

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

THIAGO TRISTÃO MARQUEZE

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE PAINEL DE
INSTRUMENTOS AUTOMOTIVOS POR PROGRAMAÇÃO LINEAR
INTEIRA MISTA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

THIAGO TRISTÃO MARQUEZE

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE PAINEL DE
INSTRUMENTOS AUTOMOTIVOS POR PROGRAMAÇÃO LINEAR
INTEIRA MISTA**

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

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE PAINEL DE INSTRUMENTOS AUTOMOTIVOS POR PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA", realizada pelo aluno Thiago Tristão Marqueze, 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. Dr. Euclides Alexandre Bernardelli

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Walter Luis Mikos

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 28 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais que não mediram esforços para sempre me proporcionar as melhores condições para meus estudos.

Agradecer a todos meus parentes, que compartilharam do sonho de ter um engenheiro na família e me incentivaram neste caminho.

Agradeço à Alanne, que me deu energias, não me deixou desistir, esteve comigo nos momentos mais difíceis e foi fundamental para esta conquista.

Gostaria também de agradecer ao Professor Doutor Leandro Magatão, que abraçou o meu trabalho mesmo com um tempo tão curto para o desenvolvimento, por toda a sua dedicação, atenção, e por sua paixão pela área de Pesquisa Operacional.

Agradeço também a empresa deste trabalho por me dar a oportunidade de me desenvolver imensamente e compartilhou seus dados.

Por fim, agradecer todos meus colegas que partilharam tantos anos de estudos e todos os professores que puderam transferir seu conhecimento.

*“Era difícil
Era improvável
Era impossível
Era.”*

Autor desconhecido.

RESUMO

MARQUEZE, Thiago T. Balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos por Programação Linear Inteira Mista. 70 f. Trabalho de conclusão de curso – TCC2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Em um cenário industrial cada vez mais competitivo, buscam-se diversas maneiras para aumentar a produtividade e diminuir os desperdícios. O balanceamento de linha visa, por exemplo, diminuir o tempo de ciclo da linha de montagem, diminuir o tempo ocioso dos operadores, diminuir o número de estações de trabalho e também homogeneizar a carga de trabalho das estações/operadores. Este trabalho tem como objetivo realizar o balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos para uma empresa situada em São José dos Pinhais - PR utilizando um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O trabalho compreendeu a identificação das atividades realizadas e suas restrições; cronoanálise das tarefas; elaboração do diagrama de precedências; alimentação dos dados no modelo matemático; escolha da função objetivo; o uso do modelo matemático em PLIM para obtenção dos resultados e validação com o especialista de linha. Foram realizados cinco estudos de caso, considerando a situação atual da linha de montagem, a retirada de um operador, a mudança física de estações de trabalho e, por fim, a inclusão de um robô e a automação da inspeção final. Os resultados compilados serviram de base para o processo de tomada de decisão da empresa, que optou pela solução que obteve uma melhora de 27,0% no tempo de ciclo, redução de 96,0% na ociosidade total dos operadores e a redução de 33% do total de mão-de-obra, quando comparado com a situação atual, com um tempo de retorno de investimento de 1,05 anos.

Palavras-chave: Balanceamento de linha; Programação Linear Inteira Mista (PLIM); Linha de montagem de painéis automotivos.

ABSTRACT

MARQUEZE, Thiago T. Automotive instrument panel assembly line balancing using Mixed Integer Linear Programming. 70 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

In a scenario where industry is getting more competitive, multiple ways are sought to increase productivity and reduce waste. Line balancing aims, for example, to reduce the cycle time of an assembly line, to reduce the idle time of workers, to reduce the number of workstations, and to homogenize the workload of stations and workers. This project aims to balance an automotive instrument panel assembly line for a company located in São José dos Pinhais, Parana, Brazil, using Mixed Integer Linear Programming (MILP). The project consists in the identification of the activities of the assembly and its constraints; chronoanalysis of tasks; preparation of the precedence diagram; input of the data in the mathematical model; choice of the objective function; use of the model in MILP in order to obtain the results, and validation with the line specialist. Five case studies were performed, considering the current situation of the assembly line, removing one worker, the physical change of the workstation and, finally, adding a robot and the final inspection automation. The results were compiled and served as the basis for the company's decision-making, which opted for the solution that achieved a 27,0% improvement of the cycle time, a reduction of 96,0% of the total idleness of the workers and 33,3% reduction of the manpower, when compared to the current situation, with a payback of 1,05 years.

Keywords: Line balancing; Mixed Integer Linear Programming (MILP); Automotive instrument panel assembly line.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Layout da linha de montagem de painel de instrumentos.	14
Figura 2 - Tempo de ciclo das estações da linha.	15
Figura 3 - Tempo de ciclo dos operadores da linha de montagem.....	16
Figura 4 - Relação entre variedade de produtos, volume de produção, tipo de fluxo e os arranjos físicos existentes.....	21
Figura 5 - Exemplo de diagrama de precedências.	23
Figura 6 - Linhas de montagem modelo único, misto e multimodelo.....	27
Figura 7 - Conceitos essenciais de modelos.....	31
Figura 8 – Exemplo de Árvore de busca.	35
Figura 9 - Exemplo de balanceamento com TWALBP.	37
Figura 10 - Metodologia aplicada.....	39
Figura 11 - Diagrama de precedência atual.....	46
Figura 12 - Tempo de ciclo atual e proposta 1.....	49
Figura 13 - Tempo de ciclo atual e proposta 2.....	51
Figura 14 - Tempo de ciclo atual e proposta 3.....	52
Figura 15 - Tempo de ciclo atual e proposta 4.....	55
Figura 16 - Tempo de ciclo atual e proposta 5.....	57
Figura 17 - Diagrama de precedência do estudo de caso 5.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mix de Produção.....	14
Tabela 2 - Tempo de ciclo para os modelos do estudo.	17
Tabela 3 - Número de nós de acordo com o número de variáveis.....	34
Tabela 4 - Indicadores para as diferentes funções objetivo.....	42
Tabela 5 - Mudanças proposta 1.....	49
Tabela 6 - Indicadores atuais e proposta 1.....	50
Tabela 7 - Mudanças proposta 3.....	53
Tabela 8 - Indicadores atuais e proposta 3.....	54
Tabela 9 - Mudanças proposta 4 (Continua).....	55
Tabela 10 - Indicadores atuais e proposta 4.....	56
Tabela 11 - Mudanças proposta 5.....	58
Tabela 12 - Indicadores atuais e proposta 5.....	58
Tabela 13 - Compilado dos indicadores.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
LGS	<i>Light Guide System</i>
PI	Painel de instrumentos
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
SPC	Suporte para celular
TWALBP	<i>Traveling Worker Assembly Line Balancing Problem</i>
ut	Unidades de tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	ESCOPO DO ESTUDO.....	13
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	CONTEÚDO OU ETAPAS DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	ARRANJO FÍSICO	20
2.1.1	Arranjo Físico por Produto	20
2.1.2	Arranjo Físico por Processo	21
2.1.3	Arranjo Físico Celular	21
2.1.4	Arranjo Físico Posicional.....	22
2.2	FUNDAMENTOS DA LINHA DE MONTAGEM.....	22
2.2.1	Terminologia.....	22
2.2.2	Cronoanálise	23
2.2.3	Indicadores	24
2.2.4	Classificação	26
2.3	BALANCEAMENTO DE LINHA.....	28
2.3.1	Diagrama de Precedência.....	28
2.3.2	Função Objetivo	29
2.4	PESQUISA OPERACIONAL	30
2.4.1	Programação Linear	31
2.4.2	Programação Linear Inteira Mista	33
2.4.3	<i>Branch and bound</i>	33
2.4.4	Balanceamento de linha de montagem simples (SALBP)	35
2.4.5	Balanceamento de linha de montagem com operador viajante (TWALBP).....	36
3	METODOLOGIA	39
3.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	39
3.1.1	Definição das Tarefas Realizadas.....	40
3.1.2	Cronoanálise	40
3.1.3	Definição das Estações de Trabalho.....	40
3.1.4	Identificação das Restrições e Precedência	41
3.1.5	Implementação no Modelo	41
3.1.6	Análise da Função Objetivo	41
3.1.7	Análise dos Resultados	43
3.1.8	Compilação dos Resultados e Escolha do Balanceamento.....	43
3.2	JUSTIFICATIVA DA METODOLOGIA APLICADA	43
4	RESULTADOS	45
4.1	DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS.....	45
4.2	BALANCEAMENTO DE LINHA.....	48
4.2.1	Estudo de Caso 1 – 6 Operadores.....	48
4.2.2	Estudo de Caso 2 – 5 Operadores.....	50
4.2.3	Estudo de Caso 3 – 5 Operadores com Mudança de <i>Layout</i>	51
4.2.4	Estudo de Caso 4 – Robô e Inspeção Automática com 6 Operadores	54

4.2.5	Estudo de Caso 5 – Robô e Inspeção Automática com 4 Operadores	57
4.3	TOMADA DE DECISÃO	61
5	CONCLUSÕES.....	63
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.2	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	64
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS TAREFAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário produtivo, as empresas de manufatura tendem a adotar um fluxo de produção com linhas de montagem que compartilham diferentes produtos na mesma linha (BECKER e SCHOLL, 2006). Neste contexto, o balanceamento da carga de atividades envolvidas em cada estação de trabalho é uma tarefa importante, conhecida como balanceamento de linha. O balanceamento de linhas permite minorar diferenças entre as estações de trabalho e operadores envolvidos, minimizando as ociosidades presentes no sistema em análise (BATTÁIA e DOLGUI, 2013).

Este Trabalho de Conclusão de Curso aborda o problema de balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos, realizado com o auxílio de modelos matemáticos.

Será apresentado primeiramente o contexto do tema (seção 1.1), com informações sobre a empresa, a linha de montagem escolhida e seus produtos. Em seguida serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho na seção 1.2. A seção 1.3 trata da justificativa do trabalho e, por fim, a seção 1.4 apresenta a estrutura deste trabalho.

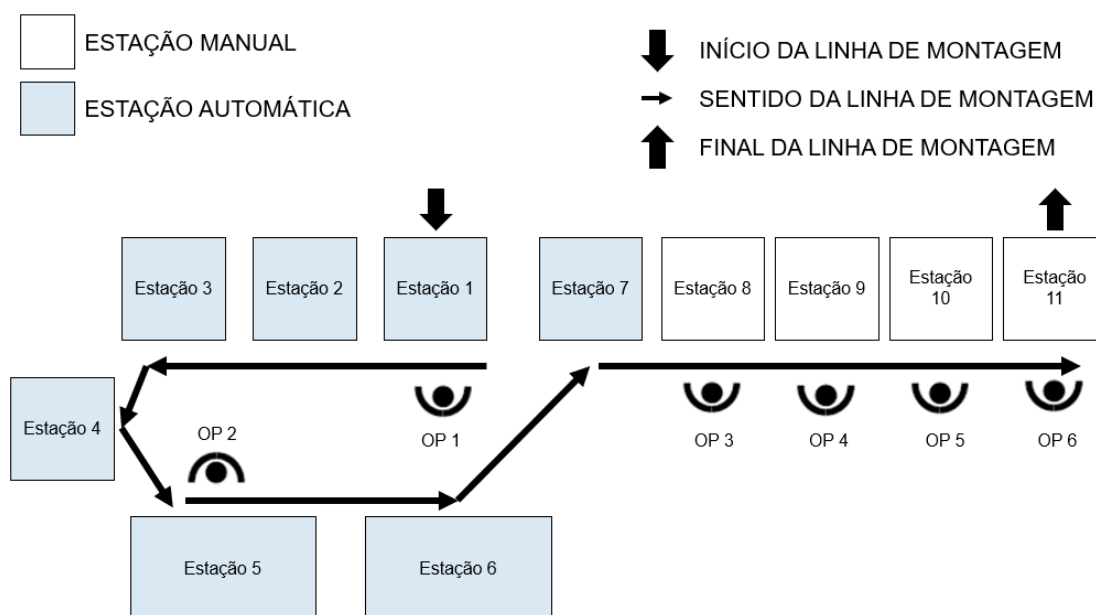
1.1 Escopo do Estudo

O presente estudo aborda uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos instalada em 2019 em uma fábrica em São José dos Pinhais - PR. Além da linha em questão, a empresa possui injeção de peças plásticas, injeção de espumas, pintura e montagem de bancos automotivos, linhas estas que não fazem parte do escopo do presente projeto. A linha produz dois modelos distintos de painel de instrumentos, que diferem entre si o material e acessórios. A produção diária total desta linha de montagem é inferior a 1000 produtos, operando em dois turnos.

Atualmente a linha conta com seis operadores, sete máquinas automáticas, três bancadas de montagem e uma bancada de inspeção final, conforme a **Figura 1**.

Os operadores 1 (OP 1) e 2 (OP 2) fazem a movimentação manual de peças entre as máquinas 1 e 7. Os operadores 3, 4 e 5 fazem a montagem de acessórios no painel e, por fim, o operador 6 faz a inspeção final e movimentação manual do produto para o vagão de peças acabadas.

Figura 1 - Layout da linha de montagem de painel de instrumentos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os dois modelos de painéis produzidos possuem um *mix* produtivo considerado de acordo com a **Tabela 1**. Deste modo, 80% da produção da linha é destinada ao Modelo 1, ao passo que 20% é referente à produção do Modelo 2.

Tabela 1 - Mix de Produção.

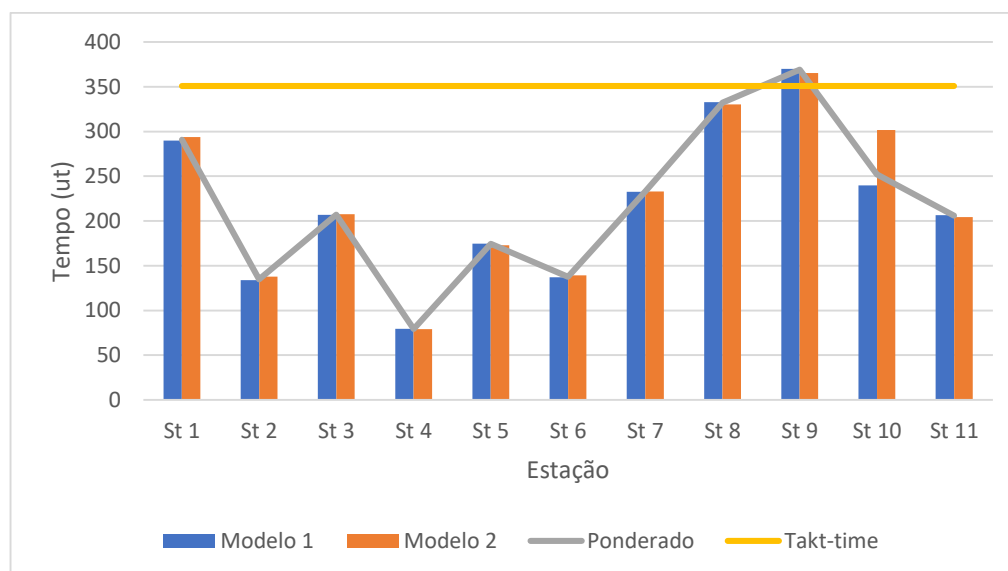
Modelo	Mix
Modelo 1	80%
Modelo 2	20%

Fonte: Autoria própria, 2019.

A **Figura 2** apresenta o balanceamento atual das estações de trabalho. Todos os valores temporais são apresentados em unidades de tempo (ut) de modo a

preservar os dados reais da empresa em análise. Ressalta-se que, para ter maior confiabilidade nos valores temporais envolvidos na análise, todos os tempos foram obtidos por meio de cronoanálise, com dez medições para cada estação de trabalho.

Figura 2 - Tempo de ciclo das estações da linha.



Fonte: Autoria própria (2019).

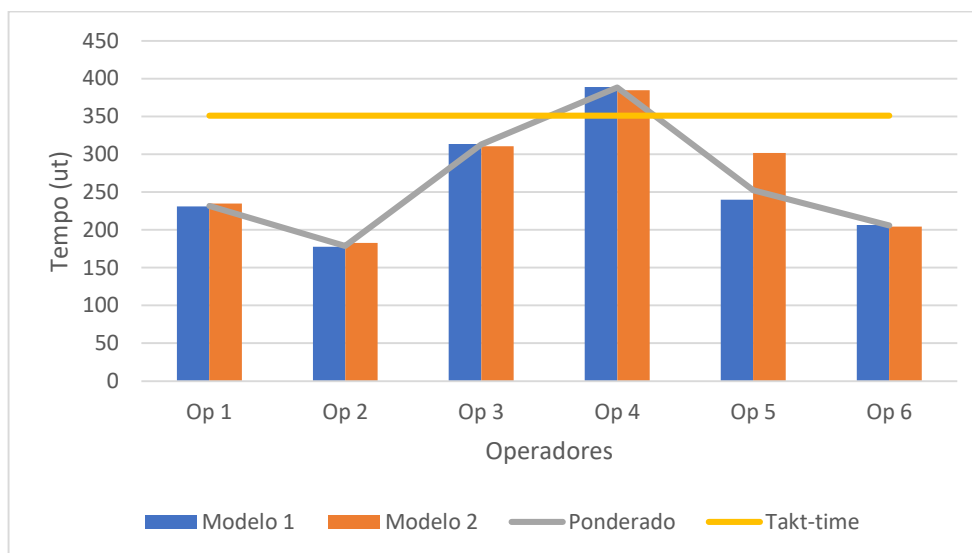
Há uma diferença significativa entre o tempo de operações de algumas máquinas automáticas, as quais possuem operações dedicadas. De fato, no caso em análise, existe um número significativo de atividades automáticas que demandam um tempo de execução considerável e o número de operadores é inferior ao número de estações. Assim, os colaboradores não ficam necessariamente fixos em uma estação, podendo se deslocar entre estações e realizar tarefas em mais de uma estação de trabalho.

A **Figura 3** apresenta o balanceamento atual dos operadores presentes na linha. Nota-se um tempo de gargalo elevado no operador 4, que definido por Slack, Chambers e Johnston (2018), é a parte mais sobrecarregada do processo, o que gera um congestionamento na produção, e dita o tempo em que o processo irá operar.

O tempo de ciclo é o tempo entre a saída consecutiva de dois itens da linha (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2018). O *takt time* de acordo com Ohno (1997), é o tempo total disponível para a produção dividido pela necessidade diária de peças. O fato do operador 4 ultrapassar o *takt time* de 351,0 ut faz com que a empresa precise

contratar horas extras para atingir a demanda do cliente, além de que outros operadores fiquem ociosos, fato que acaba gerando descontentamento.

Figura 3 - Tempo de ciclo dos operadores da linha de montagem.



Fonte: Autoria própria (2019).

A análise da **Figura 3** evidencia que a carga dos operadores limita o tempo de execução médio da linha. Desta forma, optou-se em realizar o balanceamento da carga de trabalho dos operadores da linha ao invés da carga das estações de trabalho. Na condição limite, a estação gargalo estará com um dos operadores a ela dedicado, o qual também será um “operador gargalo” do sistema. Procedimento similar foi adotado em trabalhos de balanceamento correlatos (SIKORA, LOPES e MAGATÃO, 2017), obtendo-se respostas práticas adequadas.

O tempo de ciclo e a carga de trabalho total dos operadores, de acordo com o modelo produzido, encontram-se na **Tabela 2**.

Como os tempos de ciclo dos modelos 1 e 2 são muito próximos e a variação da carga de trabalho total não ultrapassa os 3%, optou-se no presente trabalho em realizar o balanceamento considerando que a linha opera com somente um modelo equivalente de painel de instrumentos (modelo único ponderado pela demanda), fato que será detalhado *a posteriori* no Capítulo 3.

Tabela 2 - Tempo de ciclo para os modelos do estudo.

Modelo	Tempo de Ciclo (ut)	Somatório do Total da Carga de Trabalho (ut)	Varição em relação ao ponderado
Modelo 1	389,1	1557,7	0,6%
Modelo 2	384,7	1619,0	2,3%
Ponderado	388,2	1569,9	-

Fonte: Aatoria própria (2019).

De modo simplificado, nota-se claramente na **Figura 3** o desbalanceamento entre os operadores, de modo que um procedimento de balanceamento da linha tenderia a minimizar o problema do tempo de ciclo acima do *takt time*, reduzindo o tempo de ciclo e aumentando a produtividade da linha.

1.2 Objetivos

O objetivo geral e objetivos específicos do trabalho são a seguir elencados.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo realizar o balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos em uma empresa situada em São José dos Pinhais - PR, utilizando um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que fosse possível alcançar o objetivo geral do trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Compreender todas as atividades necessárias para a montagem do painel de instrumentos em análise, considerando-se as duas variantes de produto que compartilham a linha.

- b. Definir as precedências das atividades de acordo com o processo analisado.
- c. Tomar o tempo dos operadores envolvidos e máquinas automáticas.
- d. Utilizar um modelo matemático em PLIM (Programação Linear Inteira Mista) da literatura, Sikora, Lopes e Magatão (2017), para obter soluções de balanceamento da linha.
- e. Analisar os resultados obtidos no modelo matemático.
- f. Sugerir cenários a serem verificados para o processo de tomada de decisão operacional da empresa.
- g. Validar as soluções propostas pelo modelo matemático e analisar os investimentos necessários para as modificações.

1.3 Justificativa

Em um mercado altamente globalizado e competitivo as empresas estão constantemente buscando otimizar a produção para reduzir seus custos, aumentar a eficiência e produtividade, e sair na frente dos seus concorrentes.

A Pesquisa Operacional (PO), em especial os modelos matemáticos de otimização que podem ser elaborados e resolvidos por técnicas de PO, podem ser utilizados para realizar o balanceamento de linhas. A obtenção de um balanceamento otimizado contribui para reduzir o tempo ocioso das estações/trabalhadores e aumentar a eficiência das linhas em análise, fatos alinhados às necessidades atuais das empresas, justificando a execução do presente trabalho.

1.4 Conteúdo ou Etapas do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. O primeiro aborda o tema, objetivos e justificativa do trabalho. O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica, trazendo conhecimentos relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Nele são vistos os diversos tipos de arranjos físicos em uma fábrica; fundamentos da linha de montagem, com revisão dos tipos de linha de montagem, termos utilizados, cronoanálise e

indicadores; o que é balanceamento de linha e como realizá-lo; por fim uma introdução à Pesquisa Operacional e Programação Matemática.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada neste trabalho, detalhando todas as etapas necessárias para o desenvolvimento.

O Capítulo 4 traz o cenário atual e os resultados obtidos com os estudos realizados, a compilação dos resultados e a escolha de um balanceamento pela empresa a partir dos estudos realizados.

Por fim o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, além de sugestões para continuidade do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Capítulo 2 apresenta conhecimentos relevantes para o desenvolvimento do trabalho, englobando: arranjos físicos em uma fábrica (seção 2.1); fundamentos de linha de montagem (seção 2.2) e balanceamento de linhas (seção 2.3); e noções de base de Pesquisa Operacional (seção 2.4).

2.1 Arranjo Físico

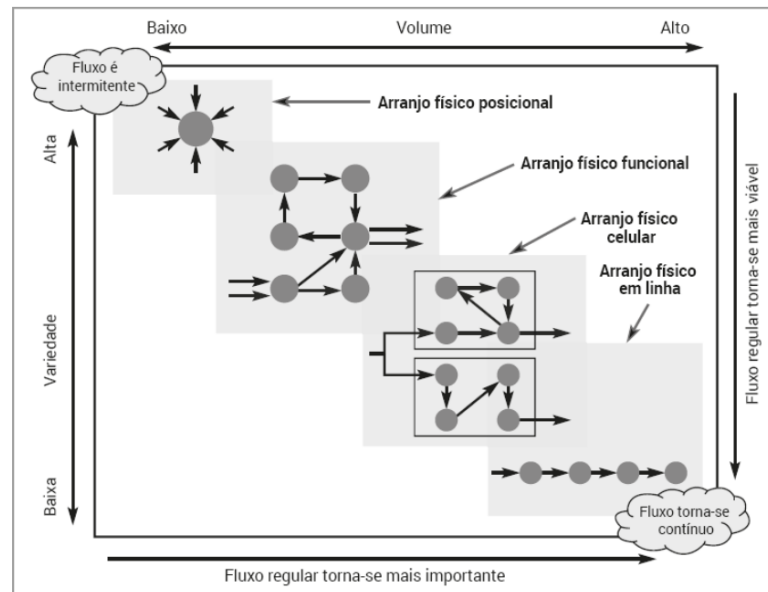
O arranjo físico, em inglês *layout*, representa a área ocupada, localização das máquinas e equipamentos, homens e materiais, procurando a melhor combinação entre as operações das máquinas, produtividade do trabalho e fluxo de materiais (CHIAVENATO, 2014). Um *layout* mal dimensionado pode acarretar em padrões de fluxo longos e confusos, filas de clientes, longos tempos de processos, operações inflexíveis, fluxos imprevisíveis e altos custos, portanto é algo que deve ser definido com muito cuidado (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2018).

A **Figura 4** a seguir mostra a interação dos *layouts* com o volume de produção, variedade de produtos e fluxo. Nela estão exemplificados os quatro tipos de arranjos físicos: por produto, por processo, celular e posicional.

2.1.1 Arranjo Físico por Produto

O *layout* por produto tem como objetivo gerar uma maior conveniência dos recursos transformados, de modo que a disposição física dos processos coincida com a sequência das atividades para a fabricação, apresentando alta produtividade e baixa flexibilidade (PEINADO; GRAEML, 2007). A linha de montagem deste trabalho utiliza o arranjo físico por produto.

Figura 4 - Relação entre variedade de produtos, volume de produção, tipo de fluxo e os arranjos físicos existentes.



Fonte: Slack, Chambers e Johnston (2018).

2.1.2 Arranjo Físico por Processo

O *layout* por processo ou funcional agrupa processos semelhantes para otimizar a utilização dos recursos, que o produto se movimenta pelas atividades de acordo com a sua necessidade, de modo que diferentes produtos terão diferentes necessidades e, conseqüentemente, rotas, o que gera uma operação bastante complexa (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2018).

2.1.3 Arranjo Físico Celular

O *layout* celular permite que todos os recursos de transformação sejam localizados dentro da célula, para atender às necessidades de processamento imediato. Dentro da célula, as estações podem ser organizadas em arranjo por processo ou produto (PEINADO; GRAEML, 2007).

2.1.4 Arranjo Físico Posicional

No arranjo físico posicional, ao invés do produto se mover, são os equipamentos, máquinas e pessoas que se movimentam ao redor do recurso que está sendo transformado. Ocorre em casos que o produto é muito grande, como por exemplo a indústria naval ou aeronáutica (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2018).

2.2 Fundamentos da Linha de Montagem

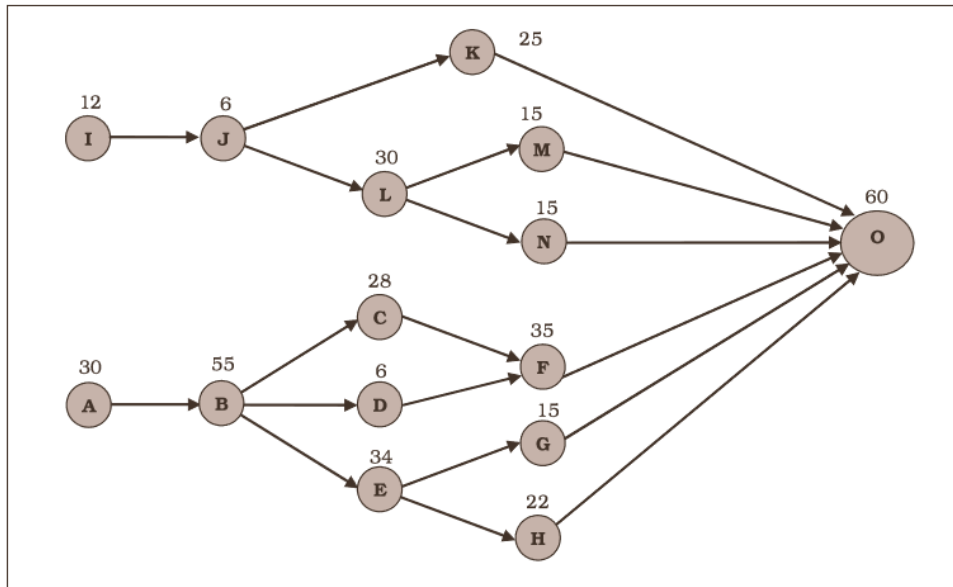
Alguns conceitos relativos a linhas de montagem, os quais são importantes para o entendimento desse trabalho, são apresentados nas seções 2.2.1 a 2.2.4 a seguir.

2.2.1 Terminologia

Na sequência há a definição de alguns termos relativos às linhas de montagem:

- Tarefa: menores unidades de trabalho que podem ser executadas interdependentes (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009);
- Duração de uma tarefa: tempo necessário para que um operador ou máquina execute a tarefa (GAITHER; FRAZIER, 2005);
- Precedência entre tarefas: a sequência na qual as atividades devem ser executadas. Há o diagrama de precedência, que tem a função de facilitar a visualização da precedência entre as tarefas, ilustrando a atividade, seu tempo e a relação de precedência (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). A **Figura 5** a seguir exemplifica um diagrama de precedências no qual as tarefas são colocadas dentro dos nós e a duração das mesmas próxima ao nó, na parte superior; há, por exemplo, uma relação direta de precedência entre as tarefas I e J;

Figura 5 - Exemplo de diagrama de precedências.



Fonte: Peinado e Graeml (2007).

- Estação ou posto de trabalho: localização física onde um conjunto de tarefas é executado por um operador ou máquina (GAITHER e FRAZIER, 2005);
- Tempo de uma estação: somatório do tempo de todas as tarefas executadas na estação de trabalho;
- Operador: indivíduo que realiza as tarefas na estação de trabalho;
- Máquina automática: máquina que opera automaticamente após um procedimento de inicialização (o *start*) do operador;

2.2.2 Cronoanálise

Abreu et al. (2006) definem a cronoanálise como uma técnica aplicada para definir o tempo que o colaborador ocupa para realizar a operação com um nível de desempenho ótimo, cronometrando a atividade.

É importante que a atividade seja padrão, que o operador respeite a instrução de trabalho e que a medição de tempo se inicie e termine sempre com a mesma atividade.

2.2.3 Indicadores

Com o objetivo de fazer o controle e verificar o rendimento da linha de montagem, faz-se necessário o uso de indicadores de desempenho. Os indicadores são ferramentas de gestão com o propósito de medir o nível de desempenho de uma organização ou de um processo. Mensurar os resultados possibilita identificar se os objetivos estão sendo alcançados e abre espaço para oportunidades de melhorias.

O grau de utilização da linha, de acordo com Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009) é a porcentagem de tempo em que a linha de produção trabalha, descontando os tempos ociosos, e é calculado de acordo com a equação (1).

$$Utilização (\%) = \frac{K_{min}}{K} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde K_{min} representa o número mínimo de estações de trabalho necessárias e K o número real de estações na linha.

O número mínimo de estações de trabalho é definido como (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009):

$$K_{min} = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{tt} \right\rceil \quad (2)$$

Com t_i sendo o tempo necessário para a execução da i -ésima tarefa, em unidades de tempo; i indica a tarefa, tal que $i = 1, \dots, N$; N é o número de tarefas; e tt é o *takt time*, em unidades de tempo. Deve-se salientar que o número mínimo de estações deve ser um número inteiro, portanto o resultado deve ser arredondado para o próximo valor inteiro.

A eficiência da linha é dada pela razão entre o tempo total das tarefas e o tempo total do produto na linha, que é o produto do tempo de ciclo pelo número de estações, sendo representada pela equação (3) (Becker e Scholl, 2006).

$$Eficiência (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{K \cdot C} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde C é o tempo de ciclo, em unidades de tempo.

A ociosidade é o tempo em que a estação está sem atividade produtiva (ociosa), devido à diferença entre o tempo de ciclo e o tempo da estação, calculado por Erel e Sarin (1998) como:

$$Ociosidade_j = C - S_j \quad \forall j = 1, \dots, K \quad (4)$$

Onde j indica a estação de trabalho, tal que $j = 1, \dots, K$; e S_j representa o tempo da estação j , em unidades de tempo.

A partir da ociosidade de cada estação, é possível calcular a ociosidade total da linha (EREL E SARIN, 1998):

$$Ociosidade Total = K.C - \sum_{i=1}^N t_i \quad (5)$$

O atraso do balanceamento, de acordo com Gerhardt (2005), indica o percentual de tempo que a linha permanece ociosa:

$$Atraso de balanceamento (\%) = \frac{K.C - \sum_{i=1}^N t_i}{K.C} \cdot 100 \quad (6)$$

Yin e Jian (2016) afirmam que um atraso de balanceamento menor ou igual a 10% é excelente; entre 10% e 20% é bom; e um atraso de balanceamento maior que 20% é considerado ruim.

O índice de suavidade mede a diferença entre o tempo total máximo das estações e o tempo de cada estação (RAO, 1971):

$$\text{Índice de suavidade} = \sqrt{\sum_{j=1}^K (S_{max} - S_j)^2} \quad (7)$$

Onde S_{max} é o tempo da estação com o maior tempo de execução.

De acordo com Ignall (1965), minimizar o tempo ocioso gera mais impacto sobre os custos de operação do que minimizar o índice de suavidade, portanto deve-se ter preferência sobre este indicador durante o balanceamento de linha.

Outro fato relevante no contexto de balanceamento de linhas é a viabilidade econômica das modificações sugeridas. Podemos avaliá-la por meio do uso do conceito de taxa de retorno do investimento (TRI), conhecida nas empresas como *payback*, que é definida por Gitman (2010) como:

$$TRI = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Lucro líquido}} \quad (8)$$

2.2.4 Classificação

Saif et al. (2014) propõem uma classificação para linha de produção baseada em seis tópicos: características da linha como (*layout*, variedade de produtos e fluxo) e características relacionadas ao balanceamento (abordagem do balanceamento, função objetivo e tempo de execução).

Quando tratamos de *layout* são apresentados quatro modelos: linhas em série, linhas em paralelo, linhas em U e linhas *two-sided*. Cada uma apresenta características específicas, de acordo com SAIF et al. (2014).

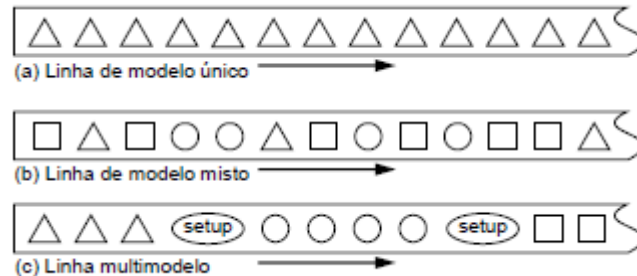
- **Linhas em série:** as estações ficam dispostas em série de modo que a estação gargalo determina o tempo de ciclo da linha. É o *layout* mais tradicional na indústria.
- **Linhas em paralelo:** divide a demanda entre as estações em paralelo ao longo da linha, sendo útil para operações específicas com grandes tempos de ciclo, diminuindo o tempo de ciclo médio da linha.
- **Linhas em U:** o produto pode passar mais de uma vez pelo operador, minimizando a necessidade de duplicar as estações e reduzindo o caminho percorrido para abastecimento da matéria-prima.
- **Linhas *two-sided*:** mais de um operador ou equipamento trabalham na mesma estação; usual em produtos pesados ou grandes.

A variedade de produtos foi dividida em três grupos, segundo (BECKER e SCHOLL, 2006):

- **Linhas de modelo único:** produção de um único produto, com constância nas tarefas e fluxo de produção.
- **Linhas de modelo misto:** produção simultânea de mais de um modelo de produto na linha, sendo possível haver variações no processo de fabricação de cada modelo, de modo que as estações de trabalho possuem um conjunto de atividades para cada modelo processado.
- **Linhas multimodelo:** produção de mais de um modelo na mesma linha, porém separado por lotes, com tempos de *set-up* consideráveis entre cada lote. Idealmente, a linha deve ser rebalanceada de acordo com o lote

produzido. A **Figura 6** a seguir exemplifica linhas de montagem de modelo único, modelo misto e multimodelo.

Figura 6 - Linhas de montagem modelo único, misto e multimodelo.



Fonte: Adaptado de Becker e Scholl (2006).

O fluxo da linha pode ser de dois tipos: linhas de passo contínuo e linhas de passo não contínuo (SAIF et al., 2014).

- **Linhas de passo contínuo:** a movimentação do produto é simultânea, sendo que o operador se desloca junto com a peça. Usualmente utiliza um sistema mecânico (esteira, em inglês, *conveyor*) para sua movimentação.
- **Linhas de passo não contínuo:** produto passa para próxima estação somente quando todas as tarefas da estação presente estiverem concluídas e a próxima estiver apta a receber produto. As linhas de passo não contínuo apresentam duas variantes: passo sincronizado e passo não sincronizado. A primeira é caracterizada pela transferência simultânea dos produtos entre todas as estações e a liberação ocorre quando os postos de trabalho concluem as atividades. Já nas linhas de passo não sincronizado, cada estação pode ter um tempo de ciclo diferente, o que pode gerar esperas para movimentar ou receber produto, problema que pode ser minimizado com o uso de *buffers* ou magazines que atuam como estoques temporários minimizando efeitos de desbalanceamento (LOPES et al., 2019).

2.3 Balanceamento de Linha

O balanceamento de linha, segundo Gaither e Frazier (2005), é a análise de linhas de produção que divide igualmente o trabalho entre as estações, com o objetivo de minimizar o número de estações necessárias.

Já Dessouky, Adiga e Park (1995) afirmam que o objetivo do balanceamento de linha é minimizar o tempo ocioso total das estações de trabalho, resultante de uma distribuição irregular de tarefas entre os postos.

A produção de um item necessita de tempo para sua execução, equipamentos e mão-de-obra específicos, além de restrições operacionais, de modo que exista uma relação de precedência entre as tarefas. Há, portanto, para um problema de balanceamento, três elementos básicos: diagrama de precedência com todas as tarefas, as estações de trabalho e operadores que compõe a linha e um objetivo a ser otimizado (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

A decisão de alocar de maneira otimizada as tarefas entre as estações de trabalho, tendo um objetivo especificado (e.g. minimizar o tempo de ciclo ou tempos ociosos) é definida como um problema de balanceamento de linha, ou ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*), que pode ser resolvido por meio de técnicas de Pesquisa Operacional (SCHOLL e BECKER, 2006).

2.3.1 Diagrama de Precedência

No processo produtivo pode haver diversas restrições, sendo definidas por Battaia e Dolgui (2013) como:

- Restrições de zona ou de zoneamento: Um grupo de tarefas deve ser realizado na mesma estação (ou em algumas estações específicas); ou, por outro lado, que certas tarefas não sejam alocadas juntas no mesmo posto de trabalho;
- Restrições de sincronismo: Objetivam alocar tarefas iguais (ou bastante similares) em estações paralelas;

- Restrições posicionais: Tarefas que só podem ser feitas em uma estação, normalmente por restrição de maquinário ou por habilidade do operador;
- Restrições de distância: Constituem um intervalo entre a execução de duas tarefas, podendo ser uma “distância” temporal ou em estações;
- Relações de precedência: Estabelecem quais tarefas devem preceder a execução de outras.

2.3.2 Função Objetivo

As duas funções objetivo mais comuns na literatura de balanceamento de linha são (BATTAÏA E DOLGUI, 2013): a minimização do tempo ocioso total para um dado tempo de ciclo (balanceamento Tipo I), que é equivalente também à minimização do número de estações para um dado tempo de ciclo; ou, a minimização do tempo de ciclo para um dado número de estações (balanceamento Tipo II).

No tratamento de casos práticos de balanceamento, contudo, algumas variantes de função objetivo podem ser levadas em conta de modo a melhor alinhar a resposta obtida com as considerações práticas desejadas. Suguinoshita e França (2017) listam como mais comum o emprego das seguintes funções de avaliação:

- Minimização do tempo de ciclo;
- Minimização do número de estações;
- Minimização da diferença de tempo entre estações ou operadores;
- Minimização do índice de suavidade;
- Minimização do custo de implementação;
- Maximização da eficiência do sistema.

Embora na prática a intenção seja de atingir vários objetivos, muitas vezes eles são conflitantes, portanto, ao melhorar um resultado possivelmente irá perder em outro, devendo então encontrar o equilíbrio necessário para a situação estudada (SAIF et al., 2014).

2.4 Pesquisa Operacional

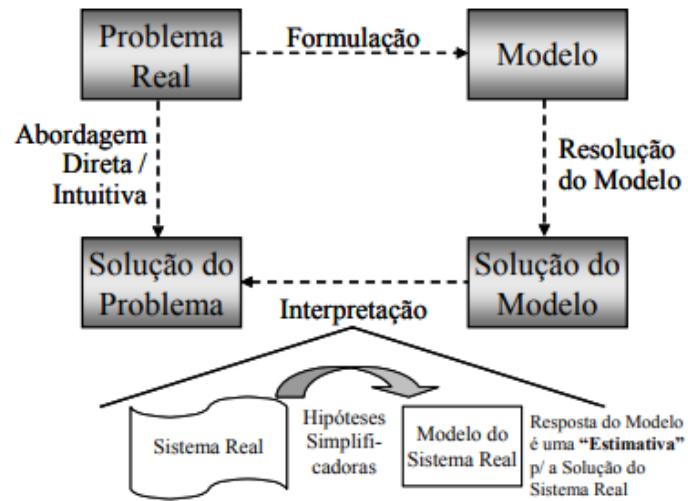
A Pesquisa Operacional (PO) surgiu na Segunda Guerra Mundial, onde um grupo de cientistas ingleses tinham o objetivo de encontrar a melhor alocação de recursos militares limitados. Com o fim da guerra, a PO começou a ser utilizada em outros campos com problemas complexos. Um ponto marcante é que essa ferramenta possibilita o processo de análise e decisão tendo por base a utilização de modelos, de modo que seja possível testar uma proposta antes de ser implementada. Logo, é uma ferramenta importante no processo de tomada de decisões (LISBOA, 2002).

Lisboa (2002) define que um modelo é uma representação de um sistema real, que pode já existir ou ser um projeto aguardando execução. É vital que os dados do modelo sejam fiéis à realidade, pois a confiabilidade da solução depende disto. Segundo Williams (1999) há três motivos para a elaboração de modelos em PO:

- i) O procedimento de construção de um modelo geralmente revela relacionamentos que não são evidentes para um grande número e pessoas, propiciando um melhor entendimento do objeto que está sendo modelado;
- ii) É usualmente possível analisar matematicamente um modelo, sugerindo novas tendências e procedimentos que, de outra forma, podem não ser aparentes;
- iii) Um modelo permite a realização de experimentos. Este é geralmente um procedimento não possível ou não desejável no objeto que está sendo modelado.

Diante de um problema real, é possível empregar uma abordagem direta ou intuitiva e obter uma solução (subótima) para o problema. Com a PO, um modelo é criado e solucionado, conforme ilustra a **Figura 7**.

Figura 7 - Conceitos essenciais de modelos.



Fonte: Magatão (2016).

Os modelos de Programação Matemática podem ser entendidos como um conjunto de equações, inequações e dependências lógicas, que correspondem a relacionamentos apresentados por estruturas reais.

- **Função objetivo:** função matemática que se deseja otimizar, considerando maximizá-la ou minimizá-la (PUCCINI, 1975);
- **Restrições:** relações que devem ser atendidas pelas variáveis, expressas na forma de um conjunto de equações ou inequações lineares (PUCCINI, 1975);
- **Variáveis de decisão e parâmetros:** Variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Já parâmetros são valores pré-fixados, dados de entrada (LISBOA, 2002).

A Programação Matemática engloba subáreas como: Programação Linear (PL) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

2.4.1 Programação Linear

É o caso em que as variáveis são contínuas e seu comportamento é linear, tanto nas restrições quanto na função objetivo.

A formulação linear só pode ser aplicada perante algumas hipóteses, definidas por Puccini e Pizzolato (1990) como:

- Certeza (Determinístico): os coeficientes utilizados no modelo são constantes no problema.
- Divisibilidade: as variáveis podem assumir valor fracionado.
- Aditividade: a soma do efeito total das variáveis é igual à soma dos efeitos individuais de cada variável.
- Proporcionalidade: Os valores variam proporcionalmente com uma variável do sistema, seguindo uma constante de proporcionalidade.

De acordo com Bradley, Hax e Magnanti (1977), o problema linear é formulado conforme definido em (9):

$$\begin{aligned} \mathbf{max} \quad & cx \\ \text{Ax} = & b \\ x \geq & 0 \end{aligned} \tag{9}$$

Alternativamente, as restrições podem ser representadas como:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &\leq b_i \quad (\forall i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j &\geq 0 \quad (\forall j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

O modelo proposto em Programação Linear tem três tipos de solução, segundo Bradley, Hax e Magnanti (1977):

- Solução finita ótima: caso mais comum, em que o modelo possui ao menos uma solução ótima finita, podendo ter múltiplas soluções ótimas.
- Modelo inviável: não há soluções que satisfaçam todas as restrições simultaneamente.
- Modelo com solução irrestrita: Modelo permite com que a função objetivo aumente ou decaia indefinidamente sem que nenhuma restrição seja violada.

Rao (2009), reitera que o método mais eficiente e popular para a solução de problemas de programação linear é o *Simplex* que, apesar de só ser capaz de fornecer soluções para problemas lineares com variáveis contínuas, é comumente incorporado a métodos de otimização discreta para auxiliar a solucionar problemas com variáveis não contínuas.

2.4.2 Programação Linear Inteira Mista

A Programação Linear Inteira Mista (PLIM) fornece a possibilidade de restringir algumas das variáveis do modelo a valores inteiros, sendo utilizada, portanto em trabalhos de balanceamento de linha, onde não faz sentido, por exemplo, obter um número fracionário de estações de trabalho. De acordo com Magatão (2005), sua formulação é dada por:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} c_j x_j + \sum_{i \in I} c_i y_i \\ \text{st.} \quad & \sum_{j \in J} a_{kj} x_j + \sum_{i \in I} a_{ki} y_i \{\rho\} b_k \quad \forall k \in K \\ & x_j \geq 0 \quad \forall j \in J \\ & y_i \in Z \quad \forall i \in I \end{aligned} \tag{10}$$

Onde x_j e y_i representam as variáveis de decisão inteiras; c_j e c_i representam os coeficientes de custo; a_{kj} representa os coeficientes de restrições das variáveis contínuas; a_{ki} representa os coeficientes de restrições das variáveis inteiras; J é o conjunto de variáveis contínuas; I é o conjunto de variáveis inteiras; K é o conjunto de restrições; ρ representa uma notação para relações matemáticas como: \leq , \geq , $=$.

2.4.3 Branch and bound

Um modelo com n variáveis que assumem valores binários possui um número de nós a serem percorridos em uma árvore de busca igual a $2^{n+1} - 1$, de acordo com Williams (1999).

A **Tabela 3** relaciona o número de variáveis binárias e o número de nós que podem surgir no processo de busca. Assim, problemas muito complexos e que possuem muitas variáveis discretas possuem um número muito elevado de possibilidades a serem exploradas. O método *branch-and-bound* (ramificar e podar),

contudo, elimina um grande número de nós por meio de considerações de factibilidade e otimalidade.

Tabela 3 - Número de nós de acordo com o número de variáveis.

Valor de n	Número de nós
3	15
4	31
8	511
16	131071
32	8,59e+9
64	36,9e+18
100	2,54e+30

Fonte: Magatão (2016).

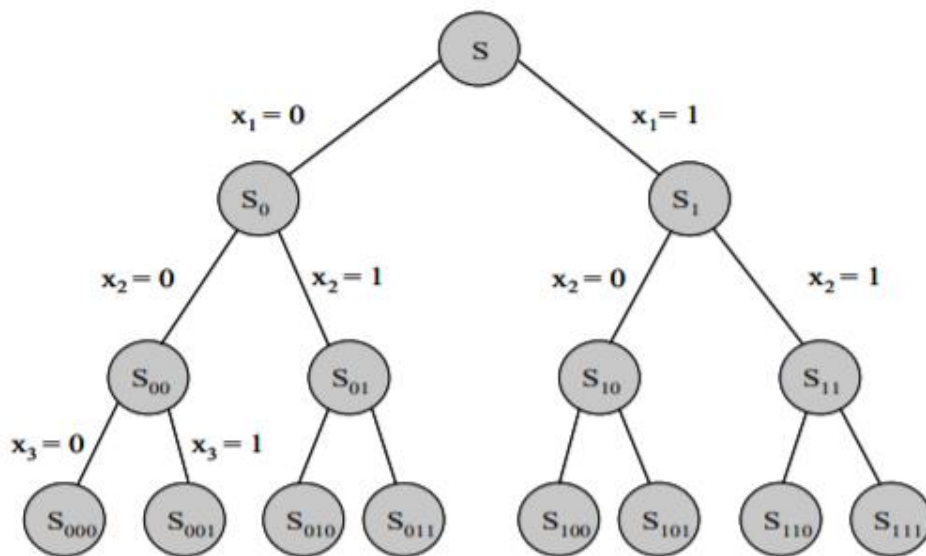
O *branch-and-bound* é comumente utilizado para a resolução de modelos com variáveis contínuas e discretas. A estratégia principal consiste em dividir o problema em subconjuntos menores, de modo a obter a solução do problema por meio da solução dos subproblemas (MAGATÃO, 2016).

Ainda de acordo com Magatão (2016), o primeiro passo do método é a solução do modelo em Programação Linear (PL), ou seja, relaxando-se as condições de integralidade e permitindo-se que as variáveis discretas assumam valores contínuos. Se a chamada “solução relaxada” for inteira, a solução obtida é ótima. Caso contrário, é necessário criar e percorrer uma árvore de busca, exemplificada na **Figura 8**.

De modo resumido, o método *branch-and-bound* engloba as seguintes etapas: a partir do problema relaxado, são criados outros dois subproblemas, adotando limites inteiros para uma variável. Cada um desses valores limites gera um novo modelo de PL (subproblema) a ser resolvido. Se as soluções dos subproblemas apresentarem valores inteiros, o método escolhe a opção com o maior valor da função objetivo, que respeita condições de integralidade, para ser armazenada (solução incumbente). Em caso de soluções ainda fracionárias, criam-se mais duas bifurcações no nó com variáveis fracionárias. O procedimento segue até serem encontradas soluções inteiras (ou infactíveis) na ramificação ou até quando o valor da função objetivo do subproblema em análise não conduzir a uma solução melhor do que a solução incumbente (procedimento de poda do nó). O método, explora a árvore de busca até encontrar a solução ótima e provar a otimalidade da mesma. Vale notar que a solução ótima sempre terá o valor da função objetivo menor (ou igual) ao valor obtido com a função relaxada no nó raiz (MAGATÃO, 2016).

No presente trabalho de conclusão de curso adota-se um *solver* comercial para a resolução dos modelos matemáticos gerados, no caso o CPLEX, imerso no ambiente de modelagem e otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*. O referido *solver* emprega, dentre outras técnicas de otimização, o *branch-and-bound* para a obtenção das respostas de balanceamento de linha.

Figura 8 – Exemplo de Árvore de busca.



Fonte: Magatão (2016).

2.4.4 Balanceamento de linha de montagem simples (SALBP)

Um problema de balanceamento de linha de montagem simples, do inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP), é um caso de ALBP como o nome já diz, simplificado. Boysen et al. (2007) detalham as hipóteses do modelo:

1. Produção em massa de um produto homogêneo.
2. Todas as tarefas são executadas de um modo pré-determinado.
3. Linha de montagem sincronizada com um tempo de ciclo comum a todas as estações.
4. Linha em série, sem estações em paralelo.
5. Sequência de tarefas sujeita a restrições de precedência.

6. Tempo de tarefa determinísticos, ou seja, sem variação entre ciclos.
7. Nenhuma restrição na alocação de tarefas além das restrições de precedência.
8. Uma tarefa não pode ser dividida entre duas ou mais estações.
9. Todas as estações são igualmente equipadas, tanto para equipamentos quanto referente a mão-de-obra).

Uma vez que o tempo de ciclo é o mesmo para toda a linha de montagem, as estações podem possuir tempos menores do que o tempo de ciclo, gerando um tempo ocioso onde nenhuma ação é realizada (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2007).

A literatura acerca de SALBP é bastante extensa, conforme relata o artigo de *review* de Battaia e Dolgui (2013). Contudo, as hipóteses simplificadoras de SALBP o tornam muito distante de uma realidade prática de balanceamento de linhas, fato pelo qual adota-se no presente TCC um modelo da literatura que busca minorar o *gap* com cenários práticos de balanceamento de linhas, descrito na seção 2.4.5 a seguir.

2.4.5 Balanceamento de linha de montagem com operador viajante (TWALBP)

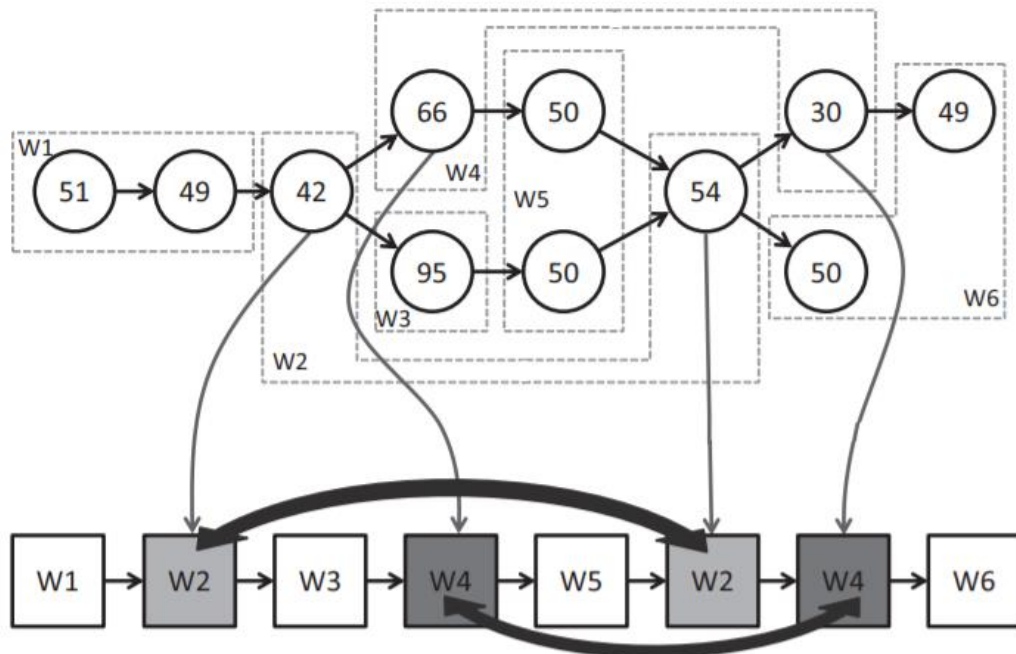
Nos casos em que um operador trabalha em mais do que uma estação de trabalho, é possível utilizar o balanceamento de linha de montagem com “operador viajante”, do inglês *Traveling Worker Assembly Line Balancing Problem* (TWALBP). Este modelo permite que o operador se movimente entre as estações, e a soma dos tempos das tarefas designadas ao operador e o deslocamento entre as estações deve ser menor do que o tempo de ciclo (SIKORA, LOPES e MAGATÃO, 2017).

Sua vantagem é que, embora existam relações de precedência entre as tarefas e estações, elas podem ser contornadas pela movimentação do operador, situação muito usual em linhas em U, onde um operador pode trabalhar no início e fim da linha de montagem, e mesmo com a movimentação (considerada um tempo improdutivo), gerar melhores balanceamentos do que se houvessem mais operadores.

A **Figura 9**, apresentada em Sikora, Lopes e Magatão (2017), exemplifica um balanceamento de linha cujo tempo de ciclo é 100 unidades de tempo, utilizando o TWALBP, onde existem 8 estações e 6 operadores. Utilizando o SALBP, seriam

necessários 7 operadores. O TWALBP permite que os operadores 2 e 4 se movimentem e trabalhem em múltiplas estações.

Figura 9 - Exemplo de balanceamento com TWALBP.



Fonte: Sikora, Lopes e Magatão (2017).

O TWALBP permite que tarefas sejam alocadas a estações fixas, e possibilitando também a movimentação dos operadores faz com que, diferentemente do SALBP, onde seriam necessários dois operadores para realizar tarefas fixas em duas estações, este modelo permite que um operador se movimente e faça as duas tarefas.

As principais características do modelo do TWALBP são descritas por Sikora, Lopes e Magatão (2017) como:

1. Restrição de alocação: É possível restringir tarefas a estações, operadores a estações, tarefas a operadores, restringir que certas tarefas obrigatoriamente devem ser feitas em sequência ou que não podem ser realizadas na mesma estação.
2. Tarefas comuns: Tarefas que requerem dois ou mais trabalhadores para serem realizadas.
3. Tarefas automáticas: Tarefas realizadas por máquinas, mas que necessitam de um operador para acionar o início do ciclo, havendo,

portanto, o deslocamento do operador até a estação e também o seu retorno. Não adiciona o tempo da tarefa da máquina ao tempo do operador.

4. Diferentes tempos de processamento por estação: Tarefas podem ter tempos de processamento diferente, como por exemplo uma atividade for realizada por um robô ou um operador.
5. Tempo fixo por estação: Tempos de *set-up* que devem ser adicionados independentemente do número de estações que são realizadas na estação. Esse tempo é adicionado ao tempo do operador.

O presente trabalho fez uso das funcionalidades propostas e implementadas no TWALBP. Assim, foi utilizado um modelo matemático em PLIM para a solução de um problema real de balanceamento de linha de montagem com características acima mencionadas.

A metodologia adotada para realizar o balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos para uma empresa situada em São José dos Pinhais - PR é apresentada no Capítulo 3 a seguir.

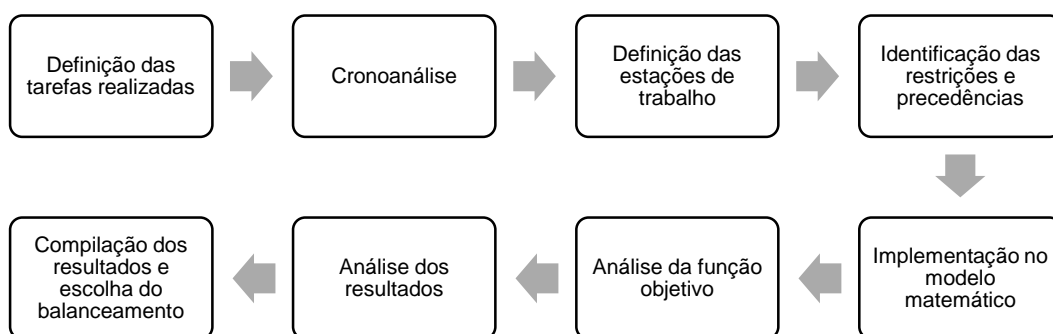
3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é baseada na proposta de Suguioshita e Magatão (2018), em artigo publicado no 50º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, onde foi obtida uma redução de 4,1% no tempo de ciclo de uma linha de montagem de motores. Em essência, a metodologia consiste em mapear as atividades realizadas na linha de montagem em análise, verificar as restrições e precedências, utilizar o modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista proposto por Sikora, Lopes e Magatão (2017) e propor um balanceamento com os resultados obtidos por meio do referido modelo. A seguir detalha-se a metodologia, aplicada ao presente estudo de caso.

3.1 Descrição do Método

A seguir estão descritos detalhadamente os oito passos utilizados na metodologia aplicada, onde os quatro primeiros são referentes ao processo da linha de montagem e suas particularidades, enquanto os quatro últimos são relacionados ao modelo matemático e seus resultados. O diagrama representado na **Figura 10** mostra os passos da metodologia.

Figura 10 - Metodologia aplicada.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.1.1 Definição das Tarefas Realizadas

O primeiro passo foi reunir e analisar todas as tarefas realizadas na montagem do painel de instrumentos avaliado. Este passo ocorreu por meio da verificação de instruções de trabalho fornecidas pela empresa e visualização *in loco* do processo de montagem na fábrica.

3.1.2 Cronoanálise

Esta etapa consistiu em realizar 10 medições de cada tarefa, conforme norma da empresa, para obter os tempos médios das tarefas. O Apêndice A, traz informações acerca das principais tarefas envolvidas no processo produtivo analisado.

Nesta fase de cronoanálise é de vital importância que a montagem do produto seja feita de acordo com o padrão da instrução de trabalho, que o operador seja treinado e que todas as máquinas estejam funcionando perfeitamente, para que o tempo medido seja representativo do processo.

Ressalta-se que o tempo utilizado neste trabalho será o tempo ponderado, considerando o número de modelos e o *mix* de produção (80% para Modelo 1 e 20% para Modelo 2).

3.1.3 Definição das Estações de Trabalho

Conforme mencionado na seção 1.1, este trabalho tem como objetivo o balanceamento da carga de trabalho dos operadores, uma vez que o número de operadores é inferior ao número de estações, e há a restrição de que algumas estações realizam somente uma atividade (estação automática).

Como podem existir operadores que trabalhem em mais de uma estação, a carga total de um colaborador será o somatório dos tempos das estações em que estiver atuando, além do tempo de deslocamento entre elas. Por essa razão, deve-se ter ciência da estação e do operador que estão realizando a operação. Há deslocamentos

de operadores que devem ser evitados no chão-de-fábrica, seja por distância percorrida excessiva, ou mesmo por limitações de deslocamento impostas pelo *layout* fabril.

3.1.4 Identificação das Restrições e Precedência

Após a definição das estações de trabalho, foram analisadas as restrições de montagem e precedência, dizendo em quais postos cada tarefa pode ser realizada e qual a sequência de tarefas que deve ser respeitada, seja por alguma especificação da montagem, como por exemplo a montagem de um componente após uma solda ou uma restrição física que impeça que a montagem não possa ocorrer em determinada estação de trabalho.

Assim, tendo por base a detalhada observação do processo produtivo, o conhecimento das instruções de trabalho e o auxílio de especialistas da empresa, procedeu-se a elaboração do diagrama de precedências, considerando todas as tarefas descritas na instrução de trabalho bem como as restrições tecnológicas que impediam/limitavam o deslocamento de (algumas) tarefas.

3.1.5 Implementação no Modelo

Com todas as tarefas e restrições do processo obtidas, os parâmetros são fornecidos como dados de entrada para o modelo matemático de otimização. Este modelo matemático foi apresentado por Sikora, Lopes e Magatão (2017). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modelo matemático já implementado no ambiente IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.8. Foi definido que o método de busca deve ser utilizado até obter-se a otimalidade da solução ou parar o processo de solução em um tempo limite de 120 minutos, mesmo tempo utilizado no artigo de Suguinoshita e Magatão (2018).

3.1.6 Análise da Função Objetivo

O próximo passo foi analisar a função objetivo a fim de verificar quais termos trazem os melhores resultados para o caso estudado.

O primeiro termo (CT) considerado foi a minimização do tempo de ciclo.

O segundo termo ($MaxDifW$) foi a minimização da diferença entre o tempo dos trabalhadores e o tempo médio, conforme detalhado na Equação (11).

$$MaxDifW = \sum_{w=1}^M S_w - S_{wmed} \quad (11)$$

Onde S_w indica o tempo do operador, tal que $w = 1, \dots, M$; M seja o número de operadores e S_{wmed} representa o tempo médio dos operadores em unidades de tempo.

Com os dois termos, foram consideradas duas opções de função objetivo. Em particular, na segunda função há a multiplicação de CT por um fator de ponderação (igual a 100), indicando que a minimização de CT é prioritária em relação à minimização de $MaxDifW$:

1. $\text{Min } f(x) = CT$;
2. $\text{Min } f(x) = 100 * CT + MaxDifW$.

Os indicadores para cada função se encontram na **Tabela 4**. Estes indicadores foram obtidos a partir da execução do modelo em uma configuração padrão da linha, com 6 operadores, fato que será detalhado *a posteriori* no Capítulo 4. O objetivo neste momento é apenas realizar um projeto de experimento, identificando a função objetivo adequada ao estudo de caso.

Tabela 4 - Indicadores para as diferentes funções objetivo.

Função Objetivo	Tempo de Ciclo (ut)	Eficiência (%)	Ociosidade Total (ut)	Atraso de balanceamento (%)	Índice de suavidade
$f(x) = CT$	288,96	90,6	163,8	9,4	107,1
$f(x) = 100CT + MaxDifW$	288,96	90,6	163,8	9,4	103,6

Fonte: Autoria própria (2019).

Os indicadores obtidos são iguais para todas as características avaliadas, exceto o índice de suavidade. Ao multiplicar o CT por 100, o objetivo é encontrar o menor tempo de ciclo matematicamente possível, mas a adição do termo $MaxDifW$ faz com

que também seja encontrada uma maneira de balancear a carga entre os operadores, sem comprometer o tempo de ciclo da linha. Por esta razão, a função $f(x) = 100CT + MaxDifW$ foi escolhida para a realização dos estudos de caso.

3.1.7 Análise dos Resultados

Os resultados do modelo matemático devem ser analisados pelo especialista da linha que irá confirmar a viabilidade da solução e a possibilidade da aplicação prática do balanceamento. Se surgirem novas restrições ou mudanças de parâmetros, o modelo será novamente resolvido a fim de obter uma nova solução.

Serão realizados estudos de caso com o objetivo de encontrar a melhor solução para o problema proposto. Contudo, há possibilidade de avaliação de diferentes cenários de funcionamento, visando o estudo de soluções da linha mediante condições operacionais distintas como, por exemplo, variação do número de operadores disponíveis.

3.1.8 Compilação dos Resultados e Escolha do Balanceamento

Após a validação dos resultados e levantamento dos custos de implementação, os resultados serão compilados e apresentados para a empresa, para que esta possa escolher a melhor alternativa, levando em conta os indicadores obtidos e a viabilidade econômica.

3.2 Justificativa da Metodologia Aplicada

A metodologia utilizada neste projeto, que utilizava a solução de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista como base, foi vista em diversos trabalhos de conclusão de curso como, Suguioshita e França (2017), Leal e Grespan

(2018) que obteve um aumento de 6,5% na eficiência, e Luduwig e Mello (2019) cujo resultado foi uma melhora de 12,8% no tempo de ciclo, além do artigo de Suguinoshita e Magatão (2018) publicado no 50º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, que obteve redução de 4,1% no tempo de ciclo. O modelo matemático desenvolvido por Sikora, Lopes e Magatão (2017) é capaz melhorar significativamente o balanceamento de linha quando aplicado corretamente, isto é, que os dados estejam alinhados com a realidade e o ambiente virtual de modelagem represente a linha real em análise.

A empresa em questão possui um setor responsável por realizar o balanceamento de linha, além de atividades internas onde colaboradores de diversos setores da empresa (engenharia, produção, qualidade, segurança, recursos humanos) têm um objetivo comum, neste caso o balanceamento de linha ou a diminuição do número de operadores. Entretanto, todo esse trabalho é feito na empresa com base puramente na experiência dos profissionais, sem nunca utilizar um *software* e, portanto, se tornando muito mais difícil atingir a solução ótima do sistema, que pode ser obtida com o auxílio de um procedimento quantitativo baseado em PLIM.

O Capítulo 4 a seguir detalha os resultados obtidos por meio da metodologia apresentada no presente capítulo. Desta forma, soluções matematicamente otimizadas para o problema real de balanceamento de uma linha de montagem de painéis são evidenciadas.

4 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta resultados relativos a cinco estudos de caso realizados para o problema de balanceamento na linha de montagem de painéis automotivos (seção 4.2). Para a realização dos referidos estudos, o conhecimento do diagrama de precedência entre tarefas, apresentado na seção 4.1, foi de fundamental importância. Também é realizado neste capítulo uma análise de tomada de decisão (seção 4.3), tendo por base os estudos desenvolvidos.

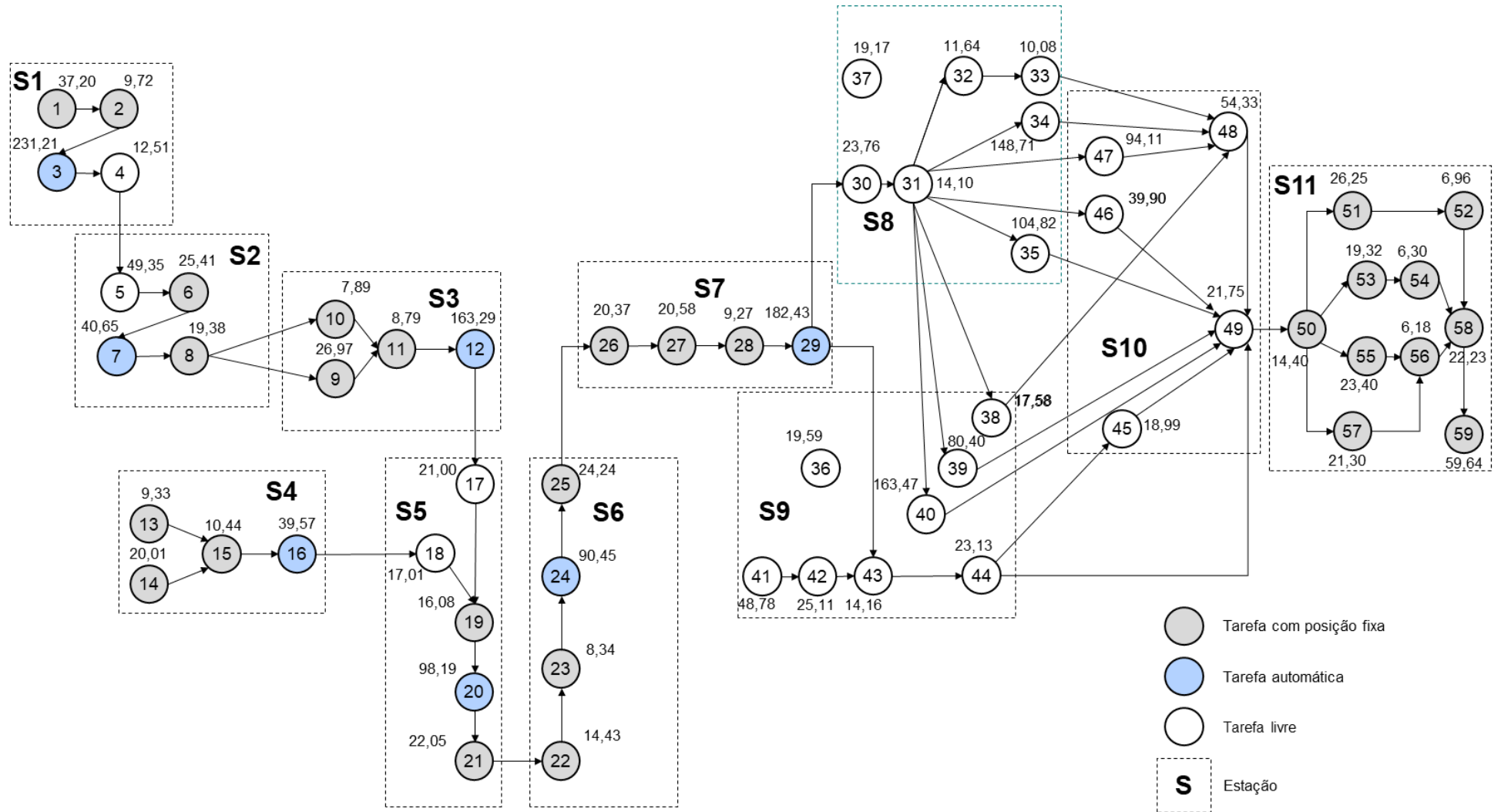
Os resultados computacionais foram obtidos com o uso do ambiente de modelagem e resolução computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.8.0. Utilizou-se um computador com processador Core i5-8265U (1.80 GHz) e 8 GB de memória RAM. O tempo de execução máximo do modelo foi estabelecido como 120 minutos.

4.1 Diagrama de Precedências

A **Figura 11** traz o diagrama de precedência para o problema em análise. Nele estão representadas as tarefas livres para serem realocadas (branco), as tarefas fixas em uma estação de trabalho (cinza) e as tarefas automáticas (azul). Os tempos de execução das tarefas se encontram ao redor de cada tarefa. As linhas tracejadas indicam a estação de trabalho em que atualmente as tarefas são alocadas.

Nesta linha de montagem há uma grande dependência direta da execução de tarefas para a movimentação de peças entre as estações 1 (S1) a 7 (S7), onde se encontra a última máquina de solda. Por essa razão, há uma precedência direta entre várias das atividades entre S1 a S7, impedindo que haja muita liberdade para realocar as referidas tarefas.

Figura 11 - Diagrama de precedência atual.



Fonte: Autoria própria (2019).

A linha começa com a etapa de fragilização (estação 1) do painel superior, que ao sair vai para a máquina de *punching* (estação 2) para o corte da moldura do suporte para celular (SPC). Em seguida parte para a primeira solda ultrassom (estação 3), que adiciona o botão de luz e o *cluster*. O reforço do *airbag* é montado em paralelo (estação 4). Os subprodutos das estações 3 e 4 vão para a solda vibratória (estação 5), onde são unidas. O material então vai para a segunda solda vibratória e é unida com o canal de ar (estação 6). Por fim, vai até a segunda solda ultrassom, onde todo esse subproduto do painel superior é soldado com o painel inferior injetado (estação 7), caracterizado pela atividade 29.

Após a atividade 29, começam as montagens de cliques e demais componentes, que são itens capazes de serem alocados em diferentes estações. As estações 8, 9 e 10 realizam todas essas montagens, além do retrabalho. O sistema *Light Guide System*, que é um sistema de realidade aumentada que fornece instruções para o operador, é utilizado. A estação 11 fica responsável pela inspeção final e por levar o produto acabado até o vagão com peças prontas.

As atividades de montagem de cliques e porcas (34, 35, 39, 40), janelas de ar esquerda e direita (32 e 33), moldura SPC (38), parafuso (46) e retrabalho (47) requerem que o painel esteja em uma bancada de montagem (31).

As atividades 41 e 42 de montagem do duto de ar central e dos cliques do mesmo podem ser realizadas em qualquer estação, e a montagem do duto de ar central no painel superior (43) pode ser realizada tanto na máquina de solda ultrassom 2 (estação 7) quanto nas bancadas de montagem (estações 8, 9 e 10). A montagem do duto de ar esquerdo e direito (44 e 45) só pode ser realizada após a atividade 43, por questões estruturais.

Com as montagens concluídas, a peça passa pelo *Light Guide System* e é levada para a bancada de estação final (48 e 49).

Na estação 11, o operador faz a leitura do código de barras da peça e aciona o *start* (50), em seguida um sistema de visão utilizando câmera faz a inspeção da presença dos cliques, entretanto é necessário o giro da peça para a inspeção completa, de modo que as atividades 52, 54 e 56 são os giros feitos pelo operador, e as atividades 51, 53, 55 e 57 são as inspeções pelo sistema de visão.

As atividades 51, 53, 55 e 57 de inspeção final seriam atividades automáticas, mas como o tempo de ciclo destas é demasiadamente curto, o operador não conseguiria utilizar esse tempo para desenvolver outras atividades. Logo, no contexto de balanceamento em análise, foi considerada uma abordagem conservadora em que o operador permanece acompanhando estas atividades durante sua execução. Em termos operacionais, é como se a tarefa também fosse atrelada ao operador que realiza o *start* da mesma.

Por fim, o operador cola a etiqueta no produto (58) e movimenta até o vagão de produtos acabados (59).

4.2 Balanceamento de Linha

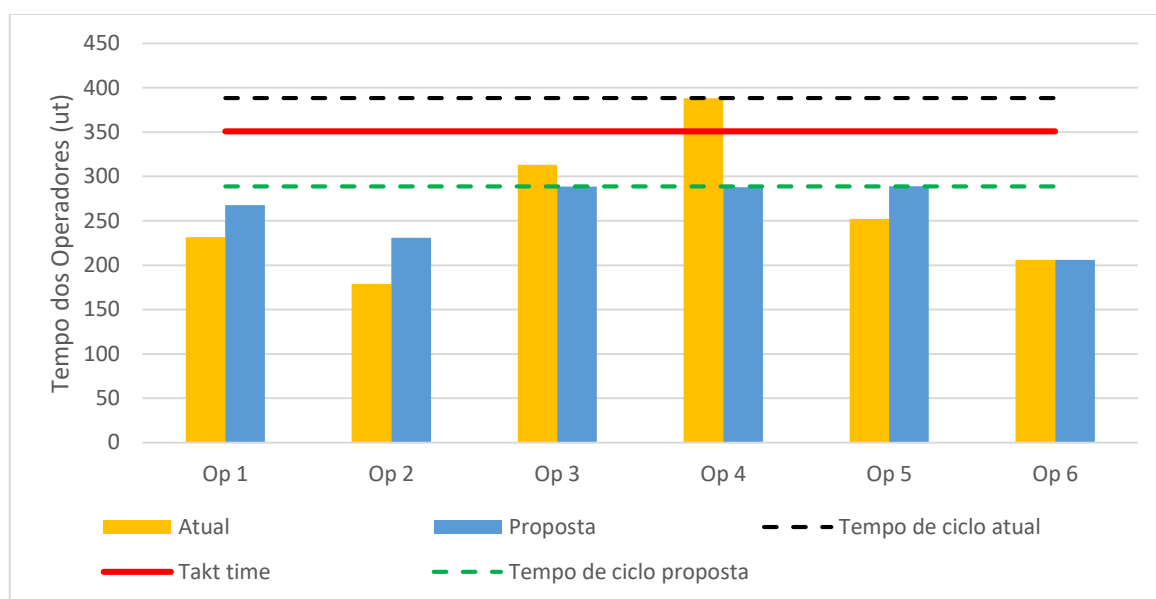
Nesta seção são apresentados todos os estudos de casos realizados, considerando o tempo ponderado dos modelos. As descrições das atividades, assim como os tempos, se encontram no Apêndice A.

4.2.1 Estudo de Caso 1 – 6 Operadores

O primeiro estudo de caso considerou o balanceamento da carga de trabalho com o número atual de operadores, com o objetivo de balancear a carga de trabalho e passar a operar com o tempo de ciclo abaixo do *takt time*. O modelo matemático apresentou 623 variáveis, sendo 602 binárias, e 1557 restrições. O resultado é mostrado na **Figura 12**.

Neste estudo existiram 12 mudanças de atividade, que podem ser vistas na **Tabela 5**. A maior parte das mudanças se referem somente ao operador que irá realizar a atividade e, portanto, será necessário somente atualizar a sua instrução de trabalho; as outras mudanças envolvem a realocação do estoque de peças, mas por se tratar de uma distância curta e pequenas quantidades de caixas não há nenhum investimento.

Figura 12 - Tempo de ciclo atual e proposta 1.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 5 - Mudanças proposta 1.

Tarefa	Descrição	Estação Atual	Estação Proposta	Plano de ação	Investimento
4	Retirar da máquina e levar até próxima estação	1	2	Atualizar instrução de trabalho	-
8	Retirar da máquina e levar até próxima estação	2	3	Atualizar instrução de trabalho	-
17	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	3	Atualizar instrução de trabalho	-
18	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	5	Atualizar instrução de trabalho	-
21	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	6	Atualizar instrução de trabalho	-
35	Montar 15 cliques Y	8	9	Mover estoque de cliques	-
37	Retirar da bancada 1 e levar até a bancada 2	8	10	Atualizar instrução de trabalho	-
38	Montar moldura SPC	9	10	Mover estoque de molduras	-
39	Montar 11 cliques Y	9	8	Mover estoque de cliques	-
41	Montar duto de ar central	9	4	Mover estoque de dutos	-
42	Inserir cliques no duto de ar central	9	4	Atualizar instrução de trabalho	-
43	Montar duto de ar central no painel	9	7	Atualizar instrução de trabalho	-

Fonte: Autoria própria (2019).

A **Tabela 6** apresenta os indicadores de acordo com a carga dos operadores. Os valores foram obtidos a partir das expressões definidas na seção 2.2.3. Conforme salientado na seção 1.1, o objetivo deste trabalho é o balanceamento dos operadores, portanto os indicadores são calculados com base no número de operadores e seus tempos, e não com base no tempo das estações. Evidencia-se que a proposta cumpre com o objetivo de diminuir o tempo de ciclo e balancear a linha.

Tabela 6 - Indicadores atuais e proposta 1.

Modelo	Tempo de Ciclo (ut)	Eficiência (%)	Utilização (%)	Ociosidade Total (ut)	Atraso de balanceamento (%)	Índice de suavidade
Atual	388,26	67,4	74,5	759,6	32,6	354,7
Proposta 1	288,96	90,6	74,5	163,8	9,4	103,6

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a comparação dos resultados da proposta com os indicadores atuais, foi utilizada a equação (12):

$$\text{Melhora relativa da proposta (\%)} = \left| \frac{\text{Indicador atual} - \text{Indicador proposta}}{\text{Indicador atual}} \right| \quad (12)$$

Houve uma redução de 25,6% no tempo de ciclo, um aumento de 34,3% na eficiência, melhora de 78,4% na ociosidade total, redução de 71,0% no atraso de balanceamento e uma melhora de 70,8% no índice de suavidade.

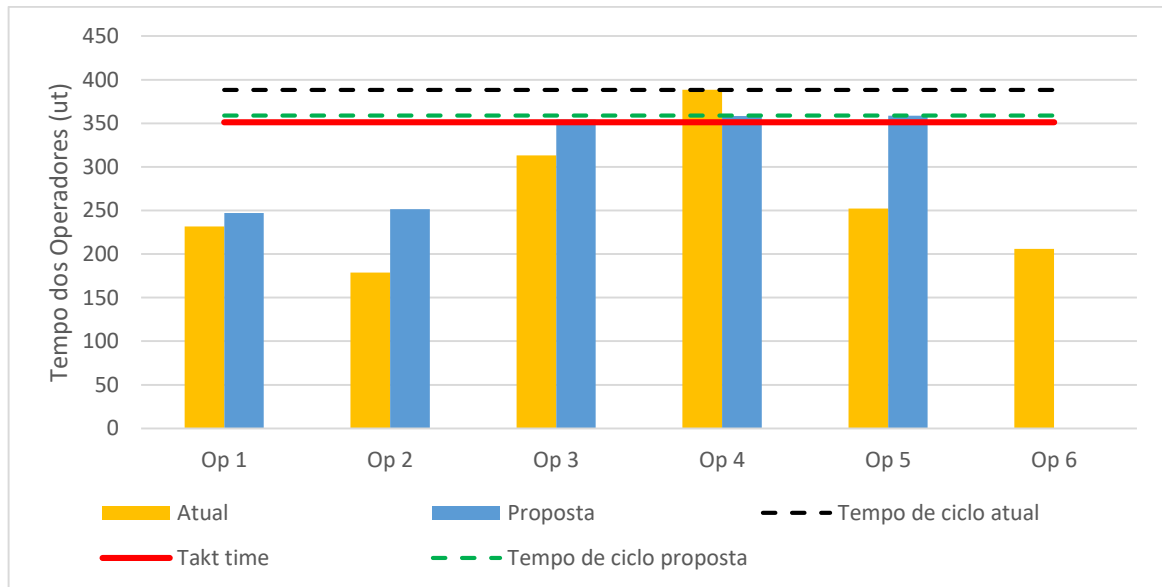
Por meio da equação (2), seção 2.2.3, percebe-se que o número mínimo de operadores nesta linha é de 5, comprovado pela utilização de 74,5% da linha, havendo, portanto, um potencial de melhora neste aspecto, motivo pelo qual foi realizado o estudo de caso 2.

4.2.2 Estudo de Caso 2 – 5 Operadores

O segundo estudo de caso teve o objetivo de reduzir o número de operadores para 5, tendo em vista que a utilização da linha estava baixa. O modelo matemático

apresentou 558 variáveis, sendo 538 binárias, e 1377 restrições. A **Figura 13** a seguir ilustra os resultados obtidos.

Figura 13 - Tempo de ciclo atual e proposta 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

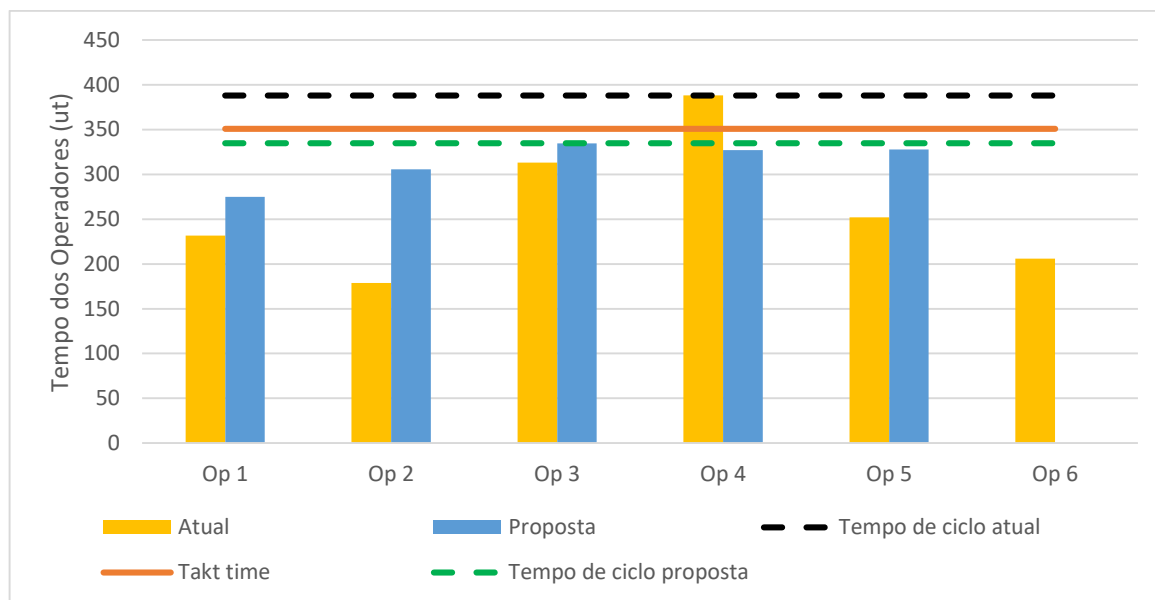
Nesse caso o tempo de ciclo, embora melhor do que a situação atual, ficou ligeiramente superior ao *takt time* (2%), o que dificulta a sua aplicação. Entretanto, é clara a diferença de carga entre os operadores 1 e 2 para os operadores 3, 4 e 5, o que levanta a questão de mudar a restrição de equipamentos para que esses operadores possam realizar montagens e balancear mais a linha. Este foi o elemento motivador para a realização do estudo de caso 3.

4.2.3 Estudo de Caso 3 – 5 Operadores com Mudança de *Layout*

Para diminuir a carga dos operadores 3, 4 e 5, viu-se uma oportunidade de permitir que os operadores 1 e 2 realizem algumas atividades de montagem. Em contato com o especialista da linha, verificou-se que seria possível mudar a restrição física da linha para que algumas montagens sejam realizadas em outras estações, reduzindo o número de limitações práticas neste contexto. O modelo matemático para

o presente estudo apresentou 342 variáveis, sendo 322 binárias, e 882 restrições. A **Figura 14** a seguir concatena os resultados obtidos.

Figura 14 - Tempo de ciclo atual e proposta 3.



Fonte: Autoria própria (2019).

Neste caso o tempo de ciclo respeita o *takt time*, tornando-se uma solução viável para o problema de balanceamento.

A **Tabela 7** mostra as 18 atividades que sofreram mudanças de estação. A grande maioria (89%) se refere somente a mudanças pequenas, como a alteração do operador que retira uma peça da máquina ou a mudança da posição do estoque de alimentação. Entretanto, 2 atividades de montagem dos dutos de ar esquerdo e direito requerem que a bancada da estação 7 seja readequada. Para isso seria necessário adaptar uma bancada em frente da estação 7, com o objetivo de deixar a posição de montagem do painel de instrumentos ergonomicamente confortável para o operador, o que teria um custo total de, aproximadamente, \$17.500,00 (valor dado em unidades monetárias, \$).

Tabela 7 - Mudanças proposta 3.

Tarefa	Descrição	Estação Atual	Estação Proposta	Plano de ação	Investimento
17	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	3	Atualizar instrução de trabalho	-
18	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	4	Atualizar instrução de trabalho	-
21	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	6	Atualizar instrução de trabalho	-
34	Montar 20 cliques X	8	9	Mover estoque de cliques	-
35	Montar 15 cliques Y	8	9	Mover estoque de cliques	-
36	Retirar da bancada 2 e levar até a bancada 3	9	10	Atualizar instrução de trabalho	-
37	Retirar da bancada 1 e levar até a bancada 2	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
38	Montar moldura SPC	9	8	Mover estoque de molduras	-
39	Montar 11 cliques Y	9	10	Mover estoque de cliques	-
41	Montar duto de ar central	9	4	Mover estoque de dutos	-
42	Inserir cliques no duto de ar central	9	4	Atualizar instrução de trabalho	-
43	Montar duto de ar central no painel	9	7	Atualizar instrução de trabalho	-
44	Montar duto de ar esquerdo	10	7	Adaptação da bancada da máquina	\$ 17.500,00 unidades monetárias
45	Montar duto de ar direito	10	7	Adaptação da bancada da máquina	
46	Montar parafusos	10	7	Movimentar parafusadeira	-
47	Retrabalho	10	8	Mover equipamento de retrabalho	-
48	<i>Light Guide System</i>	10	9	Mover sistema LGS	-

Fonte: Autoria própria (2019).

A retirada de um operador por turno é um resultado significativo economicamente, uma vez que representa uma economia de \$132.000,00 anuais para a empresa. Os indicadores também melhoraram se comparados com a situação atual, como pode ser visto na **Tabela 8**.

O tempo de ciclo proposto foi 13,8% abaixo do atual, a eficiência aumentou em 39,1%, o tempo ocioso diminuiu em 86,3%, o atraso de balanceamento melhorou em

81,0% e por fim o índice de suavidade teve uma melhora de 8,1%. O *payback* calculado por meio da equação (8) estima um retorno em 0,13 anos.

Tabela 8 - Indicadores atuais e proposta 3.

Modelo	Tempo de Ciclo (ut)	Eficiência (%)	Utilização (%)	Ociosidade Total (ut)	Atraso de balanceamento (%)	Índice de suavidade
Atual	388,26	67,4	74,5	759,6	32,6	354,7
Proposta 3	334,74	93,8	89,5	103,8	6,2	67,4

Fonte: Autoria própria (2019).

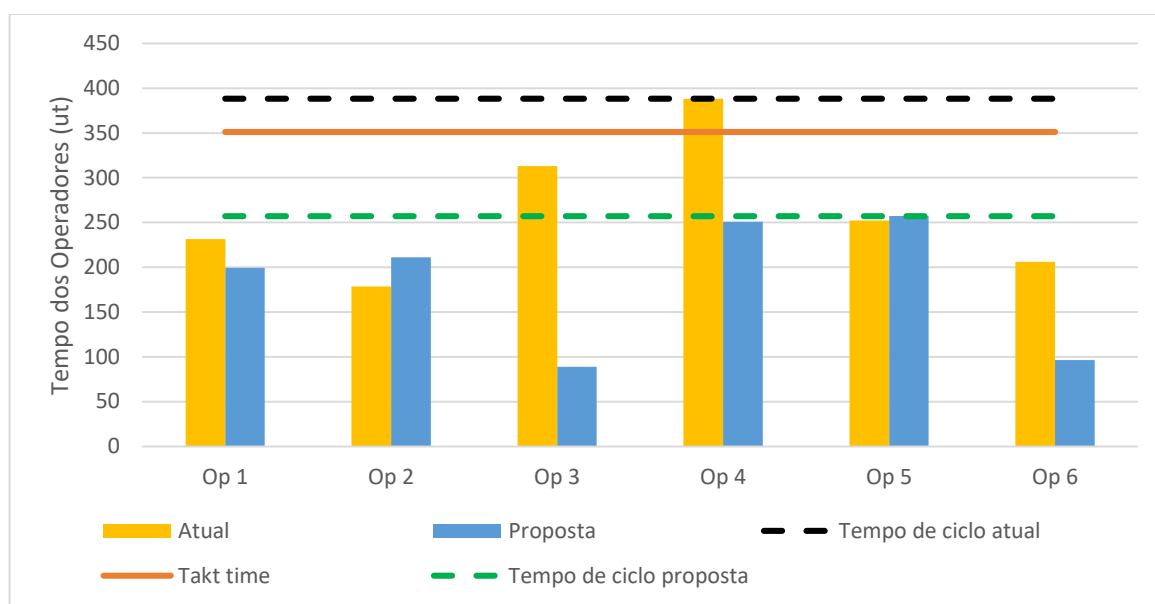
4.2.4 Estudo de Caso 4 – Robô e Inspeção Automática com 6 Operadores

O estudo de caso 4 foi realizado tendo em vista dois pedidos específicos da direção da planta aonde esse trabalho foi realizado:

- 1) Utilizar um robô para a montagem de cliques, uma vez que essa tecnologia é presente em outras plantas da companhia. A empresa tem o desejo de investir nessa linha que é nova e cuja demanda irá aumentar em 2020, fazendo com que ela passe a trabalhar em 3 turnos.
- 2) Outra melhoria requisitada foi a da automação do giro da inspeção final através de um servomotor, por ser uma automação simples e que pode liberar uma enorme carga de trabalho e a empresa integradora do robô já fará o mesmo em outra bancada.

Portanto o presente estudo de caso verificou como ficaria o balanceamento utilizando um robô que tem capacidade de montar 46 cliques em 255 unidades de tempo e uma bancada de inspeção final automática com um tempo de 109,7 unidades de tempo. O modelo matemático apresentou 315 variáveis, sendo 294 binárias, e 797 restrições. A **Figura 15** a seguir concatena os resultados obtidos.

Figura 15 - Tempo de ciclo atual e proposta 4.



Fonte: Autoria própria (2019).

As 16 tarefas que passaram por mudanças não requerem nenhum investimento para se adequarem às novas estações, somente a mudança dos estoques das peças montadas e a atualização da instrução de trabalho, conforme relatado na **Tabela 9**.

Tabela 9 - Mudanças proposta 4 (Continua).

Tarefa	Descrição	Estação Atual	Estação Proposta	Plano de ação	Investimento
4	Retirar da máquina e levar até próxima estação	1	2	Atualizar instrução de trabalho	-
17	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	3	Atualizar instrução de trabalho	-
25	Retirar da máquina e levar até próxima estação	6	7	Atualizar instrução de trabalho	-
32	Montar janela de ar esquerda	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
33	Montar janela de ar direita	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
36	Retirar da bancada 2 e levar até a bancada 3	9	10	Atualizar instrução de trabalho	-
37	Retirar da bancada 1 e levar até a bancada 2	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
38	Montar moldura SPC	9	10	Mover estoque de molduras	-
39	Montar 11 cliques Y	9	10	Mover estoque de cliques	-
40	Montar 21 porcas Z	9	10	Mover estoque de porcas	-

Tabela 9 - Mudanças proposta 4 (Continuação).

41	Montar duto de ar central	9	8	Mover estoque de dutos	-
42	Inserir cliques no duto de ar central	9	8	Atualizar instrução de trabalho	-
44	Montar duto de ar esquerdo	10	9	Atualizar instrução de trabalho	-
45	Montar duto de ar direito	10	9	Atualizar instrução de trabalho	-
46	Montar parafusos	10	7	Atualizar instrução de trabalho	-
47	Retrabalho	10	9	Mover equipamento de retrabalho	-

Fonte: Autoria própria (2019).

O tempo de ciclo proposto caiu drasticamente se comparado com o tempo de ciclo atual (de 388,26 ut para 257,13 ut), entretanto o desbalanceamento da linha também fica evidente. O operador 3 ficaria responsável somente pelas atividades de retirar o PI da estação 7, transferir para a estação 8 e montar o duto de ar central. Já o operador 6 faria a leitura do código de barras da peça, colaria a etiqueta no produto final e movimentaria até o vagão de produtos acabados.

Os investimentos para essa proposta seriam de \$382.000,00 para o robô de montagem de cliques e \$33.500,00 para a automação da bancada de inspeção final. Os indicadores obtidos são sumarizados na **Tabela 10**.

Tabela 10 - Indicadores atuais e proposta 4.

Modelo	Tempo de Ciclo (ut)	Eficiência (%)	Utilização (%)	Ociosidade Total (ut)	Atraso de balanceamento (%)	Índice de suavidade
Atual	388,26	67,4	74,5	759,6	32,6	354,7
Proposta 4	257,13	71,5	52,4	439,3	28,5	244,3

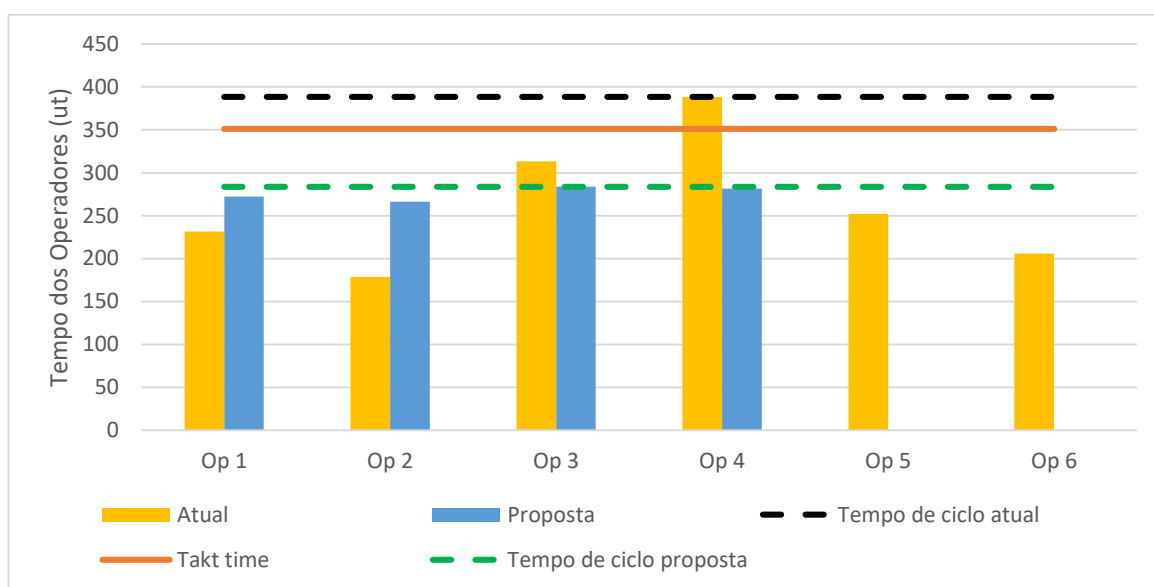
Fonte: Autoria própria (2019).

Embora quase todos os indicadores estejam melhores do que a situação atual, a realização de um investimento de \$415.500,00 é fato que, no atual momento, inviabilizou a proposta para a empresa. Entretanto, a utilização da linha de 52,4% abre a possibilidade de reduzir o número de operadores e ter um ganho monetário direto, ensejando a realização do estudo de caso 5.

4.2.5 Estudo de Caso 5 – Robô e Inspeção Automática com 4 Operadores

O último estudo de caso abordado trata dos pedidos realizados pela diretoria de possuir um robô para montagem de cliques e da automação da inspeção final do painel de instrumentos, assim como o estudo de caso 4, porém reduzindo o número de operadores. O modelo matemático apresentou 392 variáveis, sendo 373 binárias, e 968 restrições. A **Figura 16** a seguir ilustra os resultados obtidos.

Figura 16 - Tempo de ciclo atual e proposta 5.



Fonte: Autoria própria (2019).

As 16 tarefas que passaram por mudanças não requerem nenhum investimento para se adequarem às novas estações, somente a mudança dos estoques das peças montadas e a atualização da instrução de trabalho, conforme detalhado na **Tabela 11**.

Tabela 11 - Mudanças proposta 5.

Tarefa	Descrição	Estação Atual	Estação Proposta	Plano de ação	Investimento
4	Retirar da máquina e levar até próxima estação	1	2	Atualizar instrução de trabalho	-
17	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	3	Atualizar instrução de trabalho	-
18	Retirar da máquina e levar até próxima estação	5	4	Atualizar instrução de trabalho	-
32	Montar janela de ar esquerda	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
33	Montar janela de ar direita	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
37	Retirar da bancada 1 e levar até a bancada 2	8	9	Atualizar instrução de trabalho	-
39	Montar 11 cliques Y	9	8	Mover estoque de cliques	-
40	Montar 21 porcas Z	9	10	Mover estoque de porcas	-
41	Montar duto de ar central	9	4	Mover estoque de dutos	-
42	Inserir cliques no duto de ar central	9	4	Atualizar instrução de trabalho	-
43	Montar duto de ar central no painel	9	7	Mover estoque de dutos	-
44	Montar duto de ar esquerdo	10	9	Atualizar instrução de trabalho	-
45	Montar duto de ar direto	10	9	Mover estoque de dutos	-
46	Montar parafusos	10	7	Movimentar parafusadeira	-
47	Retrabalho	10	9	Mover equipamento de retrabalho	-
48	<i>Light Guide System</i>	10	9	Mover sistema LGS	-

Fonte: Autoria própria (2019).

Essa proposta gerou um *saving* de 2 operadores por turno, o que em 2020 representará uma economia de \$396.000,00 à empresa. Tendo em vista o investimento de \$415.500,00, o *payback* seria de 1,05 anos. Os indicadores dessa proposta se encontram na **Tabela 12**.

Tabela 12 - Indicadores atuais e proposta 5.

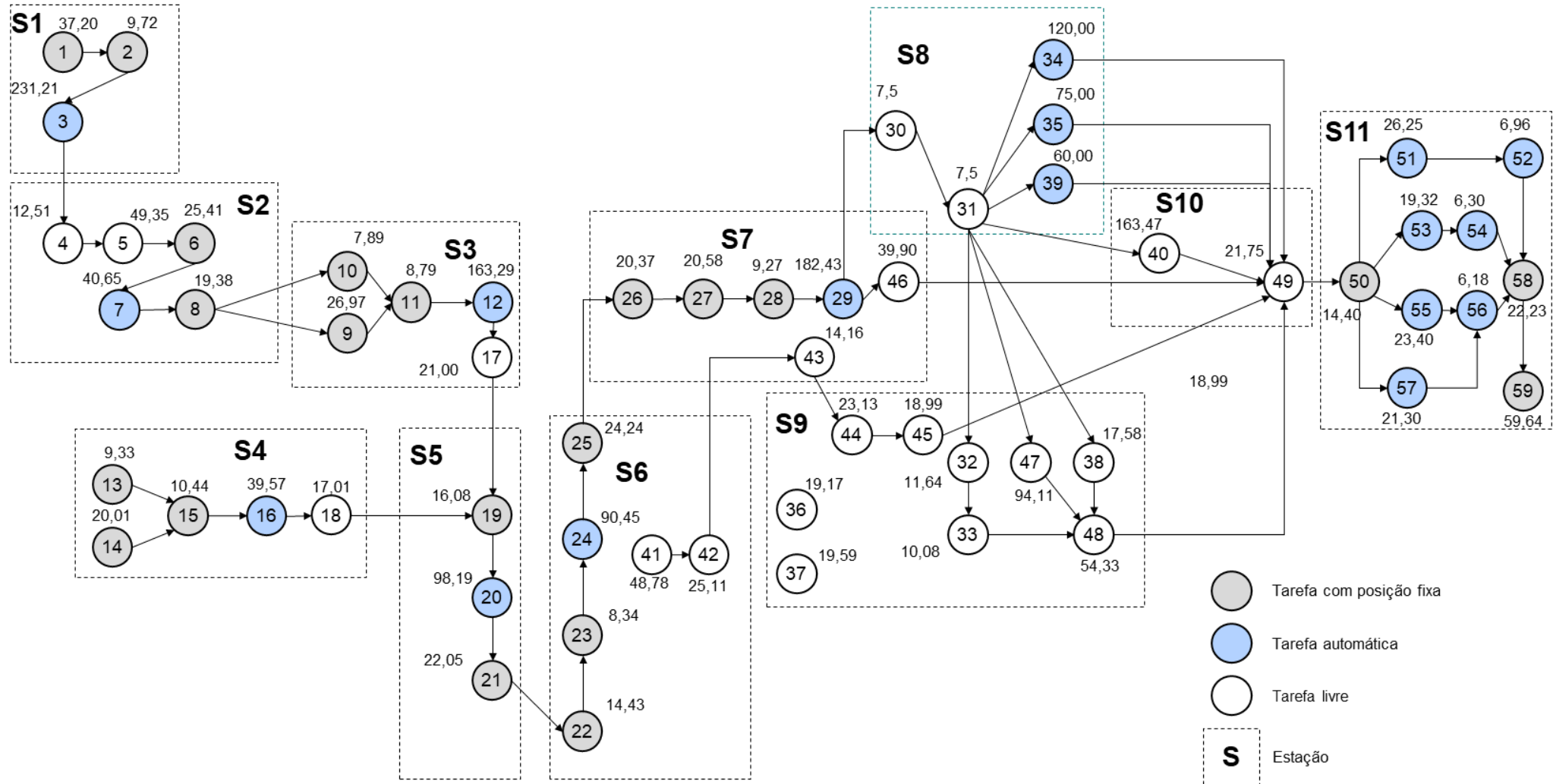
Modelo	Tempo de Ciclo (ut)	Eficiência (%)	Utilização (%)	Ociosidade Total (ut)	Atraso de balanceamento (%)	Índice de suavidade
Atual	388,26	67,4	74,5	759,6	32,6	354,7
Proposta 5	283,62	97,3	78,6	31,1	2,7	21,0

Fonte: Autoria própria (2019).

Todos os indicadores tiveram uma melhora quando comparados com a situação atual, mesmo com a redução de dois operadores (33% do total de mão-de-obra). O tempo de ciclo teve uma melhora de 27,0%, a eficiência de 44,3%, a ociosidade foi reduzida em 96,0%, o atraso de balanceamento melhorou em 91,6% e, por fim, o índice de suavidade melhorou 94,1%.

O diagrama de precedência do estudo de caso 5 pode ser visto na **Figura 17**.

Figura 17 - Diagrama de precedência do estudo de caso 5.



Fonte: Autoria própria (2019).

4.3 Tomada de Decisão

Com os cinco estudos de caso, quatro deles foram apresentados para a direção para a tomada de decisão sobre qual balanceamento de linha seria aplicado, levando em conta os pontos positivos e negativos de cada um. A **Tabela 13**, com todos os indicadores compilados, auxiliou o processo. Em negrito estão os melhores resultados em relação ao indicador em análise.

Tabela 13 - Compilado dos indicadores.

Modelo	Atual	Estudo de caso 1	Estudo de caso 2	Estudo de caso 3	Estudo de caso 4	Estudo de caso 5
Operadores	6	6	5	5	6	4
Tempo de ciclo (ut)	388,26	288,96	358,71 ¹	334,74	257,13	283,62
Utilização (%)	74,5	74,5	89,5	89,5	52,4	78,6
Eficiência (%)	67,4	90,6	87,5	93,8	71,5	97,3
Ociosidade total (ut)	759,6	163,8	223,6	103,8	439,4	31,1
Atraso de balanceamento (%)	32,6	9,4	12,5	6,2	28,5	2,7
Índice de suavidade	354,7	103,6	155,0	67,4	244,3	21,0
Investimento (\$)	-	0	0	17.500	415.500	415.500
Economia anual (\$)	-	-	132.000	132.000	0	396.000
Payback (anos)	-	-	Instantâneo	0,13	-	1,05

Fonte: Autoria própria (2019).

O estudo de caso 1 traz ganhos para a linha, deixando mais balanceada, porém ainda há potencial para melhora.

O estudo de caso 2 trabalha com um operador a menos, porém o tempo de ciclo é superior ao *takt time*, portanto não é viável.

O estudo de caso 3 melhora o balanceamento, diminui o número de operadores e o tempo de ciclo, e o seu custo de implementação é muito baixo, sendo necessário em torno de um mês e meio para pagar o investimento.

¹ Acima do *takt time*, portanto não será considerado como uma opção viável.

O estudo de caso 4 se torna inviável pois a linha fica muito desbalanceada e há um investimento muito alto para não ter ganho financeiro imediato.

Por fim o estudo de caso 5 é muito atrativo pois proporciona uma diminuição da carga de trabalho, melhora do balanceamento de linha, diminui em dois o número de operadores e o seu investimento se paga com somente 1,05 anos.

Dado o contexto de análise apresentado, a empresa optou por implementar o estudo de caso 5, pois apresenta os melhores indicadores, há a maior economia, e embora exista um investimento significativo, a linha de montagem ainda irá operar por um longo tempo, que será mais do que suficiente para dar retorno, fazendo com que a linha se torne mais rentável, tecnológica e confiável.

Tendo por base os resultados apresentados, o Capítulo 5 a seguir apresenta comentários finais sobre o trabalho realizado.

5 CONCLUSÕES

O presente capítulo traz as considerações finais acerca deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais

Neste projeto de pesquisa avaliou-se a possibilidade de balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos de uma empresa localizada em São José dos Pinhais - PR, que atualmente trabalha em dois turnos e produz dois modelos distintos de produto.

No Capítulo 1 do presente trabalho foi descrita a situação problema, evidenciando-se a necessidade de melhoria no balanceamento da referida linha. No Capítulo 2 foi realizada a pesquisa bibliográfica necessária para o desenvolvimento deste projeto, com conceitos relevantes ao tema de balanceamento de linha. No Capítulo 3 foi proposta a metodologia de balanceamento de linha de modelo misto que utiliza um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista adaptado de Sikora, Lopes e Magatão (2017). Os passos utilizados na metodologia foram primeiramente definir as atividades realizadas, por meio da consulta das instruções de trabalho; em seguida realizar a cronoanálise; definir as estações de trabalho; identificar todas as restrições e relações de precedência; inserir os dados no modelo; definir a função objetivo para o caso em estudo; analisar os resultados e, por fim, escolher um balanceamento de linha em conjunto com a empresa.

O Capítulo 4 apresenta o diagrama de precedências do estado atual da linha e os cinco estudos de caso com seus indicadores, sempre sendo comparados com o cenário atual. A empresa recebeu um compilado com as cinco propostas estudadas e optou pela implementação da proposta que sugeria: a redução de dois operadores, a adição de um robô e a automação da bancada de inspeção final. A referida proposta

possui um *payback* de 1,05 anos e apresenta para os indicadores da linha uma melhora de 27,0% no tempo de ciclo, um aumento de 44,3% na eficiência, redução de 96,0% na ociosidade total, 94,1% no índice de suavidade e por fim 91,6% de melhora no atraso de balanceamento, obtendo, assim, uma linha muito mais balanceada.

Deste modo, a partir do trabalho desenvolvido foi possível sugerir diferentes propostas de balanceamento para a linha analisada, as quais foram validadas por especialistas da empresa, acatando-se a proposta que oferecia uma solução mais vantajosa num horizonte de tempo de aproximadamente 1 ano. A abordagem otimizada de solução proposta foi capaz de auxiliar o processo de tomada de decisões operacionais no contexto em análise, mesmo em um cenário em que equipes especializadas já haviam buscado soluções de balanceamento para a linha. Ou seja, apresentou-se uma alternativa de balanceamento considerada viável e vantajosa e que anteriormente não havia sido obtida pelas equipes especializadas. A aplicação da referida metodologia demanda um criterioso levantamento de dados e conhecimento dos procedimentos de montagem, contudo, os resultados obtidos podem ser notoriamente relevantes, aprimorando soluções oriundas de práticas correntes na empresa.

5.2 Sugestões de Continuidade

O trabalho apresenta como possibilidade de continuidade as seguintes ações:

- Estudar a possibilidade de um *transfer* para a movimentação do painel entre as estações 1 e 7;
- Mudança do *layout* da linha, para diminuir a distância entre as estações, aumentando a eficiência e também o conforto dos operadores que tendem a diminuir o deslocamento.
- Expandir a análise realizada para outra linha de montagem de instrumentos na fábrica, que atua em três turnos e possui um volume de produção superior;
- Realizar o balanceamento de linha nas linhas de costura e montagem de bancos utilizando a mesma metodologia.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Y. F. M. de; SANTOS, G. P. S.; CARDOSO, L.; NUSS, L. F.; LIMA, F. N de. **Melhoria de Processo – Ganho no Fluxo Produtivo em Linha de Montagem.** Associação Educacional Dom Bosco. Resende. 2006.
- BATTAÏA, O.; DOLGUI, A. **A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches.** International Journal of Production Economics, v. 142, n. 2, 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. 183, p. 674-793, 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.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Gestão da Produção: uma abordagem introdutória.** 3ª ed. Barueri: Manole, 2014.
- 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.
- EREL, E.; SARIN, S. C. **A survey of the assembly line balancing procedures.** Production Planning & Control, v. 9, n. 5, p. 414-434, 1998.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações.** 8ª ed. São Paulo: Pioneira, 2005.
- 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.
- GITMAN, L. **Princípios de Administração Financeira.** 12ª ed. São Paulo, 2010.
- IGNALL, E. J. **A review of assembly line balancing.** Journal of Industrial Engineering, v. 16, p. 244-254, 1965.

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

LEAL, E. G.; GRESPAN, L. A. **Balanceamento de linha de montagem de motores diesel por meio de programação matemática**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. Apostila da Disciplina, 2002. Rio de Janeiro.

LOPES T.C., SIKORA C.G.S., MICHELS A.S., MAGATÃO L. **An iterative decomposition for asynchronous mixed model assembly lines: combining balancing, sequencing, and buffer allocation**. International Journal of Production Research, 2019.

LUDUWIG, B. V. B.; MELLO, G. H. **Balanceamento de uma linha de usinagem de bicos injetores por programação linear inteira mista**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica.

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

MAGATÃO, L. **Pesquisa Operacional**. Apostila da Disciplina. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba-PR, 2016.

OHNO, T. **O sistema Toyota de Produção além da produção**. Bookman, 1997.

PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre Reis. **Administração da produção. Operações industriais e de serviços**. Unicenp, 2007.

PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. D. **Programação Linear**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1990.

PUCCINNI, A. D. L. **Introdução à Programação Linear**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1975.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and practice**. 4ª ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009

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.

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

SIKORA, C. G. S.; LOPES, T. C.; MAGATÃO, L. **Travelling 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, 2017.

SLACK N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 8ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2018.

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.

SUGUINOSHITA, G.; MAGATÃO, L. **Resolução de um problema real de (re)balanceamento de linha de montagem de motores por meio de programação matemática.** In: 50º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2018. Rio de Janeiro. Anais do SBPO 2018, Rio de Janeiro, 2018.

WILLIAMS, H. P. **Model building in mathematical programming.** John Wiley & Sons Ltd, England, 1999.

YIN, M.; JIANG W. **The Theory of IE Assembly Line Balance and Optimization.** 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer. Atlantis Press, 2016.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS TAREFAS

Tarefa	Descrição	Atividades	Tempo (ut)	
			Modelo 1	Modelo 2
1	Montar PI <i>Upper</i> na máquina	Pegar painel de instrumentos superior Se deslocar até máquina Montar peça na máquina	36,63	39,47
2	Ler código de barras e acionar <i>start</i>	Ler código de barras da peça Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	9,91	8,96
3	Tempo máquina fragilização	Tempo da máquina fragilização	231,03	231,91
4	Retirar peça da máquina	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação	12,29	13,41
5	Limpeza da peça	Limpar a peça	49,55	48,54
6	Montar na máquina	Pegar a peça Se deslocar até máquina Montar peça na máquina Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	24,63	28,54
7	Tempo máquina <i>Punching</i>	Tempo da máquina <i>Punching</i>	40,65	40,67
8	Retirar peça da <i>Punching</i> e montar na máquina de solda 1	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação Montar peça na máquina	19,21	20,07
9	Montar suporte do botão	Pegar suporte do botão Montar suporte do botão no PI <i>Upper</i>	8,03	7,31
10	Montar <i>cluster</i>	Pegar <i>cluster</i> Montar <i>cluster</i> no PI <i>Upper</i>	26,61	28,41
11	Acionar <i>start</i> na máquina de solda 1	Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	8,80	8,75
12	Tempo máquina de solda 1	Tempo da máquina de solda 1	163,33	163,13
13	Montar reforço do airbag na máquina	Pegar reforço do airbag Montar na máquina	9,53	8,54
14	Posicionar buchas	Pegar buchas Posicionar na máquina	19,95	20,27
15	Ler código de barras e acionar <i>start</i>	Ler código de barras da peça Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	10,26	11,18
16	Tempo máquina Cravamento	Tempo da máquina cravamento	39,67	39,18
17	Retirar peça da máquina de solda 1 e montar na máquina de solda 2	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação Montar peça na máquina	21,11	20,56
18	Retirar reforço do airbag e montar na máquina de solda 2	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação Montar peça na máquina	16,95	17,24

19	Ler código de barras e acionar <i>start</i>	Ler código de barras da peça Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	16,26	15,35
20	Tempo máquina de solda 2	Tempo da máquina de solda 2	98,19	98,19
21	Retirar peça da máquina de solda 2 e montar na máquina de solda 3	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação Montar peça na máquina	22,15	21,64
22	Montar canal de ar na máquina de solda 3	Pegar canal de ar Montar canal de ar na peça	14,23	15,22
23	Acionar <i>start</i>	Ler código de barras da peça Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	8,12	9,20
24	Tempo máquina de solda 3	Tempo da máquina de solda 3	90,58	89,94
25	Retirar peça da máquina de solda 3 e montar na máquina de solda 4	Retirar peça da máquina Se deslocar até próxima estação Montar peça na máquina	24,04	25,04
26	Montar reforço metálico na máquina de solda 4	Pegar reforço metálico Montar peça na máquina	20,58	19,52
27	Montar PI <i>Lower</i> na máquina de solda 4	Pegar PI <i>Lower</i> Montar na máquina	20,64	20,34
28	Acionar <i>start</i> na máquina de solda 4	Acionar <i>start</i> Se deslocar para próxima estação	9,11	9,90
29	Tempo máquina de solda 4	Tempo da máquina de solda 4	182,25	183,13
30	Retirar PI da máquina de solda 4	Retirar peça da máquina	23,81	23,54
31	Encaixar PI na bancada	Se deslocar até bancada 1 Montar peça na bancada 1	14,24	13,55
32	Montar janela de ar esquerda	Pegar janela de ar esquerda Montar no PI	12,29	9,02
33	Montar janela de ar direita	Pegar janela de ar direita Montar no PI	9,96	10,55
34	Montar 20 cliques X	Pegar cliques X Montar 20 cliques no PI	148,50	149,54
35	Montar 15 cliques Y	Pegar cliques Y Montar 15 cliques no PI	104,87	104,60
36	Retirar peça da bancada 2 e levar até bancada 3	Retirar PI da bancada 2 Se deslocar até bancada 3 Encaixar PI na bancada 3	19,78	18,85
37	Retirar peça da bancada 1 e levar até bancada 2	Retirar PI da bancada 2 Se deslocar até bancada 3 Encaixar PI na bancada 3	19,09	19,49
38	Montar moldura SPC	Pegar moldura SPC Montar moldura SPC no PI	18,12	15,40
39	Montar 11 cliques Y	Pegar cliques Y Montar 11 cliques no PI	80,51	79,96
40	Montar 21 porcas Z	Pegar porcas Z Montar 21 porcas no PI	163,43	163,64

41	Montar duto de ar central	Pegar duto de ar central superior Pegar duto de ar central inferior	48,63	49,37
42	Montar clipe no duto de ar central	Montar clipe no duto de ar central	25,33	24,24
43	Montagem do duto de ar no painel	Pegar duto de ar central Montar duto de ar central no PI	14,26	13,78
44	Montar duto esquerdo	Pegar duto esquerdo Montar duto esquerdo no PI	23,14	23,08
45	Montar duto direito	Pegar duto direito Montar duto direito no PI	18,84	19,61
46	Montar parafusos	Pegar parafusos Montar parafusos no PI	39,75	40,51
47	Retrabalho	Pegar ferramenta de retrabalho Realizar retrabalho no PI	93,93	94,81
48	<i>Light Guided System</i>	Realizar <i>Light Guide System</i>	42,42	101,98
49	Retirar peça da bancada 3 e levar até inspeção final	Retirar PI da bancada 3 Se deslocar até inspeção final Encaixar PI na bancada de inspeção final	21,74	21,77
50	Ler código de barras e acionar <i>start</i>	Ler código de barras da peça Acionar <i>start</i>	14,50	14,00
51	Tempo máquina 1 IF	Tempo da máquina de IF	26,23	26,31
52	Girar bancada	Giro da bancada para posição 2 da IF	7,02	6,72
53	Tempo máquina 2 IF	Tempo da máquina de IF	19,28	19,50
54	Girar bancada	Giro da bancada para posição 3 da IF	6,52	5,42
55	Tempo máquina 3 IF	Tempo da máquina de IF	23,59	22,64
56	Girar bancada	Giro da bancada para posição 4 da IF	6,24	5,93
57	Tempo máquina 4 IF	Tempo da máquina de IF	21,47	20,61
58	Colar etiqueta	Colar etiqueta na peça acabada	22,14	22,60
59	Movimentar peça acabada	Retirar peça da bancada de inspeção final Se movimentar até vagão Colocar peça acabada no vagão Retornar para estação	59,43	60,49