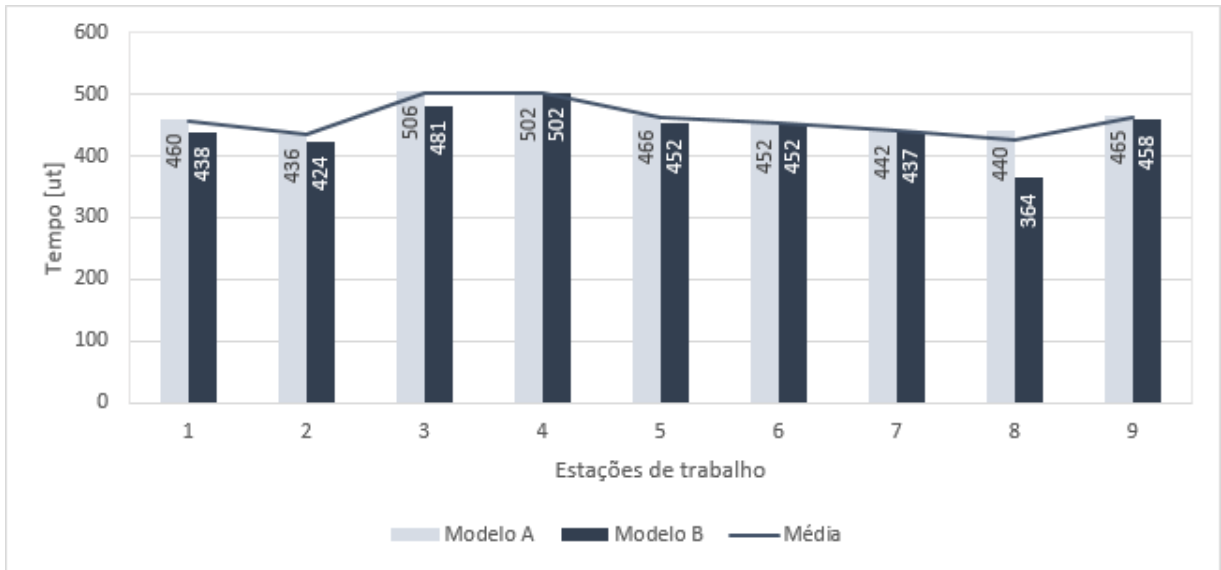


Figura 9 - Resposta da abordagem de solução proposta para os modelos A e B
Fonte: Os autores, 2018.

Para comparar os dados extraídos da solução proposta (Figura 9) com os dados atuais, oriundos da videoanálise (Figura 7) é necessário unificar os tempos de cada estação, fazendo a média ponderada entre os modelos, conforme procedimento descrito na Seção 3.3.1. Assim, a Figura 9 a seguir ilustra os tempos ponderados em cada estação de trabalho. Foi incluído nesse gráfico uma linha pontilhada para representar a tendência entre os tempos das estações; para tanto, utilizou-se um polinômio de 4º grau. Com isso é percebido na Figura 10 que há uma discrepância entre os tempos médios das estações, com mínimo de 434ut e máximo de 502ut. A referida discrepância é, contudo, inferior à originalmente presente na linha, conforme observável na Figura 11 a seguir detalhada.

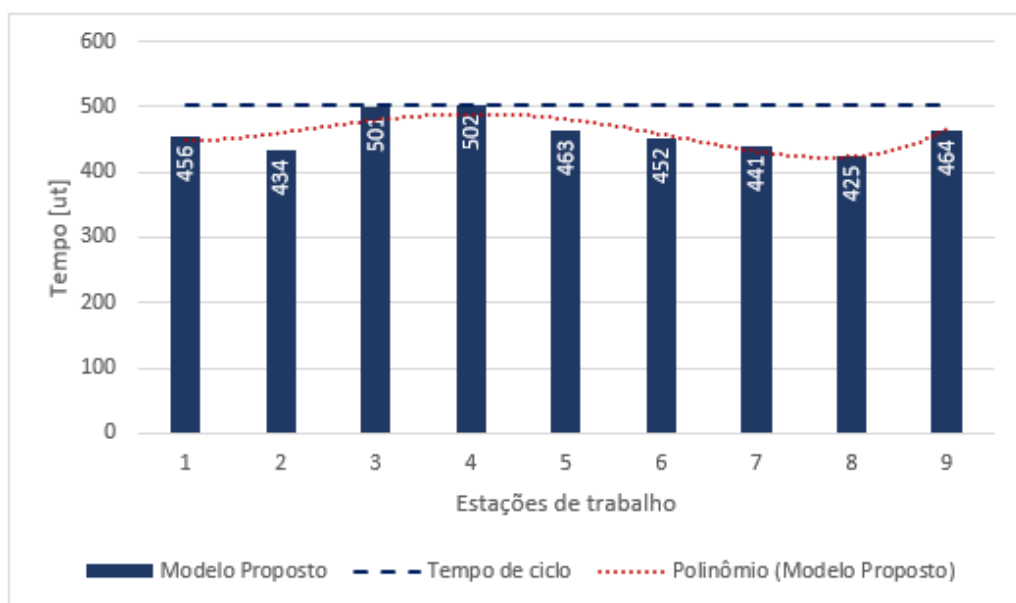


Figura 10 - Resposta da abordagem de solução proposta para o mix dos modelos A e B
Fonte: Os autores, 2018.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO ATUAL E O PROPOSTO

A Seção 4.1 disponibiliza os tempos obtidos para a linha estudada, obtidos através da videoanálise. Ao confrontar esses dados com a solução proposta na Seção 4.3, aufere-se a Figura 11, que compara os tempos ponderados das estações atuais com os da proposta, bem como a discrepância entre elas e o tempo médio. Na videoanálise observam-se variações de tempo entre as estações de 369ut a 529ut (diferença de 160ut); já na solução proposta as variações ficam entre 434ut e 502ut (diferença de 68ut).

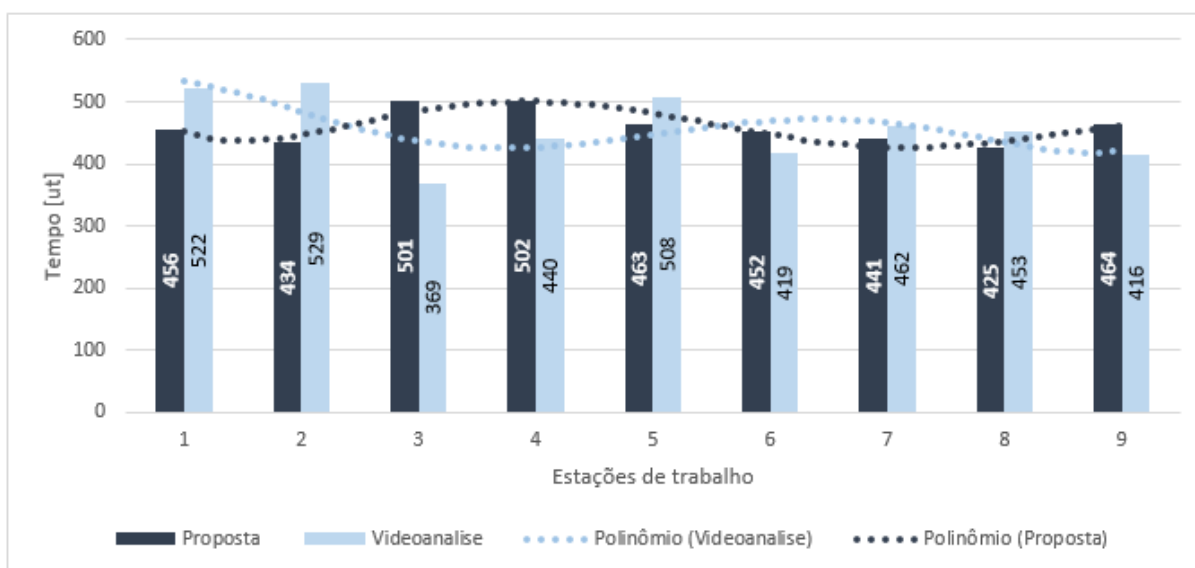


Figura 11 - Comparação dos tempos atuais e proposto
Fonte: Os autores, 2018.

É possível observar na Figura 11 que houve uma redistribuição de tarefas, possibilitando uma melhor equalização dos tempos das estações. Houve um aumento significativo no tempo de execução das estações 3 e 4, tornando o tempo ocioso destes operadores consideravelmente inferior. A distribuição de tempos sugerida, com uma melhor equalização entre as cargas de trabalho dos operadores, tende a contribuir com a rotina de trabalho destes colaboradores.

Para confirmar numericamente esta melhoria, utilizou-se da Equação (5) para se encontrar o índice de suavidade, para a linha atual e para a configuração de linha com o balanceamento proposto. Os valores obtidos foram de 285ut e 148ut, respectivamente, indicando uma melhoria superior a 48%. Essa melhoria comprova a melhor harmonização entre os tempos das estações para o modelo proposto, uma vez que o índice de suavidade é composto pelo somatório das discrepâncias entre os tempos das estações e o tempo médio para cada análise.

O segundo fator de alta relevância que compõe o objetivo principal do presente trabalho, é a redução do tempo de ciclo da linha. Na Figura 12 fica evidente uma redução do tempo de ciclo em 27ut (502ut para o modelo proposto e 529ut para o atual). Obtém-se, assim, uma redução de 5,1%, indicando uma melhora significativa em relação a esta grandeza de análise.

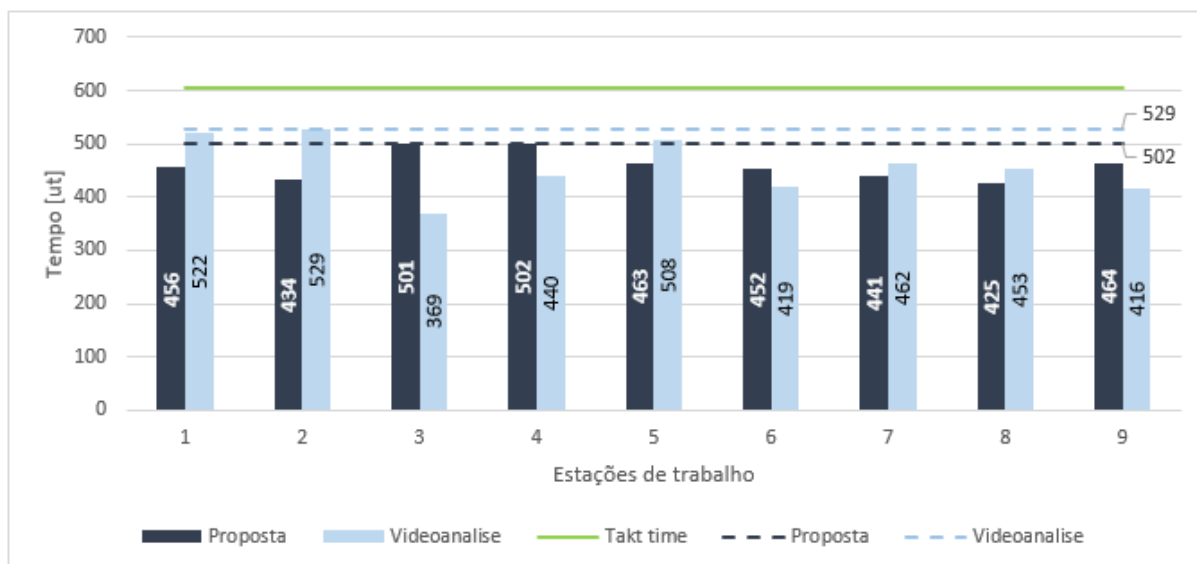


Figura 12 - Comparação entre os tempos de ciclo - proposto e atual

Fonte: Os autores, 2018.

O tempo de ciclo informado pela empresa, oriundo de dados de cronoanálise, e indicado na Figura 2, Seção 1.2, é de 573ut. O tempo de ciclo do modelo proposto nesta Seção é de 502ut. Se este tempo obtido pelo modelo for comparado com o valor inicial considerado pela empresa, ao invés do obtido através da videoanálise, o ganho percentual sobe de 5,1% para 12,4%. Se este resultado for extrapolado, assumindo hipoteticamente que, uma vez implementadas as mudanças sugeridas, seria possível aumentar a produção da fábrica também neste percentual, poderíamos supor, por exemplo, um incremento nos números do modelo A para o ano de 2016, de 10.815 unidades para 12.115. Isto possibilitaria um aumento expressivo no faturamento da empresa, sem a necessidade de grandes investimentos para tal.

Conforme elucidado na Seção 2.2.2, pode-se ainda calcular, para a linha atual e para a solução proposta, a eficiência da linha em termos percentuais, Equação (2), a ociosidade em unidades de tempo, Equação (3), e o atraso de balanceamento, também analisando percentualmente, Equação (4).

A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para os indicadores calculados tanto para a linha atual (considerando-se dados obtidos por videoanálise), quanto para a solução proposta neste Capítulo. É possível notar melhorias bastante expressivas em todos os parâmetros, podendo-se destacar a redução de 46,5% na Ociosidade da linha e o aumento de 6,5% de eficiência, que garantem o atingimento do objetivo principal inicialmente indicado no presente trabalho.

No Apêndice A é possível observar quais tarefas foram realocadas entre as estações, em comparação entre o modelo atual e o proposto pela modelagem matemática. Ao todo 60 mudanças de tarefas entre estações foram sugeridas, as quais todas respeitaram as limitações da linha e as etapas de montagens dos motores. É fato, contudo, que a realização do referido número de mudanças pode demandar um esforço considerável para a adaptação da linha, mas os indicadores colocados na Tabela 1 deixam em evidência os ganhos potenciais com o esforço de reposicionamento das tarefas entre as estações em análise.

Tabela 1 - Indicadores da linha de montagem

	Atual	Proposto
Eficiência	85,1%	91,6%
Ociosidade total [ut]	711	380
Atraso de balanceamento	14,9%	8,4%
Índice de suavidade [ut]	285	148

Fonte: Os autores, 2018.

5 CONCLUSÃO

O balanceamento de linha de montagem por meio de modelos matemáticos de otimização ainda é uma técnica pouco explorada pelas empresas, porém apresenta resultados expressivos com relação aos ganhos da empresa, tanto no processo produtivo como na consequente redução de custos.

O presente trabalho fez uso da implementação computacional e resolução de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para a determinação do balanceamento otimizado em um estudo de caso real de uma empresa do setor automotivo. A opção pelo desenvolvimento da pesquisa na empresa de grande porte estudada foi proposital, devido ao seu tamanho e tecnologia utilizada, provando que um balanceamento baseado em critérios matemáticos pode ser vantajoso, mesmo em uma empresa em que diversas ferramentas de melhoria de processos já haviam sido aplicadas à linha analisada.

Uma etapa fundamental para a abordagem de balanceamento realizada foi a obtenção dos tempos efetivos de realização de cada tarefa envolvida no processo produtivo. Para tanto, fez-se uso de videoanálise, por meio da qual pode-se notar claramente o tempo efetivo de execução das tarefas e o tempo ocioso durante o ciclo de cada estação de trabalho. Estudos preliminares na empresa já haviam coletado tempos por meio de cronoanálise na referida linha, mas a correta diferenciação entre tempos efetivos e ociosidades não se mostrou viável com os dados disponíveis por cronoanálise. Dessa forma, para o presente desenvolvimento realizou-se um extensivo trabalho de coleta e análise de dados, o qual consumiu dezenas de horas dos envolvidos. Contudo, a videoanálise mostrou-se adequada para garantir ao máximo a veracidade dos tempos das tarefas, permitindo uma avaliação precisa dos tempos de execução das atividades.

A partir de dados temporais coletados, foi verificada a precedência e as limitações de execução entre as tarefas envolvidas. Este estudo foi a base para o desenvolvimento do diagrama de precedências (Figura 8).

O modelo matemático em PLIM apresentado por Sikora, Lopes e Magatão (2017) foi base para o desenvolvimento realizado, mas customizações na função objetivo foram realizadas, conforme descrito na Seção 4.3. O referido modelo foi implementado no ambiente computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* e as resoluções demandaram poucos segundos de execução até a convergência à otimalidade. Nas fases preliminares de testes, a resposta gerada pelo *software* não se mostrava satisfatória, indicando a necessidade de refinar

as precedências entre tarefas, fato este previsto dentro do método de solução proposto, o qual é sintetizado na Figura 5 (Capítulo 3).

Com as variantes de função objetivo explicadas na Seção 3.3, pode-se analisar qual das respostas geradas pelo modelo seria a mais adequada para a linha de montagem deste trabalho. Respeitando-se todas as restrições do sistema, refletidas na versão final do diagrama de precedências (Figura 8), optou-se pela função objetivo que envolvia a combinação entre a minimização do tempo de ciclo e da diferença entre os tempos das estações em relação ao tempo médio, conforme Equação (17). Os resultados finais obtidos, sintetizados na Tabela 1, indicam uma possibilidade de aumento na eficiência da linha de 6,5% e uma redução de 331ut de tempo ocioso total, que representa 66% do tempo de ciclo do modelo proposto. Esses valores se mostram significativamente elevados, dado o contexto de que uma série de investimentos que já foram realizados pela empresa para a otimização da operação da referida linha.

Para os próximos passos da presente pesquisa se faz necessário expandir essa análise para todos os modelos dessa linha de montagem. Com a formulação e o balanceamento realizado para todos os modelos, espera-se que o ganho apresentado nesse trabalho seja relativamente reduzido. Contudo, as oportunidades de redução de custos no ramo automotivo são muito bem vistas e os resultados obtidos com a análise realizada corroboram com esta necessidade. O balanceamento da linha de montagem em análise pode gerar ganhos expressíveis em longo prazo, fazendo com que essa empresa dê um passo à frente de seus concorrentes.

REFERÊNCIAS

- AMEN, M. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics*, v. 68, p. 1-14, 2000. ISSN 1.
- AMEN, M. Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds.. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 747-770, 2006. ISSN 3.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 183, p. 674-693, 2006. ISSN 2.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, 2007.
- BRADLEY, S.; HAX, A.; MAGNANTI, T. **Applied mathematical programming**. Boston: Addison-Wesley, 1977.
- BUKCHIN, J.; RUBINOVITZ, J. A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. **IIE transactions**, v. 35, p. 73-85, 2003. ISSN 1.
- BUKCHIN, Y.; MELLER, R. D. A space allocation algorithm for assembly line components. **IIE Transactions**, v. 37, p. 51-61, 2005. ISSN 1.
- BUKCHIN, Y.; RABINOWITCH, I. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. **European Journal of Operational Research** , n. 174, p. 492–508, 2006.
- BUXEY, G. M. Assembly line balancing with multiple stations. **Management science**, v. 20, p. 1010-1021, 1974. ISSN 6.
- DESSOUKY, M. M.; ADIGA, S.; PARK, K. Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards. **The International Journal of Production Research**, v. 33, p. 757-775, 1995. ISSN 3.
- EREL, E.; SARIN, S. C. A survey of the assembly line balancing procedures. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v. 9, p. 414-434, 1998. ISSN 5.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Thomson Learning, 2002.

GERHARDT, M. P. **Sistemática para Aplicação de Procedimentos de Balanceamento em Linhas de Montagem Multi-modelo**. Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005. Dissertação em Engenharia de Produção.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOUNET, T. **Fordismo e toyotismo na civilização do automóvel**. [S.l.]: Boitempo, 1999.

GRZECHCA, W.; FOULDS, L. R. The Assembly Line Balancing Problem with Task Splitting: A Case Study. **IFAC-PapersOnLine**, 2005. 2002-2008.

KALAYCI, C. B.; GUPTA, S. M. Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, v. 40, p. 7231-7241, 2013. ISSN 18.

KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P.; MALHOTRA, M. K. **Administração da produção e operações**. 8ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.ericolisboa.eng.br>>.

LOPES, T. C.; SIKORA, C. G. S.; MAGATÃO, L. Buffer and Cyclical Product Sequence Aware Assembly Line Balancing Problem: Model and Steady-State Balancing Case Study. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Vitória, v. XLVIII, p. 3459-3470, Setembro 2016.

MAGATÃO, L. **Mixed Integer Linear Programming and Constraint Logic Programming: Towards a Unified Modeling Framework**. CEFET-PR. Curitiba. 2005.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR, F. **Otimização das operações de um poliduto através de Programação linear inteira mista**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Campos dos Jordão: [s.n.]. Novembro 2001.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção além da produção**. [S.l.]: Bookman, 1997.

OLIVEIRA, F. S. et al. MIXED ASSEMBLY LINE REBALANCING: A BINARY INTEGER APPROACH APPLIED TO REAL WORLD PROBLEMS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY. **International Journal of Automotive Technology**, v. 13, p. 933-940, 2012.

PADRÓN, M. E. A. A methodology for cost-oriented assembly line balancing problems. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 20, p. 1147-1165, 2009. ISSN 8.

PEINADO, J.; GRAEMIL, A. R. **Administração da produção (Operações Industriais e de serviços)**. Curitiba: Unicenp, 2007.

PUCCINI, A. D. L. **Introdução à Programação Linear**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1975. (Série Aplicações de Computadores).

PUCCINI, A. D. L. **Introdução à programação linear**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1975.

RAO, D. N. **Single and mixed-model assembly line balancing methods for both deterministic and normally distributed work element times**. Oregon State University. Corvallis. 1971. Tese em Engenharia Industrial.

SAIF, U. et al. A survey on assembly lines and its types. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 9, p. 95-105, 2014. ISSN 2.

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

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3^a. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2009.

SUGUINOSHITA, G.; FRANÇA, M. P. **Balanceamento de linha de montagem de motores a combustão por meio de programação linear inteira mista**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica.

TEMPELMEIER, H. Practical considerations in the optimization of flow production systems. **International Journal of Production Research**, 41, 2003. 149-170.

THOMOPOULOS, N. T. Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. **Management Science**, v. 14, n. 2, p. B-59-B-75, 1967.

THOMOPOULOS, N. T. Mixed model line balancing with smoothed station assignments. **Management Science**, v. 16, n. 9, p. 593-603, 1970.

WAGNER, H. M. **Pesquisa operacional**. 2. ed. [S.l.]: LTC, 1986.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DAS TAREFAS

No Quadro apresenta-se informações relativas às tarefas, destacando-se: tempos de execução para os modelos A e B (em ut), relações de precedência, alocação atual e proposta – detalhe mais escuro para as atividades que foram mudadas de estação.

A descrição detalhada das tarefas foi suprimida para preservar o sigilo das informações da empresa.

Quadro 4 - Posição das tarefas para o modelo atual e proposto

(continua)

Tarefa	Descrição	Tempo Modelo A [ut]	Tempo Modelo B [ut]	Precedência	Estação atual	Estação proposta
1	Tarefa 1	84	73	2	3	2
2	Tarefa 2	64	64	3	3	2
3	Tarefa 3	59	58	4,14,17,18	3	2
4	Tarefa 4	76	76	5	4	2
5	Tarefa 5	74	74	6	4	2
6	Tarefa 6	27	27	7	4	2
7	Tarefa 7	34	34	8	3	5
8	Tarefa 8	31	31	10	4	5
9	Tarefa 9	72	72	10	3	5
10	Tarefa 10	74	74	11	5	5
11	Tarefa 11	69	69	12	5	6
12	Tarefa 12	43	43	13	5	6
13	Tarefa 13	37	37	57	5	6
14	Tarefa 14	127	102	15	4	3
15	Tarefa 15	24	24	16	4	5
16	Tarefa 16	39	39	57	4	6
17	Tarefa 17	10	10	19	4	2
18	Tarefa 18	20	20	19	4	3
19	Tarefa 19	92	92	20	5	7
20	Tarefa 20	19	19	24	5	7
21	Tarefa 21	28	28	22	3	9
22	Tarefa 22	60	60	24	5	9
23	Tarefa 23	86	86	24	5	5
24	Tarefa 24	9	9	26	5	9
25	Tarefa 25	88	88	26	8	9
26	Tarefa 26	77	70	71	9	9
27	Tarefa 27	139	139	28,38,39,40,44,54	1	1
28	Tarefa 28	38	38	29	1	1
29	Tarefa 29	128	128	30	1	1
30	Tarefa 30	18	18	31	2	1
31	Tarefa 31	23	23	32	2	1
32	Tarefa 32	62	62	33,34	2	3
33	Tarefa 33	14	14	35	2	3
34	Tarefa 34	8	8	35	3	3
35	Tarefa 35	72	72	42	6	3
36	Tarefa 36	18	18	42	6	3
37	Tarefa 37	68	68	42	6	3
38	Tarefa 38	24	24	41	1	1
39	Tarefa 39	18	18	41	1	1

Quadro 5 - Posição das tarefas para o modelo atual e proposto (conclusão)

Tarefa	Descrição	Tempo Modelo A [ut]	Tempo Modelo B [ut]	Precedência	Estação atual	Estação proposta
40	Tarefa 40	22	0	41	1	1
41	Tarefa 41	42	42	42	6	3
42	Tarefa 42	75	75	60	6	3
43	Tarefa 43	23	23	60	6	5
44	Tarefa 44	42	42	47	1	2
45	Tarefa 45	111	111	46	2	4
46	Tarefa 46	21	21	47	2	4
47	Tarefa 47	35	35	48	2	4
48	Tarefa 48	60	60	49	2	4
49	Tarefa 49	54	54	50	2	4
50	Tarefa 50	46	46	51	2	4
51	Tarefa 51	58	58	52	2	4
52	Tarefa 52	69	69	53	2	4
53	Tarefa 53	48	48	56	2	4
54	Tarefa 54	32	32	55	1	1
55	Tarefa 55	18	18	56	1	1
56	Tarefa 56	13	13	57	2	5
57	Tarefa 57	37	37	58	6	6
58	Tarefa 58	19	19	59	7	6
59	Tarefa 59	103	103	62	7	6
60	Tarefa 60	109	95	61	6	5
61	Tarefa 61	23	23	62	8	6
62	Tarefa 62	67	67	68	8	6
63	Tarefa 63	74	74	64	7	7
64	Tarefa 64	29	29	65	7	7
65	Tarefa 65	16	16	67	7	7
66	Tarefa 66	55	55	67	7	7
67	Tarefa 67	40	40	68	8	7
68	Tarefa 68	8	8	69	9	7
69	Tarefa 69	61	61	70	9	8
70	Tarefa 70	73	0	82	9	8
71	Tarefa 71	66	66	82	9	9
72	Tarefa 72	15	15	73	6	6
73	Tarefa 73	109	104	74	8	7
74	Tarefa 74	21	21	75	8	8
75	Tarefa 75	33	30	78	8	8
76	Tarefa 76	161	161	77	7	8
77	Tarefa 77	25	25	78	7	8
78	Tarefa 78	29	29	79	9	8
79	Tarefa 79	37	37	82	9	8
80	Tarefa 80	44	44	82	8	9
81	Tarefa 81	77	77	82	9	9
82	Tarefa 82	16	16		9	9

Fonte: Os autores, 2018.

APÊNDICE B – SOLUÇÕES GERADAS

Nos gráficos a seguir ilustram-se as soluções encontradas pelo modelo matemático a partir das Equações (14) a (20), descritas na Seção 4.3.

