

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

BRUNO VINÍCIUS BUZOLIN LUDUWIG  
GUSTAVO HENRIQUE MELLO

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE USINAGEM DE BICOS INJETORES POR  
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC 2)

CURITIBA  
2019

BRUNO VINÍCIUS BUZOLIN LUDUWIG  
GUSTAVO HENRIQUE MELLO

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE USINAGEM DE BICOS INJETORES 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 USINAGEM DE BICOS INJETORES POR PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA", realizada pelos alunos Bruno Vinícius Buzolin Luduwig e Gustavo Henrique Mello, 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. Me. Adriano Perpétuo de Lara

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cleina Yayoe Okoshi

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 17 de junho de 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer a todas as pessoas que nos ajudaram na realização dessa monografia de forma que alcançássemos o melhor resultado possível.

Aos nossos colegas, pelo grande apoio na realização deste projeto.

Aos nossos pais Marcelo Mello e Maria Elisabete de Oliveira Mello e Hubert George Luduwig e Rosinei Germana Buzolin Luduwig por sempre incentivarem e apoiarem em nosso desenvolvimento e não medirem esforços em proporcionar para nós a condição que não tiveram.

Ao nosso professor doutor Leandro Magatão que ofereceu as ferramentas necessárias para realização desse trabalho, assim como sua disponibilidade, dedicação e exemplar conduta na condução desse trabalho.

A UTFPR por nos oferecer uma estrutura de ensino, assim como a oportunidade única de desenvolvimento profissional para estarmos aptos para o mercado de trabalho.

*“No meio de toda dificuldade, encontra-se a oportunidade”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

LUDUWIG, Bruno Vinicius Buzolin; MELLO, Gustavo Henrique. Balanceamento de uma linha de usinagem de bicos injetores por programação linear inteira mista. 79 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 onde indústrias fazem investimentos milionários para tentar reduzir o tempo de ciclo de suas linhas produtivas, o balanceamento de linha busca otimizá-lo sem grandes gastos e com resultados significativos. Viabiliza-se, assim, a redução de custos, o aumento de produtividade e a diminuição da ociosidade por meio da homogeneização dos tempos das estações de trabalho. No contexto exposto, o presente trabalho aplica técnicas de Pesquisa Operacional, em especial a Programação Linear Inteira Mista, para a obtenção de respostas otimizadas de balanceamento em uma linha real que produz bicos injetores. Esse projeto de pesquisa consistiu primeiramente na compreensão e entendimento da linha como um todo. O segundo passo foi definir as estações de trabalho para viabilizar o entendimento sobre os parâmetros de linha a serem considerados. Com as informações adquiridas foi possível analisar os tempos de ciclo de cada estação de trabalho e em seguida utilizar Programação Matemática para otimizar o referido contexto. Foram feitas duas análises principais, o cenário Ideal e o cenário implementável. Os principais indicadores analisados foram o tempo de ciclo no qual obteve-se uma melhoria de 12,20% e a diferença entre os tempos das estações (ganho de 31,05%). No cenário implementável essas melhorias foram obtidas com 20 mudanças na linha produtiva. Apesar do número parecer significativo, o investimento total necessário seria de apenas 1.300,00 unidades monetárias (\$1.300,00). O tempo de *payback* para o investimento realizado foi de menos de 3 horas e os ganhos previstos são de quase 1,4 milhões produtos e 4,1 milhões de unidades monetárias por ano, o que retrata que apesar de várias mudanças serem propostas, estas têm um investimento baixo e um retorno considerável para a empresa.

**Palavras-chave:** Balanceamento de Linha, Pesquisa Operacional, Linha de Usinagem.

## ABSTRACT

LUDUWIG, Bruno Vinicius Buzolin; MELLO, Gustavo Henrique. Fuel nozzle machining line balancing using Mixed-Integer Linear Programming. 79 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

In a scenario where industries invest millions in reducing the cycle time, line balancing seeks to improve the production line reaching significant improvements without much resources spent. The balancing procedure allows waste reduction, productivity increase, and reducing idleness through workstation's time homogenization. In the mentioned context, the present work applies Operational Research techniques, in particular, Mixed Integer Linear Programming, to obtain optimized balancing responses in a real machining line. This research project consists, initially, on the line understanding; then the workstations were defined in order to better understand the possible line parameters to be considered. With the obtained information it was possible to analyze the cycle time of each workstation and then to use Mathematical Programming to optimize the said context. Two main analyses were performed: the ideal scenario and the implementable scenario. The main performance indicators analyzed were the cycle time, in which the improvement was 12.20%, and the variation between workstation time, that improved 31.05%. Within the implementable scenario, those improvements were obtained with 20 changes in the production line. Although the number of changes seems significant, the total required investment would be only 1,300.00 monetary units (\$1,300.00). The *payback* time for this investment is under 3 hours and the increase in annual production and profit are about 1,4 million products and \$4,1 millions, respectively. This implies that, regardless of several adaptations were suggested, they are at a relative small cost and the gains are considerable to the company.

Keywords: Line balancing, Operational Research, Machining Line.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de operações.....	16
Figura 2 – Tempo das estações da linha de usinagem para o <i>Mix</i> considerado.....	18
Figura 3 – Arranjo físico segundo volume e variedade.....	24
Figura 4 - Exemplo de diagrama de precedências.....	26
Figura 5 – Lista de tarefas e diagrama de precedência.....	30
Figura 6 – Conceitos essenciais de modelo em Programação Matemática.....	34
Figura 7 – Conexão entre variável, restrições e função objetivo.....	34
Figura 8 – Fluxograma do método utilizado.....	39
Figura 9 – Diagrama de Precedência modelo 1.....	44
Figura 10 – Tempos de ciclo para o modelo 1.....	45
Figura 11 – Diagrama de Precedência modelo 2.....	45
Figura 12 – Tempos de ciclo para o modelo 2.....	46
Figura 13 – Diagrama de Precedência modelo 3.....	47
Figura 14 – Tempos de ciclo para o modelo 3.....	48
Figura 15 – Diagrama de precedências modelo misto.....	49
Figura 16 – Tempos de cada estação de trabalho modelo misto.....	50
Figura 17 – Tempos de ciclo modelo misto cenário ideal.....	54
Figura 18 – Diagrama de precedências modelo misto cenário ideal.....	57
Figura 19 – Tempos de ciclo modelo misto cenário implementável.....	59
Figura 20 – Diagrama de precedências modelo misto cenário implementável.....	61
Figura 21 – Comparação do tempo de ciclo por estação de trabalho entre o estado atual e os cenários otimizados.....	62
Figura 22 – Comparação entre os tempos de ciclos para o estado atual e cenários otimizados.....	63
Figura 23 – Comparação entre as máximas diferenças para o estado atual e cenário otimizados.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mix de produção.....	17
Tabela 2 – Tempo de ciclo para os modelos do estudo.....	18
Tabela 3 – Comparativo entre os tipos de SALBP.....	32
Tabela 4 – Tempos de ciclo para o modelo 1.....	44
Tabela 5 – Tempos de ciclo para o modelo 2.....	46
Tabela 6 – Tempos de ciclo para o modelo 3.....	48
Tabela 7 – Tempos de ciclo para o modelo misto.....	50
Tabela 8 – Tempos de ciclo modelo misto cenário ideal.....	53
Tabela 9 – Lista de mudanças propostas com planos de ação e investimento estimado cenário ideal.....	55
Tabela 10 – Tempos de ciclo modelo misto cenário implementável.....	58
Tabela 11 – Lista de mudanças propostas com planos de ação e investimento estimado cenário implementável.....	60
Tabela 12 – Comparativo dos parâmetros do estado atual e cenários otimizados....	62
Tabela 13 – Comparativo dos indicadores para tempo de ciclo.....	64
Tabela 14 – Comparativo dos indicadores para máxima diferença.....	65
Tabela 15 – Comparativo dos indicadores Número de mudanças e orçamento.....	66
Tabela 16 – Comparativo dos indicadores principais e secundários entre os cenários otimizados.....	67
Tabela 17 – <i>Inputs</i> e resultados do cálculo de ponto de equilíbrio.....	69
Tabela 18 – <i>Inputs</i> e resultados do cálculo de <i>payback</i> .....	70
Tabela 19 – Ganhos de produtividade e em lucro pós-implementação do cenário implementável.....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Família de produtos.....	15
Quadro 2 – Legenda fluxograma de operações.....	15

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
DAMEC	Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica
PO	Pesquisa Operacional
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
MALBP	<i>Mixed-Model Line Balancing Problem</i>
MILP	<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
IT	Instruções de Trabalho

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	CONTEXTO DO TEMA	13
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo geral do trabalho	19
1.3.2	Objetivos específicos do trabalho	19
1.4	JUSTIFICATIVAS	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1	ARRANJO FÍSICO	22
2.2	FUNDAMENTOS DE LINHAS DE PRODUÇÃO	25
2.2.1	Terminologia de análise de linhas de produção	25
2.2.2	Indicadores de linhas de produção	26
2.2.3	Classificação das linhas de produção	28
2.3	BALANCEAMENTO DE LINHA	29
2.3.1	Balanceamento de linha de montagem de modelo simples	31
2.3.2	Balanceamento de linha de montagem de modelo misto	32
2.4	PROGRAMAÇÃO LINEAR	33
2.4.1	Hipóteses da programação linear	35
2.4.2	Formulação Matemática de Programação Linear	35
2.4.3	Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO	39
3.1.1	Definir as atividades realizadas	40
3.1.2	Agrupar as atividades em tarefas	40
3.1.3	Definir as estações de trabalho	40
3.1.4	Identificar as restrições	40
3.1.5	Identificar as precedências	41
3.1.6	Análise prévia dos dados	41
3.1.7	Implementação no modelo	41
3.1.8	Proposta de balanceamento	41
3.1.9	Mudanças viáveis	42
3.1.10	Mudanças nos parâmetros utilizados.	42
3.1.11	Compilação dos resultados	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
4.1	ANÁLISE DO ESTADO ATUAL	43
4.1.1	Modelo 1 – Famílias C, D, E e J	43
4.1.2	Modelo 2 – Famílias A, B e G	45
4.1.3	Modelo 3 – Famílias F, H e I	47
4.1.4	Modelo Misto - Modelo 1, 2 e 3	49
4.2	CENÁRIOS OTIMIZADOS	51
4.2.1	Cenário Ideal	53
4.2.2	Cenário Implementável	58
4.3	ANÁLISES E COMPARATIVOS	61
4.3.1	Tempo de ciclo	63

4.3.2	Máxima diferença	64
4.3.3	Número de Mudanças e Orçamento	66
4.3.4	Cenário Ideal x Cenário Implementável	67
4.4	RETORNO DO INVESTIMENTO	68
5	CONCLUSÕES	72
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.2	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – Quadro de tarefas	78

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO DO TEMA

Durante a segunda guerra mundial um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar problemas de estratégia e tática associados com a defesa nacional. O principal foco era decidir sobre a utilização mais eficaz dos recursos militares. A convocação deste grupo foi a primeira atividade formal de “Pesquisa Operacional” (LISBOA, 2002). Deste modo, a Pesquisa Operacional (PO) não surgiu na indústria propriamente dita.

Apesar de seu início num contexto militar, logo a Pesquisa Operacional atraiu o interesse de diversos outros ramos do conhecimento. Os problemas englobam diversas áreas e diversos graus de complexidade, portanto era necessária uma modelagem que levasse em conta vários cenários analisados, os quais englobavam diferentes parâmetros de configuração. Nesse contexto a aplicação da Pesquisa Operacional facilita o processo de análise e tomada de decisão, uma vez que os modelos criados podem simular os impactos das soluções propostas antes de serem devidamente implementadas (LISBOA,2002).

Em um cenário de alta concorrência entre empresas e consumidores, com exigências cada vez maiores, as organizações foram obrigadas a evoluir o seu processo de produção. Fatores como variedade de produtos, dinâmica da entrega e baixo custo têm forçado as empresas a se adaptarem de modo a aprimorar suas linhas de montagem (OLIVEIRA, 2012). No entanto, o processo de tomada de decisão ainda é direcionado pelo emprego de critérios experimentais e a complexidade do planejamento e programação da produção é contornada pela não utilização da capacidade total dos recursos produtivos. Nesse contexto a Pesquisa Operacional tem possibilitado que decisões complexas sejam analisadas de forma mais criteriosa, fazendo com que recursos importantes sejam utilizados da melhor maneira (MAGATÃO, 2001). Deste modo, o uso de técnicas de PO voltadas a sugerir soluções otimizadas em contextos produtivos como o abordado no presente trabalho se faz oportuna.

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O presente estudo aborda uma linha de usinagem. As estações de trabalho são posicionadas de forma que a sequência de produção seja otimizada e proporcione alta produtividade, ainda que o arranjo físico (*layout* produtivo) adotado esteja, muitas vezes, associado à baixa flexibilidade para fabricação de produtos diferentes.

A planta em estudo está situada na Cidade Industrial de Curitiba - PR, sendo de origem alemã, e responsável pela produção de componentes Diesel para o setor automotivo. No presente trabalho será apresentada uma linha de usinagem de bicos injetores. Atualmente a empresa produz diversos modelos de bico. Cada modelo apresenta inúmeras diferenças quanto à forma em que o produto bruto é obtido (erodido ou brocado), sequências e particularidades de produção e pressão de injeção de diesel. Portanto, foi elaborado um fluxograma das operações, dividindo os produtos por famílias, as quais apresentam características e sequências de produção semelhantes como é mostrado na Figura 1. Atualmente a produção diária de bicos é, em média, de 32.000 unidades, sendo analisado em um primeiro momento as famílias que mais impactam nessa produção.

O Quadro 1 ilustra as principais famílias de produtos envolvidos no estudo. A simbologia utilizada no fluxograma de operações, ilustrado na Figura 1, é mostrada no Quadro 2.

**Quadro 1 – Família de produtos**

Família de produtos	
A	P DLLA brocado c/ ou s/ HE, ENF, baixa pressão
B	P DLLA brocado c/ ou s/ HE, ENF, alta pressão
C	P DSLA erodido c/ ou s/ HE, ENF, baixa pressão
D	P DSLA erodido c/ ou s/ HE, ENF, alta pressão
E	P DLLA erodido c/ ou s/ HE, ENF, baixa pressão
F	P DLLA erodido c/ ou s/ HE, c/ ou s/ DFL, ENF, alta pres.
G	P DSLA brocado, s/ HE, ENF, baixa pressão
H	CRI DLLA ENF c/ ou s/ C2, c/ ou s/ DFL, alta pressão
I	CRIN DSLA DNF c/ ou s/ C2, c/ ou s/ DFL, c/ ou s/ Shot Peening, alta pressão
J	CRIN3 DLLA ENF c/ C2, alta pressão
L	CRIN DLLA ENF c/ Shot Peening, c/ C2, alta pressão
M	CRIN3 DLLA ENF c/ Shot Peening, c/ C2, alta pressão
N	CRIN DLLA ENF nitretado, c/ C2, alta pressão

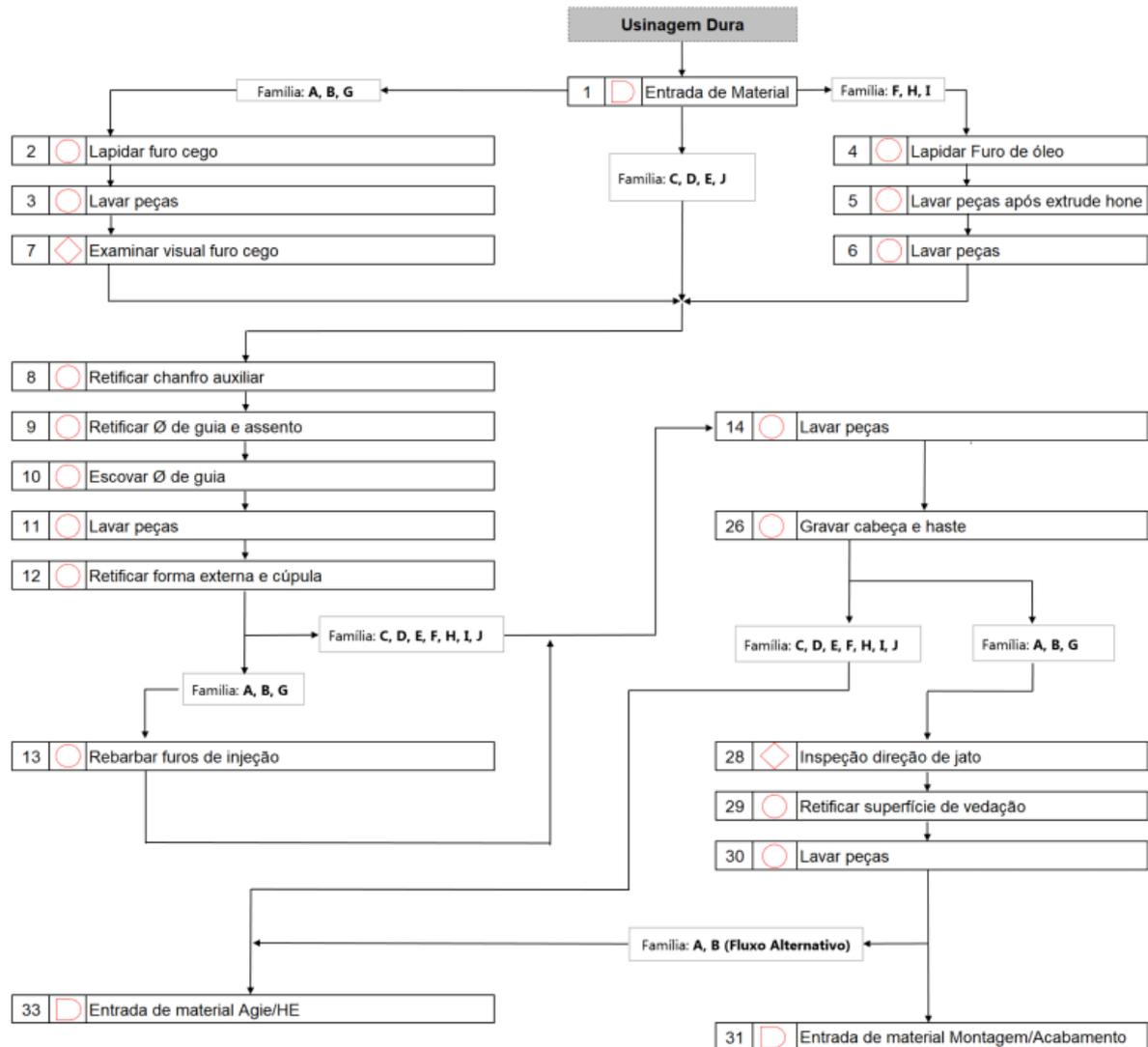
**Fonte: Os autores, 2018**

**Quadro 2 – Legenda fluxograma de operações**

Símbolo	Atividade
	Operação
	Transporte
	Exame/Inspeção
	Entrada
	Estoque

**Fonte: Os autores, 2018**

**Figura 1 – Fluxograma de operações**



**Fonte: Os autores, 2018**

Um dos problemas enfrentados pela equipe foi a questão da divisão das estações de trabalho, uma vez que a linha produtiva (máquinas e operadores) não estão posicionados de forma linear e sequencial. Esta configuração demanda diversos deslocamentos entre operações, os quais podem demandar um tempo considerável e, muitas vezes, não são contabilizados de modo adequado. Um arranjo físico conforme presente na empresa pode, deste modo, ser responsável por problemas de produtividade ou elevada ociosidade. Isto pode tornar necessária a transformação completa de *layout* para reduzir os tempos de ciclo, fato que demandaria um

investimento significativo em modificações no chão-de-fábrica, o qual não é possível na presente realidade da empresa.

No contexto fabril mencionado, observou-se que os operadores poderiam executar tarefas em mais de um local, e os gargalos produtivos estavam associados à carga de trabalho dos operadores. Dessa forma, optou-se por tratar como “posto de trabalho” o próprio operador, considerando-se seus deslocamentos e as atividades realizadas em uma ou mais estações. Esta abstração propiciou entender melhor que a necessidade de balanceamento estava na carga de trabalho dos trabalhadores e não necessariamente na carga de trabalho das estações da linha. No trabalho de conclusão de curso realizado por Marcílio e Skraba (2010), abstração similar foi utilizada. No caso estudado pelos referidos autores, a linha era composta por 14 estações de trabalho, mas somente 9 operadores, a princípio, trabalhavam na linha. Esses operadores se deslocavam entre duas ou mais estações de trabalho. Assim, mostrou-se necessário balancear a carga de trabalho dos operadores de modo prioritário. Havia estações de trabalho que naturalmente permaneciam com menor carga de trabalho, pois o número de estações era superior ao número de operadores.

O presente estudo foi feito considerando um *mix* com 3 grupos de famílias, conforme a Tabela 1.

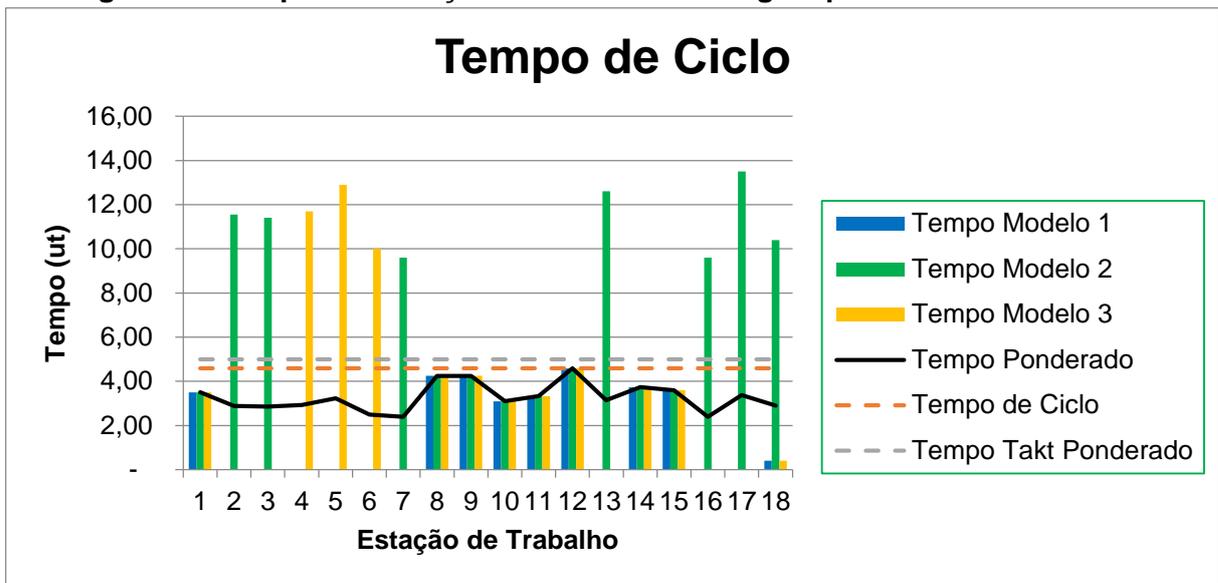
**Tabela 1 – Mix de produção.**

<b>Modelo</b>	<b>Famílias</b>	<b>Mix</b>
Modelo 1	C, D, E e J	50%
Modelo 2	A, B e G	25%
Modelo 3	F, H e I	25%

**Fonte: Os autores, 2019**

A Figura 2 apresenta o balanceamento atual em cada estação de trabalho, a qual possui um operador responsável. Considerou-se inicialmente um *mix* com três produtos conforme a Tabela 1, os quais representam a maior parcela de itens produzidos. Na presente Figura, os valores temporais são apresentados em unidades de tempo (u.t.) de modo a preservar os dados reais da empresa em análise. Sendo o tempo de ciclo o tempo necessário para execução de uma peça e o *takt time* é o tempo em que se deve produzir uma peça ou produto, baseado no ritmo da demanda dos clientes.

Figura 2 – Tempo das estações da linha de usinagem para o *Mix* considerado



Fonte: Os autores, 2019

Nota-se pela Figura 2 que estações como a 7 e a 16 apresentam um tempo de ciclo ponderado pela demanda dos 3 modelos relativamente pequeno, 48% abaixo do tempo de ciclo. Contudo, quando o modelo 2 é realizado nestas estações, o mesmo consome um tempo superior ao esperado para o tempo de ciclo. Deste modo, questões relativas ao sequenciamento de produção tendem a ser também relevantes neste contexto Lopes *et al.*, (2019). Contudo, a tratativa de problemas de sequenciamento está além do escopo do presente trabalho. Por outro lado, em estações como a 8, 9 e 12 os operadores se encontram com carga de trabalho média mais próxima ao tempo de ciclo. Outro ponto crítico do estudo é a divergência entre os tempos de ciclo de cada modelo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo de ciclo para os modelos do estudo

Modelo	Famílias	Tempo de Ciclo	Varição em relação ao modelo 1
Modelo 1	C, D, E e J	4,59	0%
Modelo 2	A, B e G	13,50	194%
Modelo 3	F, H e I	12,90	181%

Fonte: Os autores, 2019

No contexto atual da linha, temos dois problemas claros:

- Desequilíbrio entre as cargas nas “estações de trabalho”, impactando a produtividade e podendo gerar descontentamento entre os funcionários.
- Desequilíbrio entre os tempos de ciclos das famílias de produtos, tornando o balanceamento ineficaz em caso de mudança de demandas.

Tais pontos justificam uma análise visando equalizar os tempos entre estações e operadores, viabilizando a redução do tempo de ciclo e, conseqüentemente, aumentando a produtividade.

A fim de obter dados mais precisos que os disponibilizados na documentação técnica fornecida pela empresa, e chegar a resultados mais próximos da realidade operacional, foi feita uma cronoanálise de todas as operações e deslocamentos, gerando um novo levantamento de dados.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### 1.3.1 Objetivo geral do trabalho

Este Projeto de Pesquisa tem por objetivo principal otimizar o balanceamento de um trecho de uma linha de produção de bicos injetores de uma empresa situada em Curitiba, utilizando um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista.

#### 1.3.2 Objetivos específicos do trabalho

Para que fosse possível alcançar o objetivo geral do trabalho alguns objetivos específicos foram definidos:

- a. Compreender detalhadamente as atividades realizadas na linha produtiva para evidenciar desperdícios no processo de fabricação e indicadores de produção.
- b. Definir as precedências das atividades de acordo com o processo analisado.
- c. Utilizar um modelo matemático em PLIM (Programação Linear Inteira Mista) da literatura Sikora, Lopes e Magatão (2017), para obter uma solução de balanceamento da linha.
- d. Analisar os impactos da redução do tempo de ciclo por meio dos resultados do modelo matemático.

- e. Verificar as soluções propostas pelo modelo matemático e analisar a possibilidade da sua implementação prática.
- f. Comparar os resultados obtidos mostrando os ganhos e os investimentos necessários para implementá-los.

#### **1.4 JUSTIFICATIVAS**

A indústria está cada vez mais competitiva, e a disputa por mercado cada vez mais intensa. Em um período em que o crescimento econômico não é tão intenso as perdas de produção geradas pela superprodução se tornam mais evidentes (OHNO, 1997). De modo complementar, os três principais motivos da elaboração de modelos de Pesquisa Operacional, de acordo com Williams (2013), são:

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

Portanto, no âmbito industrial em análise, a utilização de uma técnica quantitativa oriunda de Pesquisa Operacional é de suma importância para se obter uma solução de balanceamento de linha. Deste modo, viabiliza-se a análise de inúmeras variáveis do problema, visando principalmente a redução de custos, diminuição do tempo ocioso e aumento da produtividade.

#### **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

No Capítulo 1 é primeiramente apresentada a temática a ser abordada, em seguida o problema que será analisado e os objetivos principais do projeto. Por fim, é

apresentado o porquê essa análise detalhada ser necessária e os benefícios da aplicação da temática na indústria.

No Capítulo 2 a fundamentação teórica para a solução do problema é apresentada. Primeiramente é apresentada uma base sobre as linhas de montagens, depois é aprofundada a temática de balanceamento de linhas e, por fim, como pode-se aplicar os conceitos de Pesquisa Operacional, em particular a Programação Linear Inteira Mista para minimizar o problema de balanceamento.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia aplicada na resolução do problema, e também as principais características do modelo matemático a ser utilizado. Já o Capítulo 4 mostra as premissas, resultados, comparações e como implementar as soluções propostas pelo modelo matemático. O Capítulo 5 traz as considerações finais e sugestões para continuidade do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão abordados os conteúdos necessários para compreensão e desenvolvimento do trabalho. Sendo exemplificados os diferentes tipos de arranjos físicos dos sistemas produtivos em uma linha de fabricação (seção 2.1), fundamentos de linha de produção (seção 2.2) com indicadores, terminologia e classificações. Na seção (2.3) é apresentado o balanceamento de linhas produtivas e suas abordagens, e a programação linear (seção 2.4), apresentando os conceitos básicos da otimização aplicada a problemas de engenharia.

### 2.1 ARRANJO FÍSICO

No arranjo físico as estações de trabalho são posicionadas de forma estratégica e definem como a empresa vai produzir. Sendo a parte mais visível da cadeia produtiva a necessidade de estudá-lo se faz necessária para reformulação de plantas industriais, otimização de produção, desenvolvimento de novos produtos e novas operações produtivas. Conforme Gaither e Frazier (2001), arranjo físico significa planejar a localização de todas as máquinas, estações de trabalho, áreas de armazenamento de matéria prima, produtos, atendimento ao cliente e ainda os padrões de fluxo de materiais e de pessoas.

Slack, Chambers e Johnston (2002), definem arranjo físico de forma simples, como sendo o posicionamento de todas as instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção de uma operação produtiva com a preocupação com a localização física dos recursos de transformação.

Segundo Peinado e Graeml (2007) o arranjo físico pode ser dividido em cinco grupos:

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

No arranjo físico por produto o material segue por um caminho previamente determinado, que é definido levando em conta a sequência de montagem do produto. Esse modelo permite rapidez no fluxo de fabricação de produtos que passam por processos de montagem e produção sempre iguais (padronizados). A disposição não é necessariamente uma linha reta, mas é projetado de forma que espaço seja melhor aproveitado e o caminho percorrido para abastecimento da matéria-prima na linha seja menor. Segundo Slack, Chambers e Johnston (2009), a sequência de atividades requeridas coincide com a sequência na qual os processos foram arranjados fisicamente, sendo o fluxo de produtos, informações ou clientes muito claro, sendo um arranjo relativamente fácil de controlar. As vantagens do arranjo físico por produto são: a possibilidade de produção em massa com grande produtividade por apresentarem equipamentos mais especializados e maiores custos fixos, porém menor custo variável por unidade, carga de máquina e consumo de material constante ao longo da linha de produção, maior controle de produtividade (PEINADO e GRAEML, 2007).

O arranjo físico por processo geralmente é utilizado quando a variedade a ser produzida é relativamente alta, uma vez que possibilita alta flexibilidade de *mix* de produtos atendendo diversas demandas menos previsíveis, supervisão de equipamentos e instalações relativamente fáceis. Os recursos são transformados ao longo da operação levando em conta a necessidade de processamento e processos com necessidades similares ou até mesmo iguais são localizados juntos uns dos outros visando o beneficiamento dos recursos transformadores (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON 2009).

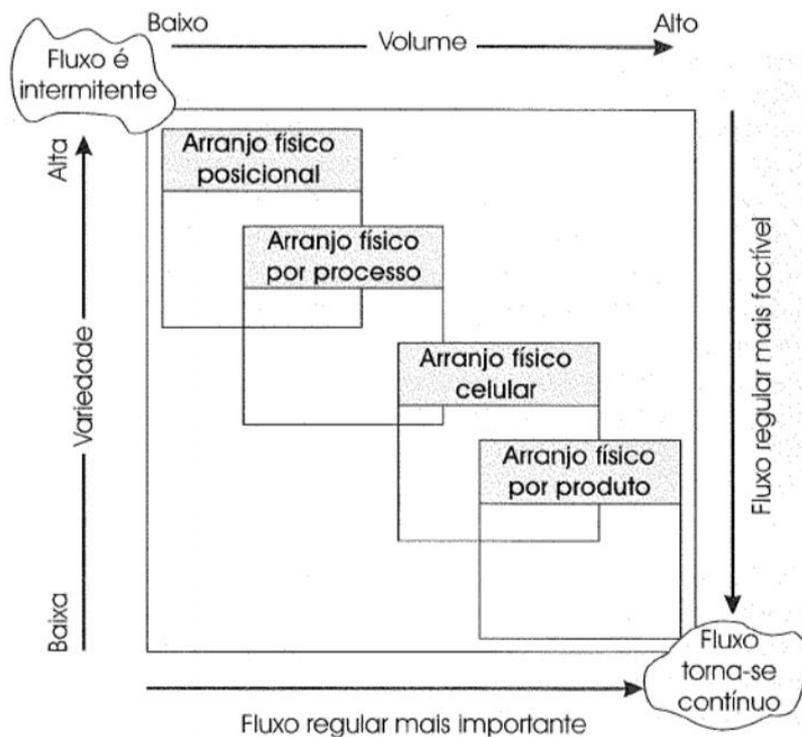
No arranjo físico celular se tem a tentativa de simplificar a complexidade do fluxo presente no arranjo físico por processo, uma vez que os recursos transformadores estão dispostos em células, nas quais esses diferentes recursos se agrupam para atender as necessidades imediatas do produto. Importante destacar que dentro de cada célula podem haver estações com arranjo de processo ou produto (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON 2009).

Em um arranjo físico posicional os recursos transformados não se deslocam e quem sofre o processamento permanece estacionário enquanto maquinário, instalações e pessoas movem-se para o local de processamento à medida que se faz necessário. Exemplos comuns são a construção de uma rodovia ou de grandes

embarcações, onde o produto final é muito grande para ser movido (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON 2009).

Por último temos o arranjo físico misto sendo definido de forma sucinta por Slack, Chambers e Johnston (2009), como a combinação de elementos dos tipos básicos de arranjos físicos em diferentes partes da operação, como em vários departamentos em que se representa um tipo particular de processo e, ainda assim, dentro de cada departamento está presente diferentes tipos de arranjo físico. A Figura 3 a seguir ilustra os diferentes arranjos físicos em relação ao fluxo produtivo.

**Figura 3 – Arranjo físico segundo volume e variedade**



**Fonte: Slack, Chambers e Johnston (2009).**

A escolha do arranjo físico deve levar em consideração a variedade das operações, o volume a ser produzido uma vez que cada arranjo apresenta características próprias necessitando de um entendimento das vantagens e desvantagens que cada um exerce em seu processo.

## 2.2 FUNDAMENTOS DE LINHAS DE PRODUÇÃO

As indústrias são consideradas um sistema transformador de matéria prima em produto acabado, com valor agregado para os clientes, portanto configura-se um sistema produtivo (MOREIRA, 2011).

As linhas de produção podem ser entendidas como uma sistemática de produção realizada em série, orientadas pelo fluxo produtivo em que se tem pessoas especializadas em diversas funções, que com a ajuda de máquinas/dispositivos, realizam um trabalho sequencial a fim de obter um produto. A definição de Becker e Scholl (2006), consiste em estações de trabalho dispostas em série, nas quais passam consecutivamente os produtos, sendo cada uma dessas estações responsáveis por execução de tarefas.

### 2.2.1 Terminologia de análise de linhas de produção

Para compreensão do presente trabalho, é necessário o entendimento de alguns termos relativos às linhas de produção:

- **Estação ou posto de trabalho:** foi definido por (GAITHER e FRAZIER 2001) como a localização física onde um conjunto de tarefas são executadas por um operador ou máquina;
- **Tarefa:** são definidas como unidades de trabalho específicas podendo ser executadas de maneira independente (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009);
- **Tempo de tarefa:** tempo despendido para realização de uma tarefa;
- **Tempo de ciclo:** tempo máximo permitido para cada estação de trabalho, antes que a tarefa seja passada para a estação seguinte (AGUIAR, PEINADO e GRAEML, 2007);
- **Takt time:** é o tempo em que se deve produzir uma peça ou produto, baseado no ritmo da demanda dos clientes. É calculado dividindo-se o tempo disponível da linha de produção pelo volume da demanda do cliente. Segundo Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009), é a taxa de produção em uma linha necessária para atender à demanda do cliente, e pode ser expressa pela equação (1):

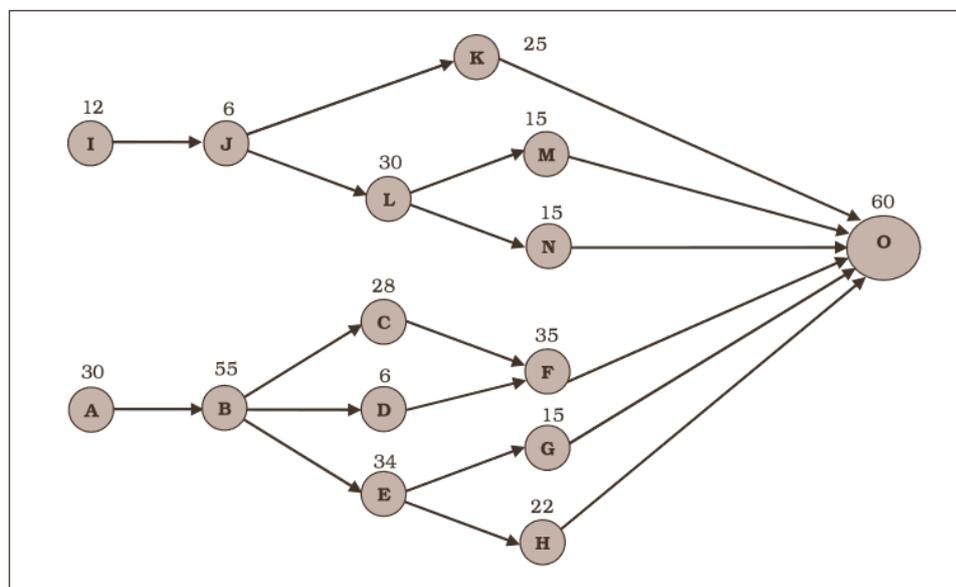
$$tt = \frac{1}{r} \quad (1)$$

Sendo:  $tt$  – tempo *takt*;

$r$  – Demanda cliente (unidades de produto por intervalo de tempo)

- **Operador:** indivíduo que atua nas estações de trabalho;
- **Precedência entre tarefas:** sequência na qual as atividades devem ser executadas;
- **Diagrama de precedências:** esquema que tem por função facilitar a visualização da precedência de execução entre tarefas, conforme ilustrado na Figura 4. Nessa figura, os nós do diagrama (A, B, ..., N, O) indicam as tarefas a serem executadas e os valores numéricos logo acima de cada nó representam os tempos das respectivas tarefas.

**Figura 4 - Exemplo de diagrama de precedências**



Fonte: Peinado e Graeml, (2007)

### 2.2.2 Indicadores de linhas de produção

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.

Ociosidade é quando se tem uma estação ou operador que permanece certo intervalo de tempo inativo (ocioso) devido à diferença entre o tempo de ciclo e o tempo da estação. Pode ser calculado por meio do produto do número real de estações de trabalho ( $K$ ) e o tempo de ciclo teórico ( $C$ ) subtraindo o somatório do tempo de cada estação, conforme equação (2) (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009).

$$Ociosidade = K \cdot C - \sum_{i=1}^N t_i \quad (2)$$

A eficiência pode ser calculada por meio da razão do somatório dos tempos das tarefas (considerando  $N$  tarefas presentes na linha) com o produto do tempo de ciclo teórico e número real de estações de trabalho, de acordo com Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009), e conforme apresentado na Equação (3):

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

Atraso de balanceamento é o percentual do tempo ocioso total presente na linha com relação ao tempo total gasto pelo produto para percorrer toda linha de produção. É calculado conforme a equação (4) (RAO, 1971).

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

Outro indicador relacionado à eficiência da linha é o índice de suavidade. Obtido por meio da variação entre os tempos totais de trabalho de cada estação e o tempo total máximo entre as estações (RAO, 1971). Calculado pela equação (5):

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

Dessa forma se a variação dos tempos entre as estações for pequena, menor é o índice de suavidade, representando um balanceamento mais homogêneo. Caso contrário, sendo maior o índice de suavidade, maiores são as variações dos tempos de operações entre estações (GERHARDT, 2005).

### 2.2.3 Classificação das linhas de produção

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:** a estação gargalo determina o tempo de ciclo da linha, os produtos passam sucessivamente pelas estações em série.
- **Linhas em paralelo:** diminui tempo de ciclo da linha principal dividindo a demanda entre as estações.
- **Linhas em U:** permite o reaproveitamento dos postos de trabalho, o caminho percorrido para abastecimento da matéria-prima é menor.
- **Linhas *two-sided*:** destinadas a produtos grandes que demandam mais de um operador por estação, distribuição ao lado do produto.

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

- **Linhas de modelo único:** produção de um único produto, sem alteração das tarefas ao longo do fluxo.
- **Linhas de modelo misto:** produção de mais de um modelo simultaneamente, sendo necessária variações no processo com tarefas específicas para cada modelo.

- **Linhas multi-modelo:** diferentes produtos produzidos na mesma linha, porém em lotes separados. Necessidade de ser rebalanceada de acordo com o lote a ser produzido.

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:** produto se movimenta de forma simultânea em cada estação, sendo que o operador se desloca na estação de forma a acompanhar o fluxo do produto em movimento.

- **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. Na primeira a transferência de produtos nas estações é simultânea e a liberação ocorre quando os postos de trabalho concluem as atividades. Já nas linhas de passo não sincronizado, cada estação apresenta um tempo de ciclo diferenciado, o que pode gerar esperas para movimentar ou receber produto. Tal problema pode ser minimizado com o uso de *buffers* ou magazines que atuam como estoques temporários minimizando efeitos de desbalanceamento.

Tópicos relacionados ao balanceamento (abordagem do balanceamento, função objetivo e tempo de execução) serão tratados na seção (2.3).

## 2.3 BALANCEAMENTO DE LINHA

O balanceamento de linha consiste na análise da linha de produção a fim de dividir igualmente o trabalho nas estações e, por consequência, minimizar as estações de trabalho necessárias na linha (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Segundo Scholl e Becker (2006), a decisão de alocar de maneira otimizada as tarefas entre as estações de trabalho, tendo como foco principal minimizar os tempos ociosos e o tempo de ciclo é um ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*).

O balanceamento de linha é demandado em três grandes momentos: primeiro durante a sua instalação, segundo quando é necessário alterar seu índice de produção e, por fim, quando há grande alteração de produto/processo (KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009).

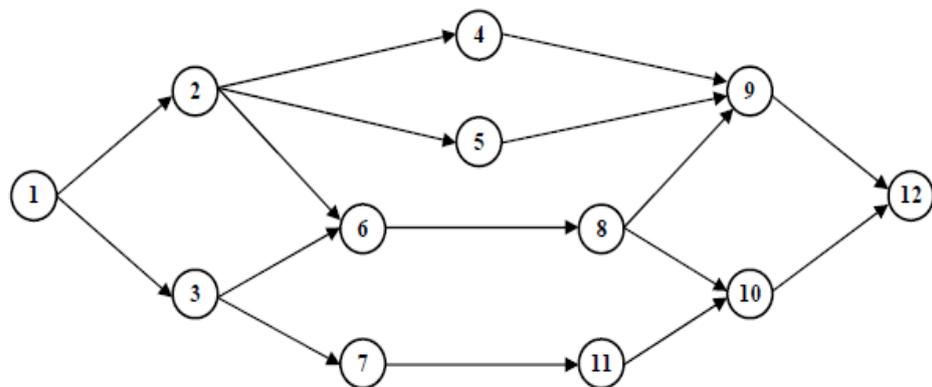
O objetivo do balanceamento de linha é a minimização do tempo ocioso dos postos de trabalho, os quais são derivados da distribuição desproporcional de tarefas. Essa minimização tende a homogeneizar a distribuição de tarefas entre os postos de trabalho e os operadores, maximizando o fluxo produtivo e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

A montagem ou manufatura de um produto exige que uma série de tarefas sejam realizadas. As tarefas têm um tempo próprio de execução bem como limitações tecnológicas ou operacionais. Outro ponto de análise são as relações de precedências entre as tarefas, algumas não podem ser realizadas antes de outras por questões de processo ou montagem. Portanto um ALBP pode ser dividido em três elementos básicos: Diagrama de precedências, estações de trabalho e um objetivo a ser otimizado (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

A Figura 5 exemplifica um caso de ALBP a ser resolvido com objetivo de diminuição de tempo de ciclo.

**Figura 5 – Lista de tarefas e diagrama de precedência**

<i>Tarefa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Duração</i>	<i>Predecessor</i>
1	Preparação da caixa de montagem	3	-
2	Montagem da PCI com módulo de potência	6	1
3	Montagem da PCI com pré-amplificador	7	1
4	Montagem do filtro do amplificador	6	2
5	Montagem do circuito "push-pull"	4	2
6	Conexão das PCIs	8	2,3
7	Colocação/soldagem do circuito do pré-amplificador	9	3
8	Ajuste de conectores	11	6
9	Colocação do dissipador do <i>push-pull</i>	2	4,5,8
10	Colocação de quadro de proteção	13	8,11
11	Montagem da proteção eletrostática	4	7
12	Acabamento/embalagem	3	9,10



Fonte: Magatão, 2016

### 2.3.1 Balanceamento de linha de montagem de modelo simples

Os problemas SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*) são tipos de ALBP com hipóteses simplificadoras (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007):

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

A principal premissa da SALBP é que o tempo de ciclo é o mesmo para todas as estações de trabalho. Desta forma o tempo das tarefas não pode ultrapassar o tempo de ciclo, mas podem ser executadas em um tempo menor, gerando um tempo ocioso (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2007). Em um cenário de balanceamento de linha o principal objetivo da resolução de um SALBP é diminuir o tempo ocioso.

Boysen, Fliedner e Scholl (2007), classificam o SALBP em quatro tipos:

- SALBP-1: Objetivo é minimizar a quantidade de estações de trabalho com um tempo de ciclo determinado.
- SALBP-2: Objetivo minimizar o tempo de ciclo com o número de estações já determinado.
- SALBP-E: Objetivo é maximizar a eficiência da linha com número de estações e tempo de ciclos variáveis.
- SALBP-F: Problema que verifica, dados um tempo de ciclo e um número de estações pré-estabelecidos, a viabilidade da solução.

Becker e Scholl (2006), elaboraram um comparativo dos tipos de SALBP, conforme Tabela 3:

**Tabela 3 – Comparativo entre os tipos de SALBP**

	Tempo de ciclo	
	Dado	Minimizar
Número de estações		
Dado	SALBP-F	SALBP-2
Minimizar	SALBP-1	SALBP-E

**Fonte: Becker e Scholl (2006)**

### 2.3.2 Balanceamento de linha de montagem de modelo misto

O conceito de MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*) é um problema mais recorrente nas linhas de montagem de manufatura modernas, em que a demanda é caracterizada pela alta versatilidade de modelos com volumes significativos. Um MALBP faz considerações adicionais ao SALBP tornando a abordagem de solução mais complexa (BUKCHIN e RUBINOVITZ, 2006).

Em síntese o problema de balanceamento de uma linha de montagem de modelo-misto pode ser simplificado como um número de modelos com tarefas, tempos de execução, restrições e precedências próprias com o objetivo de realocar as tarefas de modo que as restrições e precedências sejam respeitadas e algum parâmetro seja otimizado (EREL e GOKEN, 1999).

Thomopoulos (1967, 1970) foi o primeiro a descrever uma metodologia de análise de um MALBP. Sua proposta consistia basicamente em elaborar um modelo médio de produção, fazendo a média ponderada conforme o volume de produção de cada um dos modelos, por fim ele aplicava conceitos de SALBP para obter a solução para a média dos modelos.

Merengo, Nava e Pozzetti (1999), propuseram um conceito de balanceamento vertical e horizontal com o objetivo de minimizar o número de retrabalhos no processo, minimizando o número de tarefas incompletas em cada estação de trabalho. O balanceamento vertical é realizado primeiramente para equalizar as cargas de trabalho entre as estações da linha para um único produto. O segundo passo é realizar o balanceamento horizontal que visa a equalizar as cargas de trabalho de uma estação para os diferentes produtos manufaturados. Um bom balanceamento horizontal permite que a linha seja mais facilmente adaptada em caso de variações de demanda.

A solução de MALBP a ser utilizada no presente projeto de pesquisa é a proposta em Sikora, Lopes e Magatão (2017). Nesta solução os autores também empregam o conceito de modelo equivalente, obtido pela demanda ponderada, mas desenvolvem um modelo em Programação Linear Inteira Mista que incorpora diferentes características práticas de linhas de montagem, tais como: restrições de zoneamento de tarefas e operadores, possibilidade de tarefas automáticas e semiautomáticas, possibilidade de tarefas que demandem mais de um operador para sua execução (tarefas comuns), além de permitir que deslocamentos de operadores entre estações de trabalho ocorram, mas minimizando-se os deslocamentos realizados pelos operadores.

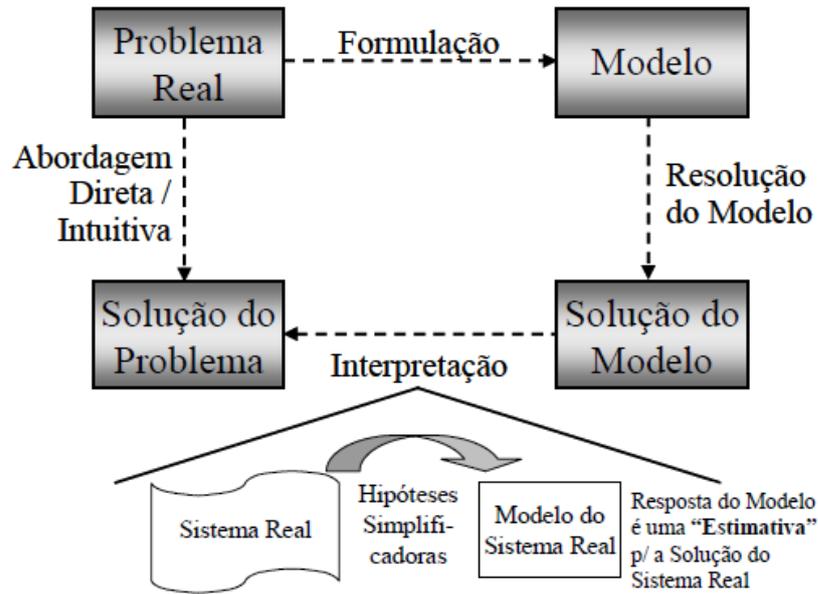
Com os avanços na área principalmente no ramo de programação linear inteira mista, problemas mais complexos estão sendo investigados. Um exemplo é o trabalho realizado por Michels, Lopes, Sikora e Magatão (2019) em que se tem uma proposta de balanceamento para o caso de vários operadores na mesma realizando tarefas na mesma estação de trabalho, cenário que ocorre normalmente em indústrias de produtos de grande porte como a automotiva.

Outro exemplo da evolução da aplicação é o Artigo de Lopes, Sikora, Michels e Magatão (2019), em que se propõe a modelagem de um problema de balanceamento, sequenciamento e alocação de buffer, o que representa basicamente todo o planejamento do modo de operação de uma linha. Essa modelagem tem o principal objetivo de ser aplicada para indústria de grande escala com produtos majoritariamente similares.

## **2.4 PROGRAMAÇÃO LINEAR**

Segundo Puccini e Pizzolato (1990), um modelo de Programação Linear consiste em, a partir da idealização da realidade, representar variáveis e restrições de um sistema real, conforme ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 – Conceitos essenciais de modelo em Programação Matemática**

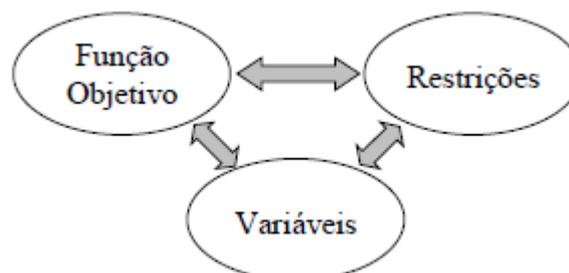


**Fonte: Magatão, 2016**

Portanto, a similaridade do modelo com a realidade torna possível conclusões acerca do problema real com base na análise do modelo proposto. Dentre os modelos de Programação Matemática, a Programação Linear é um caso particular em que as variáveis, as restrições e a função objetivo são contínuas e apresentam comportamento linear (GOLDBARG e LUNA, 2005).

Bradley, Hax e Magnanti (1977), definem Programação Linear (PL) como a maximização ou minimização de uma função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições lineares. Conforme ilustrado na Figura 7:

**Figura 7 – Conexão entre variável, restrições e função objetivo**



**Fonte: Magatão, 2016**

- **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:** Variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Já parâmetros são valores pré-fixados, dados de entrada (LISBOA, 2002).

#### 2.4.1 Hipóteses da programação linear

A formulação linear só pode ser aplicada perante algumas hipóteses definidas por Puccini (1975):

- **Certeza (Determinístico):** os coeficientes utilizados no modelo são constantes no problema.
- **Divisibilidade:** as variáveis podem assumir qualquer 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.

#### 2.4.2 Formulação Matemática de Programação Linear

O principal foco da Programação Linear é minimizar ou maximizar uma função objetivo, com um conjunto de restrições (equações ou inequações) lineares (GOLDBARG E LUNA, 2005). De acordo com Bradley, Hax e Magnanti (1977), o problema linear é formulado da seguinte maneira, Equação (6):

$$\begin{aligned} \max \quad & cx \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{6}$$

Em que,  $x$  é um vetor coluna  $n$ -dimensional contendo as variáveis do modelo,  $c$  é um vetor linha com os fatores de ponderação,  $b$  é um vetor coluna  $m$  dimensional que define o número de equações do sistema e  $A$  é uma matriz  $m$  por  $n$  (MAGATÃO, 2016).

Uma forma alternativa de escrita sem a utilização de matrizes é a formulação de (PUCCINI, 1975), conforme Equação (7):

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

Tendo como restrições:

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

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

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.

#### 2.4.3 Programação Linear Inteira Mista (PLIM)

Os modelos em Programação Linear apresentam uma limitação por permitirem somente o uso de valores fracionários. Em diversos contextos práticos e teóricos, muitas das variáveis devem assumir necessariamente valores inteiros, como número de funcionários ou estações de trabalho. Para isso utiliza-se a Programação Linear Inteira (PLI) afim de restringir os valores a domínios discretos (LISBOA, 2002). Já para

problemas em que nem todas as variáveis sejam restritas a valores inteiros utiliza-se a Programação Linear Inteira Mista (PLIM) (BRADLEY, HAX E MAGNANTI, 1977).

A formulação base para a PLIM é dada por Magatão (2016):

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j + \sum_{i \in I} c_i y_i \quad (8)$$

Devendo satisfazer as seguintes restrições:

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

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in J$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in I$$

Onde:

$x_j, y_i$  Representam as variáveis de decisão contínuas e inteiras respectivamente;

$c_i, c_j, a_{kj}, a_{ki}$  Representam os coeficientes de custo, das restrições das variáveis contínuas e das variáveis inteiras, respectivamente;

$b_k$  Representa as restrições de recursos;

$J, I, K$  São o conjunto de variáveis contínuas, variáveis inteiras e de restrições respectivamente;

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

Embora o método seja muito versátil, Williams (2013), ressalta que, matematicamente os modelos de Programação Linear Inteira Mista envolvem uma quantidade consideravelmente maior de cálculos quando comparados à resolução de modelos de PL. Magatão (2005), ressalta, contudo, que por meio de formulações baseadas em conjunções e disjunções, é possível representar uma grande variedade de problemas práticos por meio de modelos em PLIM.

A Programação Linear Inteira Mista já foi utilizada em várias aplicações práticas como no caso de Suginoshita e França (2017), em que se utilizou o método para resolver um problema de balanceamento causado por uma mudança no *mix* produtivo da linha de motores a combustão. Outro caso também abordado como trabalho de conclusão de curso foi o de Leal e Grespan (2018), em que se utilizou a PLIM para otimizar uma linha de montagem de motores diesel que não havia sido balanceada após mudanças de produtos.

O método não se restringe somente a aplicações clássicas, em que se tem estações de trabalho bem definidas e operadores em cada estação, um exemplo é o estudo de caso de Lopes, Sikora, Molina, Schibelbain, Rodrigues e Magatão (2017), em que foi possível otimizar uma linha de solda ponto robótica em 6.6% na questão de tempo de ciclo.

No presente trabalho se faz uso de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista para realizar o balanceamento de uma linha de modelo misto. O Capítulo 3 a seguir detalha a metodologia adotada para otimizar o referido cenário produtivo.

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta uma proposta de metodologia para a realização do trabalho. Esta proposta foi baseada em procedimentos adotados por Suguioshita e França (2017) e por Leal e Grespan (2018). Os autores supracitados estudaram problemas práticos de balanceamento de linhas produtivas em seus trabalhos de conclusão de curso. As metodologias aplicadas nesses casos mostraram-se eficazes. Desta forma, por se tratar também neste estudo de um contexto similar, a metodologia foi baseada nos procedimentos dos referidos trabalhos.

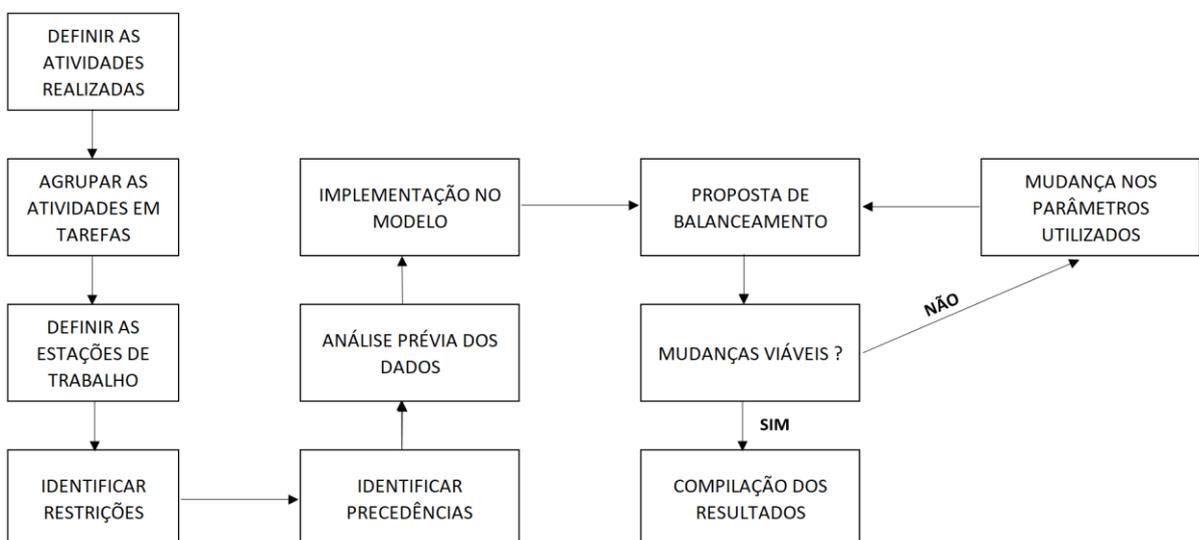
No contexto em análise, em um primeiro momento, realizou-se a compreensão das singularidades do processo estudado (linha de produção de bicos injetores), das tarefas a serem realizadas e, por fim, das precedências de execução entre as tarefas. Após a análise preliminar, elaborou-se o método para o seguimento da pesquisa, conforme detalhado na seção 3.1.

Os passos apresentados na seção 3.1.1 à 3.1.6 tiveram por finalidade mapear o estado atual da linha, que será apresentado na seção 4.1. Já os passos 3.1.7 a 3.1.11 foram utilizados para propor os modelos otimizados detalhados na seção 4.2.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A Figura 8 ilustra a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho.

**Figura 8 – Fluxograma do método utilizado**



**Adaptado: Suguioshita e França, 2017**

A seguir detalham-se as etapas apresentadas no diagrama apresentado na Figura 8.

### 3.1.1 Definir as atividades realizadas

Primeiramente foram levantadas todas as atividades a serem realizadas durante a execução do processo produtivo. Esse levantamento foi realizado por meio das instruções de trabalho (IT) fornecidas pela empresa.

### 3.1.2 Agrupar as atividades em tarefas

A segunda atividade consiste basicamente em analisar quais atividades são realizadas necessariamente em sequência e necessariamente no mesmo posto de trabalho e agrupá-las em um único bloco de tarefas, conforme a definição de Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009).

Alguns tempos das tarefas foram fornecidos pela própria empresa, mas se mostraram defasados em relação aos valores atualmente praticados. Portanto, foi necessária uma cronoanálise das tarefas para maior confiabilidade dos dados.

### 3.1.3 Definir as estações de trabalho

Como mencionado na seção 1.2, o foco do trabalho será voltado ao balanceamento da carga de trabalho dos operadores, uma vez que se mostraram mais restritivos ao tempo de ciclo do que as estações físicas de realização do trabalho. Há, inclusive, a possibilidade de movimentação de trabalhadores entre diferentes estações. Assim, as cargas de diferentes estações são somadas para configurar a carga do operador, além do tempo de deslocamento também associado à ocupação do trabalhador. Desta forma, configura-se que as estações de trabalho serão consideradas como os próprios operadores. Portanto, nessa etapa foi importante compreender com clareza quais tarefas eram executadas por cada operador.

### 3.1.4 Identificar as restrições

A primeira análise feita nesta etapa foi entender quais tarefas eram fixas a uma ou a algumas estações de trabalho. Essa etapa pode, inclusive, poupar esforços

computacionais para o modelo depois da implementação, visto que o espaço de busca de soluções é reduzido. A imposição das referidas restrições de operação facilita a posterior implementação da solução do *solver*.

### 3.1.5 Identificar as precedências

A seção 2.2.1, Figura 4, traz um exemplo teórico de um diagrama de precedências ilustrado em um grafo orientado, onde os nós são tarefas e os arcos representam as dependências de execução das tarefas. No contexto prático, foi necessário identificar os fluxos das tarefas de modo a se respeitar todas as restrições de sequência do processo. As restrições podem ser restrições de montagem ou simplesmente restrições atreladas a requisitos de qualidade, mas todas devem ser consideradas para se convergir para uma solução de balanceamento viável.

### 3.1.6 Análise prévia dos dados

Essa fase é importante para, após a coleta de todos os dados, validar os parâmetros de entrada a serem fornecidos ao modelo matemático. Deste modo, buscou-se trabalhar os dados atuais para averiguar possíveis erros e consolidar os parâmetros a serem usados.

### 3.1.7 Implementação no modelo

Nessa fase todas as tarefas e restrições do processo são implementadas no modelo matemático de otimização. Este modelo matemático foi apresentado por Sikora, Lopes e Magatão (2017) e os autores do presente trabalho têm acesso a uma versão já implementada do modelo matemático no ambiente IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.8. Tal ambiente computacional permite a resolução de modelos matemáticos de otimização implementados em Programação Linear Inteira Mista.

### 3.1.8 Proposta de balanceamento

Após o uso do modelo matemático é obtida uma proposta de balanceamento, isto é, uma solução das variáveis do modelo matemático é proposta, solução esta que respeita as condições pré-estabelecida no sistema.

### 3.1.9 Mudanças viáveis

Nessa etapa deve-se analisar todas as mudanças propostas pelo *solver* e verificar com um especialista da linha a viabilidade de implementação das mesmas. A não viabilidade da solução apresentada se dá pela entrada de parâmetros inconsistentes no modelo matemático. Por exemplo, deixar de colocar uma relação de precedência direta entre tarefas pode ocasionar uma solução não realizável. Se corrigida esta questão da precedência, o modelo matemático retornará uma solução que respeita a referida condição.

### 3.1.10 Mudanças nos parâmetros utilizados.

Caso as mudanças não sejam viáveis para implementação prática, alguma restrição deve ser repensada no sistema para que, no final do processo de proposta de balanceamento, seja possível propor uma solução que seja aplicável na prática e que traga benefícios significativos para a linha.

### 3.1.11 Compilação dos resultados

Após obter uma proposta implementável os resultados obtidos devem ser devidamente analisados e compilados de modo a mostrar claramente os benefícios obtidos e as dificuldades de implementação para que essa análise possa ser utilizada em futuros trabalhos ou em futuros balanceamentos na linha estudada.

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 usinagem são evidenciadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentadas o estado atual da linha (seção 4.1). Em seguida são apresentadas as principais considerações, os dois cenários otimizados e seus respectivos resultados (seção 4.2). Por fim, todos os dados obtidos são compilados, orçados e analisados nas seções 4.3 e 4.4.

Os resultados computacionais apresentados a partir da seção 4.2 foram obtidos com o uso do ambiente de modelagem e resolução computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.8. Utilizou-se um computador com processador de 6ª geração Core i7 (2.40 GHz) e 8 GB de memória RAM. O tempo de execução máximo do modelo foi estabelecido como 10 minutos. Todas as execuções computacionais foram executadas até a otimalidade dentro do tempo limite estabelecido.

### 4.1 ANÁLISE DO ESTADO ATUAL

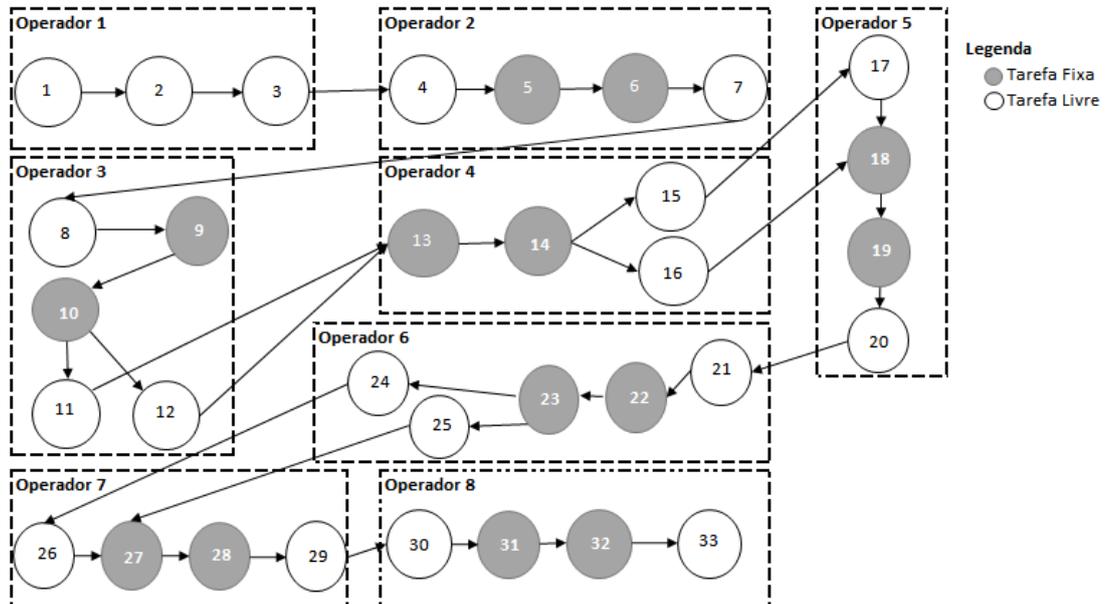
Inicialmente os passos descritos nos tópicos 3.1.1 a 3.1.6 foram realizados para cada modelo individualmente e depois foi consolidado um diagrama de modelo misto. Tal metodologia adotada ajudou a equipe a ter visibilidade das particularidades de cada modelo antes de efetivamente definir o modelo misto. Outro ponto importante é a relativa facilidade de adaptação do método em caso de extinção de alguma família de produtos.

Todos os diagramas de precedência foram construídos conforme premissa de análise que considerava as máquinas como fixas. Este procedimento foi adotado para evitar soluções com grandes deslocamentos de máquinas e, conseqüentemente, inviáveis financeiramente.

#### 4.1.1 Modelo 1 – Famílias C, D, E e J

Primeiramente foi feita a análise para o modelo 1, o diagrama de precedência e a análise dos tempos estão nas Figuras 9 e 10 e na Tabela 4.

**Figura 9 – Diagrama de Precedência modelo 1**



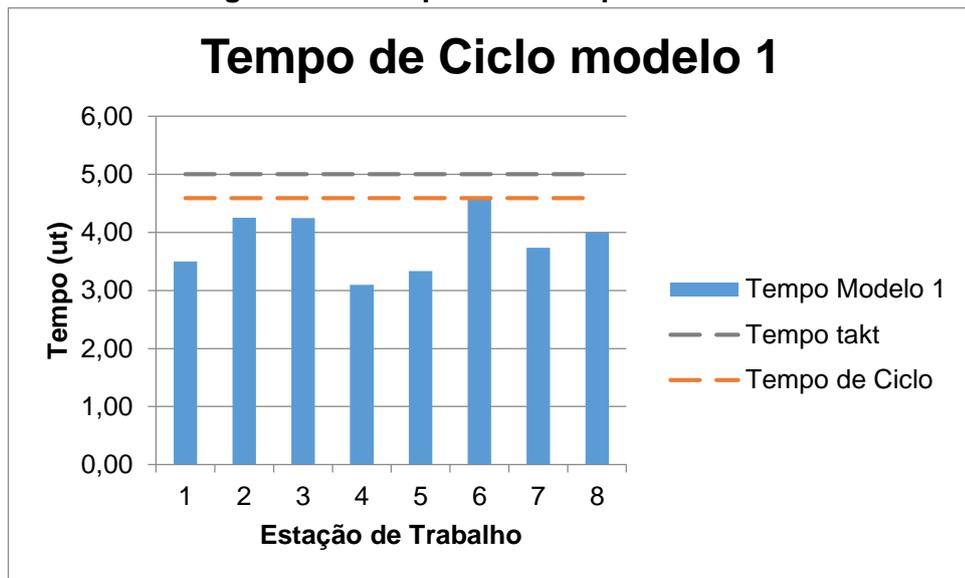
Fonte: Os autores, 2019

**Tabela 4 – Tempos de ciclo para o modelo 1**

Estação de trabalho	Tempo Atual (ut)
1	3,50
2	4,25
3	4,25
4	3,10
5	3,33
6	4,59
7	3,73
8	4,00

Fonte: Os autores, 2019

Figura 10 – Tempos de ciclo para o modelo 1



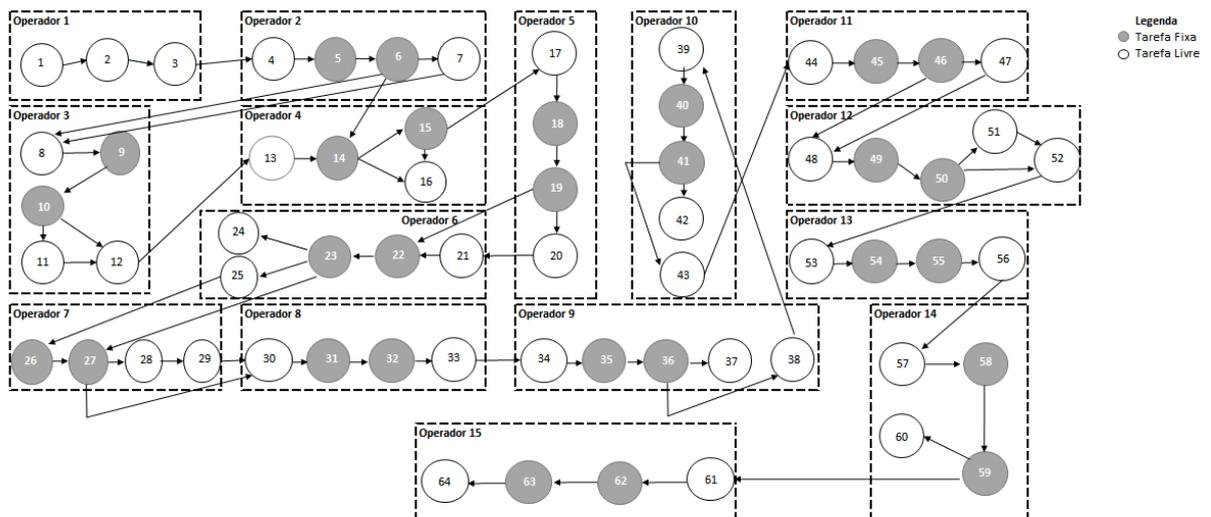
Fonte: Os autores, 2019

Para o Modelo 1 podemos notar, por exemplo, um potencial de melhoria nas estações 2, 3 e 6 que apresentaram os maiores tempos e a estação 4 que está com o tempo 22% abaixo do tempo de ciclo (estação 6).

#### 4.1.2 Modelo 2 – Famílias A, B e G

Em seguida foi feita a análise para o modelo 2, o diagrama de precedência e a análise dos tempos estão nas Figuras 11 e 12 e na Tabela 5:

Figura 11 – Diagrama de Precedência modelo 2



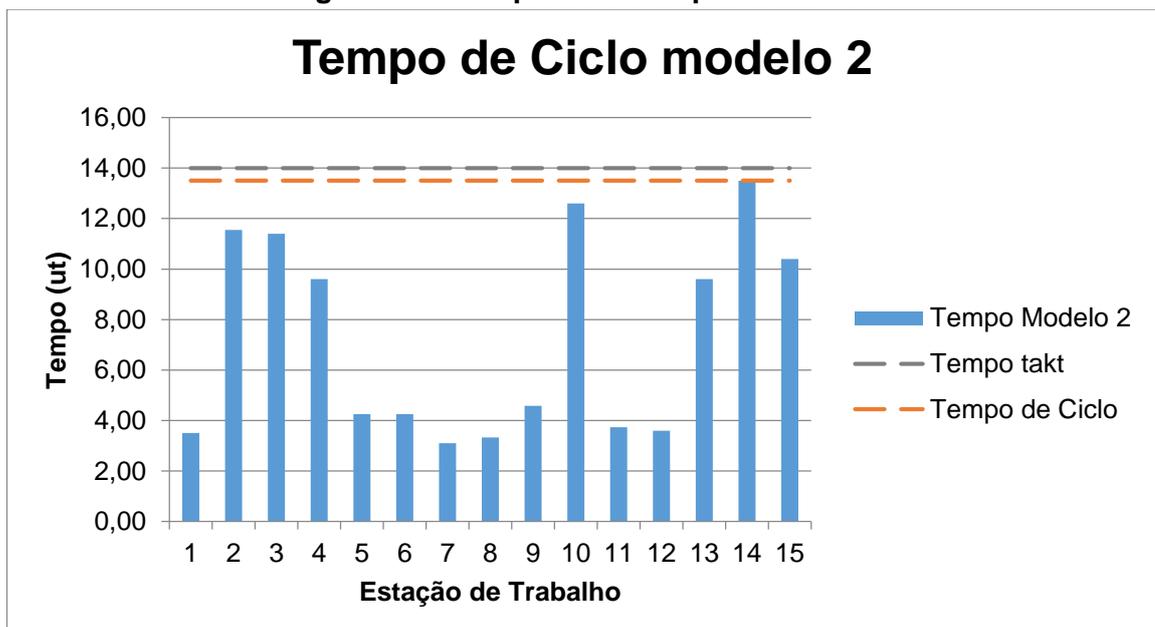
Fonte: Os autores, 2019

Tabela 5 – Tempos de ciclo para o modelo 2

Estação de trabalho	Tempo Atual (ut)
1	3,50
2	11,55
3	11,40
4	9,60
5	4,25
6	4,25
7	3,10
8	3,33
9	4,59
10	12,60
11	3,73
12	3,60
13	9,60
14	13,50
15	10,40

Fonte: Os autores, 2019

Figura 12 – Tempos de ciclo para o modelo 2



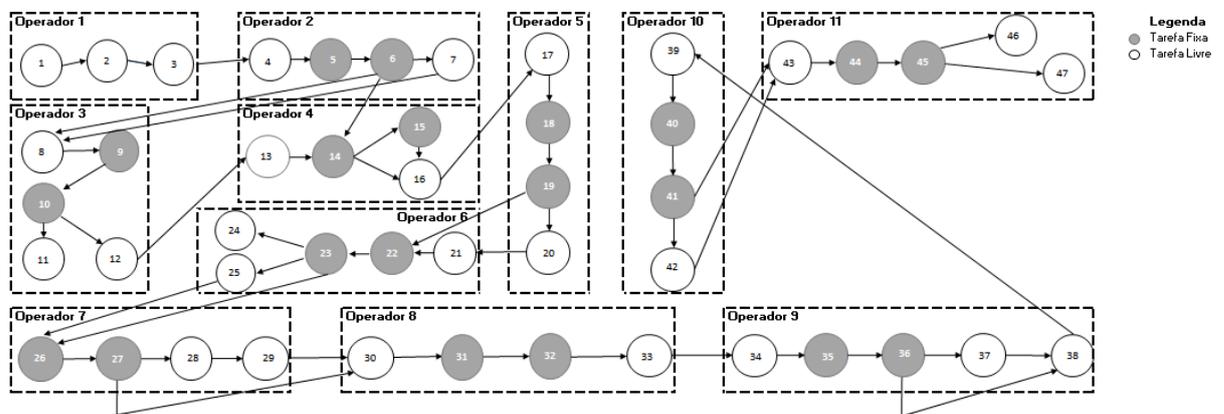
Fonte: Os autores, 2019

Diferentemente do modelo 1, o modelo 2 (de menor demanda) apresenta maiores variações, principalmente na estação 7, a qual apresenta um tempo 77% menor que o tempo de ciclo. A principal razão dessa defasagem de tempos é que a estação 7 é comum ao modelo 1, que tem a maior demanda, enquanto a estação 14 é exclusiva do modelo 2.

#### 4.1.3 Modelo 3 – Famílias F, H e I

Por fim foi feita a análise para o modelo 3, o diagrama de precedência e a análise dos tempos estão nas Figuras 13 e 14 e na Tabela 6:

**Figura 13 – Diagrama de Precedência modelo 3**



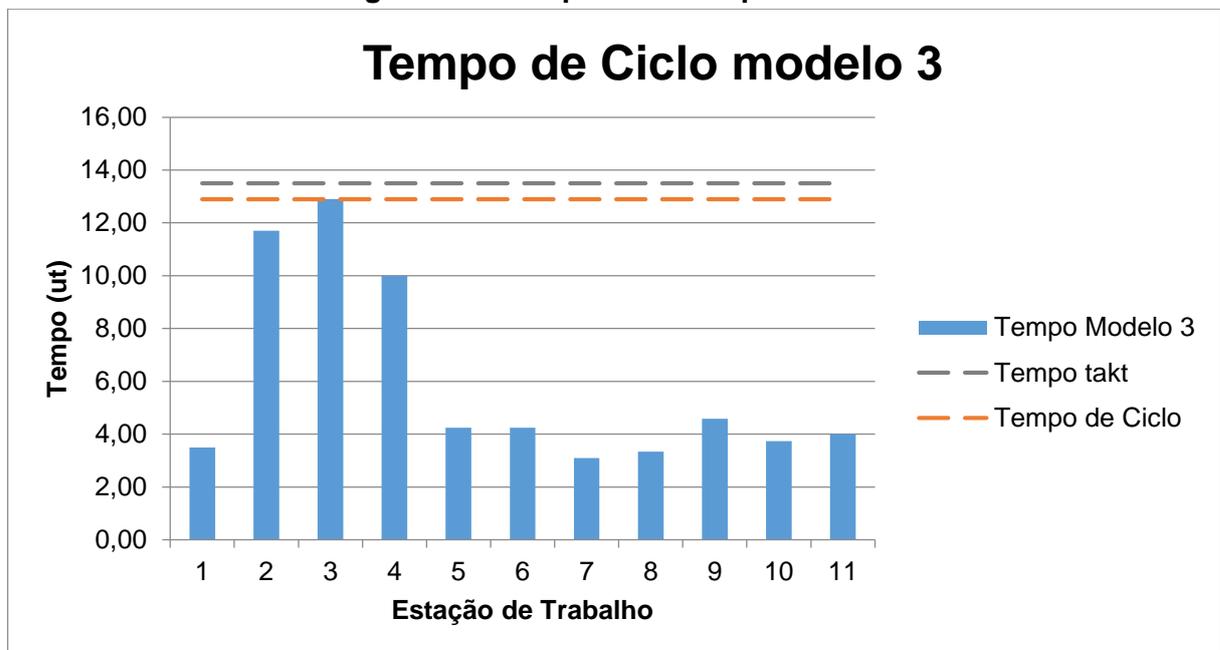
Fonte: Os autores, 2019

Tabela 6 – Tempos de ciclo para o modelo 3

Estação de trabalho	Tempo Atual (ut)
1	3,50
2	11,70
3	12,90
4	10,00
5	4,25
6	4,25
7	3,10
8	3,33
9	4,59
10	3,73
11	4,00

Fonte: Os autores, 2019

Figura 14 – Tempos de ciclo para o modelo 3



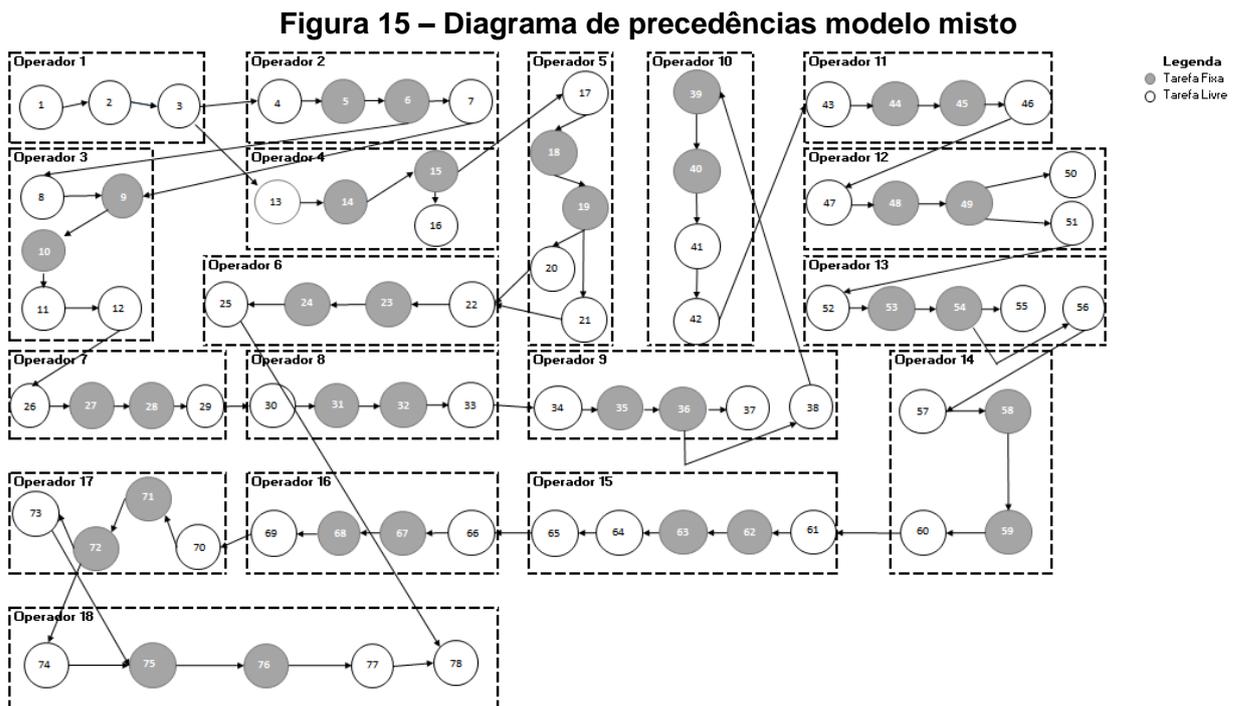
Fonte: Os autores, 2019

Para o modelo 3 notamos a mesma defasagem apontada no modelo 2, enquanto as estações comuns ao modelo um apresentam um tempo bem abaixo do tempo de ciclo, máximo de 76% abaixo na estação 7, as estações 2, 3 e 4 que são exclusivas do modelo 3 apresentam tempos relativamente elevados em comparação ao tempo de ciclo.

#### 4.1.4 Modelo Misto - Modelo 1, 2 e 3

Por fim, tendo informações suficiente para cada um dos modelos considerados, todas as tarefas foram agrupadas e estão disponíveis para consulta no Apêndice A.

Em seguida foram identificadas as precedências e restrições para o modelo misto e consolidados no diagrama apresentado na Figura 15:



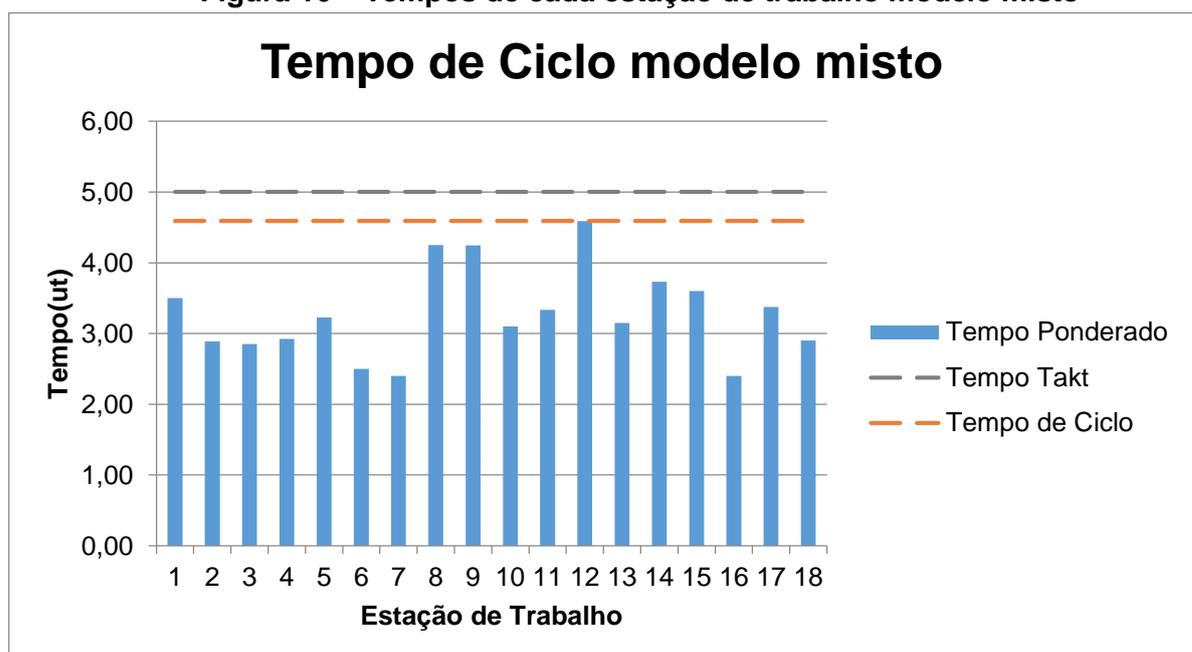
**Fonte: Os autores, 2019**

Com o diagrama consolidado para todas as famílias foi possível determinar o tempo de cada estação de trabalho, considerando o tempo ponderado pelo *mix* de produção, considerado no modelo e citado na seção 1.2. Os tempos consolidados por cada estação, bem como a comparação com o tempo de ciclo e tempo *takt* estão na Tabela 7 e Figura 16.

**Tabela 7 – Tempos de ciclo para o modelo misto**

Estação de trabalho	Tempo Atual (ut)
1	3,50
2	2,89
3	2,85
4	2,93
5	3,23
6	2,50
7	2,40
8	4,25
9	4,25
10	3,10
11	3,33
12	4,59
13	3,15
14	3,73
15	3,60
16	2,40
17	3,38
18	2,90

Fonte: Os autores, 2019

**Figura 16 – Tempos de cada estação de trabalho modelo misto**

Fonte: Os autores, 2019

Para o modelo misto pode-se observar que as grandes variações do modelo 2 e 3 são mitigadas devido à menor demanda do produto. Apesar disso, a estação 7 ainda apresenta um tempo 48% abaixo do tempo de ciclo.

Nota-se pela Figura 16 que foram consideradas 18 estações de trabalho, número de operadores para a linha em análise do projeto de pesquisa, sendo que no estado atual alguns operadores trabalham apenas para um único grupo de famílias, por exemplo os operadores 2, 3, 7, 13, 16 e 17 estão presentes apenas no modelo 2, enquanto 4, 5 e 6 são apenas do modelo 3.

Importante ressaltar que o tempo de ciclo ponderado é o mesmo do modelo 1, isso acontece, pois, as tarefas presentes no modelo 1 são comuns a todos os modelos e o tempo delas não apresenta variações independentemente do modelo em análise. Portanto as estações 1, 8, 9, 10, 11, 12, 14 e 15 apresentam o mesmo tempo do que o considerado para o modelo 1.

## 4.2 CENÁRIOS OTIMIZADOS

Após levantamento do estado inicial foram definidos dois cenários de análises:

- i. Cenário ideal: consideramos todas as máquinas como móveis e todos os operadores eram capazes de realizar todas as atividades.
- ii. Cenário implementável: consideramos as máquinas como fixas e as operações mais técnicas, como retificações, só poderiam ser realizadas por funcionários mais capacitados tecnicamente.

A otimização proposta baseia-se em premissas válidas para o estado atual dos funcionários, das máquinas e da linha como um todo, a saber:

- Todos os funcionários realizam os deslocamentos e atividades básicas no mesmo tempo, ou seja, não existe variações de tempo de cada tarefa de acordo com o funcionário que a executa. Contudo, conforme anteriormente mencionado, pode-se considerar que algumas tarefas devem ser desempenhadas exclusivamente por funcionários com capacitação específica.
- As tarefas referentes a abastecimento de máquina e tempo de máquina devem ser realizadas pelo mesmo funcionário e em uma estação de trabalho.
- As mudanças executadas na linha não afetariam o tempo das tarefas e nem os deslocamentos considerados no modelo.

- Famílias L, M e N não foram analisadas nesse trabalho pelo fato de apresentarem baixa demanda dentro do cenário atual.
- Os investimentos levantados não levam em conta o impacto do tempo de linha parada para modificações mais simples e rápidas de serem implementadas, pois essas modificações menores devem ser implementadas durante paradas de produção programadas. Contudo, no caso de movimentações de máquinas, os referidos custos de linha parada devem ser considerados.

O objetivo principal dessa seção 4.2 é apresentar os resultados atingidos com o método de otimização, as comparações e discussões acerca dos resultados obtidos serão feitas na seção 4.3.

Para ambos os cenários a função objetivo de otimização considerada foi conforme a Equação (9):

$$\min z = M * CT + 100 * M * MaxDifST \quad (9)$$

Em que:

*M*: Representa o peso referente à variável em questão;

*CT*: Representa o tempo de ciclo (máximo tempo entre as estações de trabalho);

*MaxDifST*: Representa a máxima diferença entre os tempos das estações de trabalho.

A priorização da função *MaxDifST* em relação ao tempo de ciclo ocorreu devido à uma série de testes preliminares em que se aumentava o peso da variável sem que houvesse alteração do tempo de ciclo. Com essa priorização foi possível obter uma solução com o tempo de ciclo otimizado e com menos diferença entre a carga de trabalho dos operadores. Não foi considerado redução no número de operadores e os tempos ociosos foram acrescentados nos tempos das atividades de modo a serem balanceados pela função *MaxDifST*.

No caso do cenário ideal, a implementação do problema de balanceamento no ambiente IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* resultou em um modelo matemático com 4270 variáveis (4230 binárias) e 7603 restrições. Para o cenário implementável, o modelo matemático gerado apresentou 2536 variáveis (2496 binárias) e 4713 restrições.

#### 4.2.1 Cenário Ideal

O objetivo do cenário ideal é entender o maior potencial produtivo da linha atual. Nesse intuito todas as restrições que poderiam ser mitigadas com investimento financeiro não foram consideradas e atividades fixas podem ser móveis.

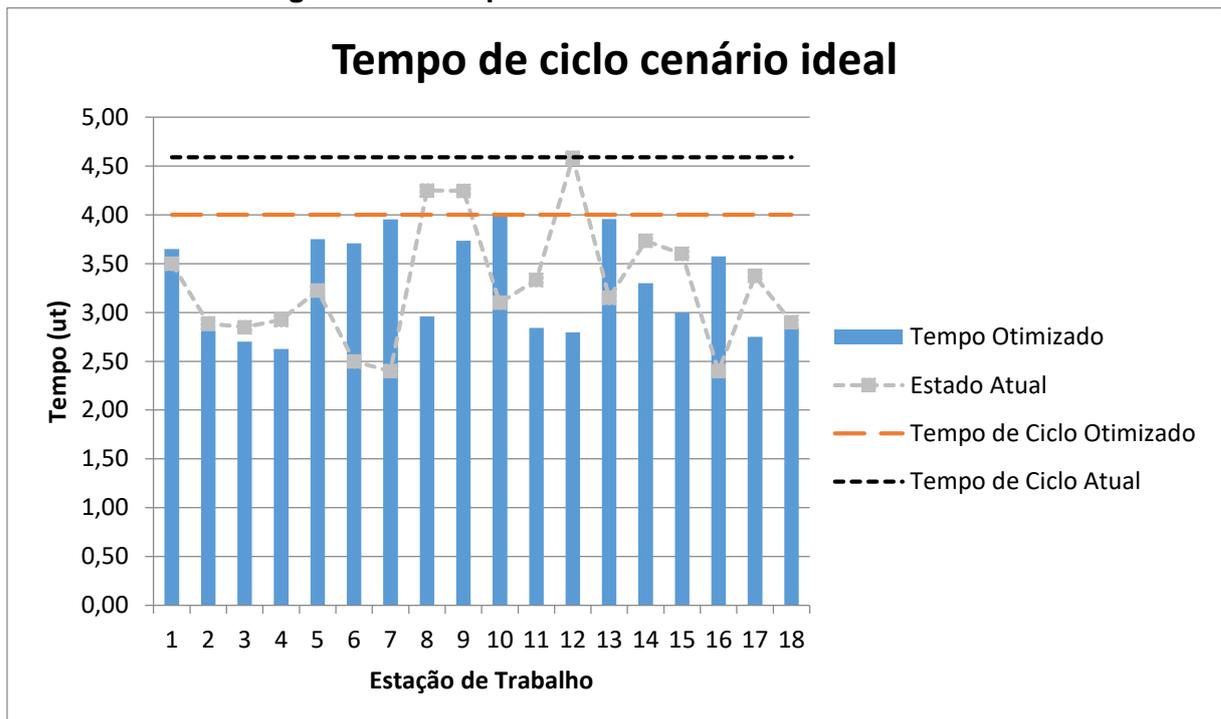
Os resultados obtidos com a otimização considerando o cenário ideal constam na Figura 17 e na Tabela 8.

**Tabela 8 – Tempos de ciclo modelo misto cenário ideal**

<b>Estação de trabalho</b>	<b>Tempo Otimizado (ut)</b>
1	3,65
2	2,81
3	2,70
4	2,63
5	3,75
6	3,71
7	3,95
8	2,96
9	3,73
10	4,00
11	2,84
12	2,80
13	3,96
14	3,30
15	3,00
16	3,58
17	2,75
18	2,85

**Fonte: Os autores, 2019**

Figura 17 – Tempos de ciclo modelo misto cenário ideal



Fonte: Os autores, 2019

No cenário Ideal notamos que houve uma melhoria no tempo de ciclo de 0,59 ut em relação ao estado atual. Apesar do processo estar mais nivelado ainda se observa uma diferença entre a estação 7 e o tempo de ciclo é de 32,5%.

Para que fosse possível implementar essas melhorias, foram elencadas todas as mudanças propostas pelo método, definidos planos de ação para implementá-las na linha e orçado o impacto financeiro de cada mudança. Esses detalhes se encontram na Tabela 9. Vale notar que os valores monetários envolvidos são detalhados em unidades monetárias (\$) de modo a preservar valores reais envolvidos no chão-de-fábrica. Contudo, os referidos valores monetários possuem proporções representativas do caso real avaliado.

**Tabela 9 – Lista de mudanças propostas com planos de ação e investimento estimado cenário ideal (Continua)**

<b>Tarefa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Estação Atual</b>	<b>Estação Proposta</b>	<b>Plano de Ação</b>	<b>Investimento (\$)</b>
7	Deslocamento	2	3	Gestão operadores;	\$ 0,00
12	Depositar peças para exame visual	3	4	Gestão operadores;	\$ 0,00
13	Retirada de peças	4	1	Gestão operadores;	\$ 0,00
14	Alimentação da máquina	4	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
15	Lapidação furo de óleo	4	6	Realocação das máquinas responsáveis pela lapidação de óleo;	\$ 10.000,00
16	Deslocamento	4	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
17	Preparação do suporte	5	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
18	Alimentação da máquina	5	11	Gestão operadores;	\$ 0,00
19	Lavagem após extrudação	5	11	Realocação do tanque de enxaguamento/lavadora;	\$ 8.000,00
20	Check visual	5	11	Gestão operadores;	\$ 0,00
21	Deslocamento	5	17	Gestão operadores;	\$ 0,00
22	Preparação do suporte de lavagem	6	17	Gestão operadores;	\$ 0,00
23	Alimentação da máquina	6	18	Gestão operadores;	\$ 0,00
24	Lavadora	6	18	Realocação da lavadora;	\$ 12.000,00
25	Deslocamento	6	18	Gestão operadores;	\$ 0,00
26	Retirada de peças	7	4	Gestão operadores;	\$ 0,00
27	Alimentação equipamento	7	4	Gestão operadores;	\$ 0,00
28	Exame visual	7	4	Gestão operadores;	\$ 0,00
29	Deslocamento	7	4	Gestão operadores;	\$ 0,00
30	Retirada de peças	8	5	Gestão operadores;	\$ 0,00
31	Alimentação da máquina	8	5	Gestão operadores;	\$ 0,00
32	Retífica do chanfro auxiliar	8	5	Realocação das máquinas retificadoras;	\$ 5.000,00
33	Deslocamento	8	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
34	Retirada de peças	9	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
35	Alimentação da máquina	9	7	Gestão operadores;	\$ 0,00
36	Retificação da guia e assento	9	7	Realocação das máquinas retificadoras;	\$ 140.000,00
37	Inspeção formas e visual	9	8	Gestão operadores;	\$ 0,00
38	Deslocamento	9	7	Gestão operadores;	\$ 0,00
39	Alimentação da máquina	10	8	Gestão operadores;	\$ 0,00
40	Escovar diâmetro da guia	10	8	Realocação das rebarbadoras;	\$ 8.000,00

**Tabela 9 – Lista de mudanças propostas com planos de ação e investimento estimado cenário ideal (Continuação)**

Tarefa	Descrição	Estação Atual	Estação Proposta	Plano de Ação	Investimento (\$)
41	Inspeção	10	8	Gestão operadores;	\$ 0,00
42	Deslocamento	10	9	Gestão operadores;	\$ 0,00
43	Preparação do suporte de lavagem	11	9	Gestão operadores;	\$ 0,00
44	Alimentação da máquina	11	9	Gestão operadores;	\$ 0,00
45	Lavadora	11	9	Realocação da lavadora;	\$ 12.000,00
46	Deslocamento	11	9	Gestão operadores;	\$ 0,00
47	Retirada de peças	12	9	Gestão operadores;	\$ 0,00
48	Alimentação da máquina	12	10	Gestão operadores;	\$ 0,00
49	Retificação forma externa e cúpula	12	10	Realocação das máquinas retificadoras;	\$ 80.000,00
51	Deslocamento	12	11	Gestão operadores;	\$ 0,00
52	Retirada de peças	13	11	Gestão operadores;	\$ 0,00
53	Alimentação da máquina	13	12	Gestão operadores;	\$ 0,00
54	Rebarbação furos de injeção	13	12	Realocação das bancadas de rebarbar furo;	\$ 5.000,00
55	Inspeção Visual	13	14	Gestão operadores;	\$ 0,00
57	Preparação do suporte de lavagem	14	13	Gestão operadores;	\$ 0,00
58	Alimentação da máquina	14	13	Gestão operadores;	\$ 0,00
59	Lavadora	14	13	Realocação da lavadora;	\$ 12.000,00
60	Deslocamento	14	13	Gestão operadores;	\$ 0,00
61	Retirada de peças	15	14	Gestão operadores;	\$ 0,00
62	Alimentação da máquina	15	14	Gestão operadores;	\$ 0,00
63	Gravação	15	14	Realocação da gravadora;	\$ 8.000,00
64	Deslocamento	15	14	Gestão operadores;	\$ 0,00
66	Deslocamento	16	15	Gestão operadores;	\$ 0,00
67	Alimentação da máquina	16	15	Gestão operadores;	\$ 0,00
68	Inspeção	16	15	Realocação bancada de inspeção de fluxo;	\$ 5.000,00
69	Deslocamento	16	15	Gestão operadores;	\$ 0,00
70	Retirada de peças	17	16	Gestão operadores;	\$ 0,00
71	Alimentação da máquina	17	16	Gestão operadores;	\$ 0,00
72	Retificação superfície de vedação	17	16	Realocação das máquinas retificadoras;	\$ 20.000,00
73	Deslocamento	17	16	Gestão operadores;	\$ 0,00
74	Preparação do suporte de lavagem	18	16	Gestão operadores;	\$ 0,00
75	Alimentação da máquina	18	17	Gestão operadores;	\$ 0,00
76	Lavadora	18	17	Realocação da lavadora;	\$ 12.000,00
<b>Total</b>					<b>\$ 337.000,00</b>

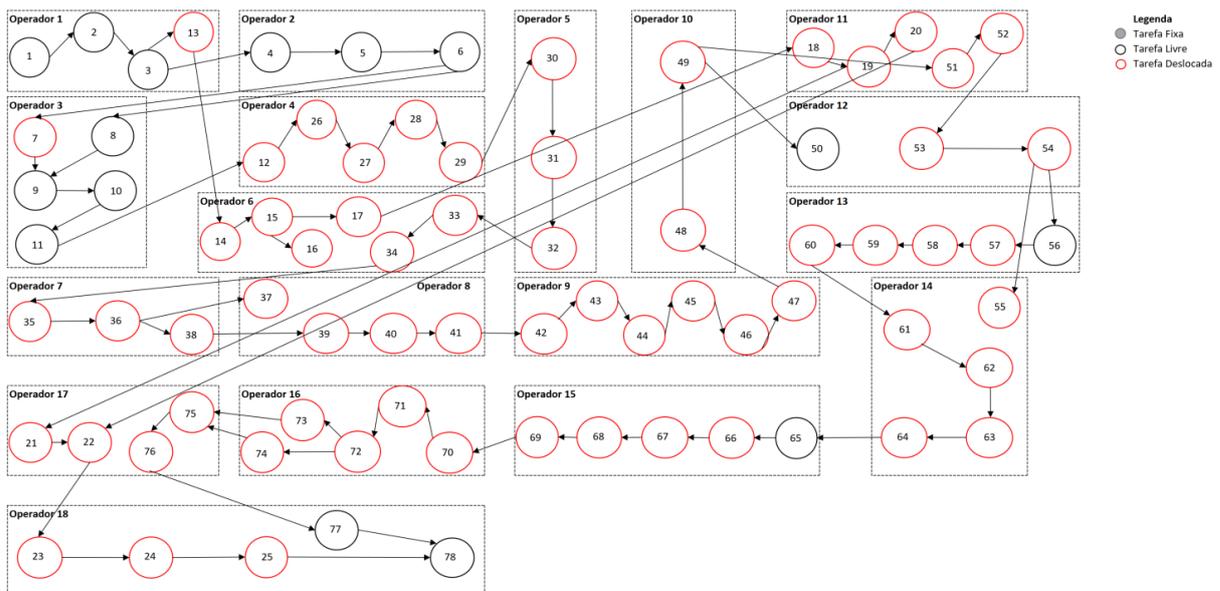
Fonte: Os autores, 2019

O orçamento de \$337 mil se explica devido a várias movimentações de máquinas como a tarefa 36 (retificação da guia e assento) da estação 9 para a 7, que totaliza \$140 mil. O lucro perdido durante a parada da linha para realizar as modificações, que necessitam de um tempo expressivo para serem realizadas, impactam bastante o orçamento final.

A Figura 18 a seguir ilustra a alocação de tarefas a postos de trabalho (operadores) de acordo com as sugestões fornecidas pelo modelo matemático. Nota-se que as relações de precedência entre tarefas são totalmente respeitadas, mas há várias mudanças em relação à alocação original, apresentada na Figura 15.

Para o Cenário Ideal, como mencionado no início da seção 4.2 nenhuma atividade foi considerada fixa nesse cenário.

**Figura 18 – Diagrama de precedências modelo misto cenário ideal**



**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 9 mostra um investimento total de \$ 337.000,00 para que seja implementado o estado ideal na planta. Entretanto 49 dessas modificações não têm custo, são basicamente melhorar a gestão dos operadores, e apenas 14 mudanças, que consistem em mudanças de máquinas são efetivamente relevantes para o orçamento.

#### 4.2.2 Cenário Implementável

Como pode ser observado no tópico 4.2.1, o cenário ideal, por mais que atrativo, é muito difícil de ser implementado, tanto pelo número de mudanças, quanto pelo investimento financeiro para viabilizá-lo. Nesse intuito o cenário implementável visa a obter uma solução de mais simples implementação.

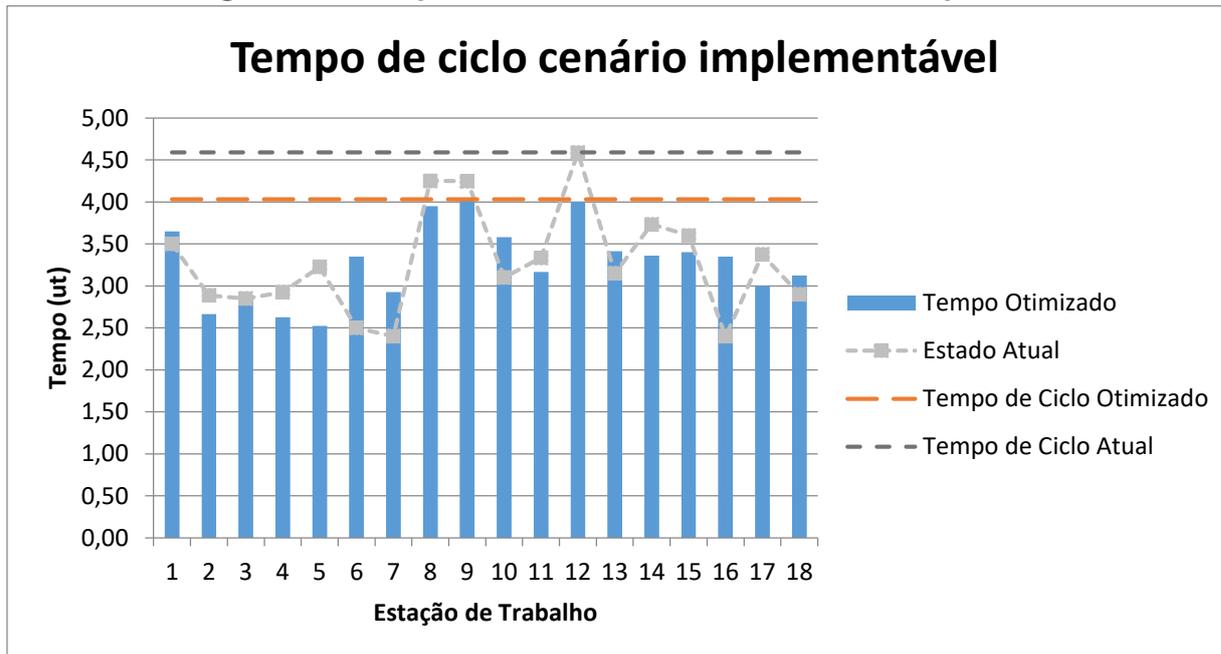
Os resultados obtidos com a otimização considerando o cenário implementável constam na Figura 19 e no Tabela 10.

**Tabela 10 – Tempos de ciclo modelo misto cenário implementável**

<b>Estação de trabalho</b>	<b>Tempo Otimizado (ut)</b>
1	3,65
2	2,81
3	2,70
4	2,63
5	3,75
6	3,71
7	3,95
8	2,96
9	3,73
10	4,00
11	2,84
12	2,80
13	3,96
14	3,30
15	3,00
16	3,58
17	2,75
18	2,85

**Fonte: Os autores, 2019**

**Figura 19 – Tempos de ciclo modelo misto cenário implementável**



**Fonte: Os autores, 2019**

Para o cenário implementável, foi obtido um tempo de ciclo 0,56 ut menor em relação ao tempo de ciclo atual e uma diferença de 37,4% entre os tempos de ciclos de estações (entre a estação 5 e 9).

Para que o devido cenário seja introduzido na realidade da planta, são necessárias vinte mudanças. Apesar de o número de mudanças ser expressivo, a maior parte delas consiste em modificar o deslocamento entre os operadores, a responsabilidade pela inspeção visual de peças ou a responsabilidade para a preparação do suporte de lavagem, todas as ações necessárias e o orçamento para viabilizar a otimização constam na Tabela 11.

**Tabela 11 – Lista de mudanças propostas com planos de ação e investimento estimado cenário implementável**

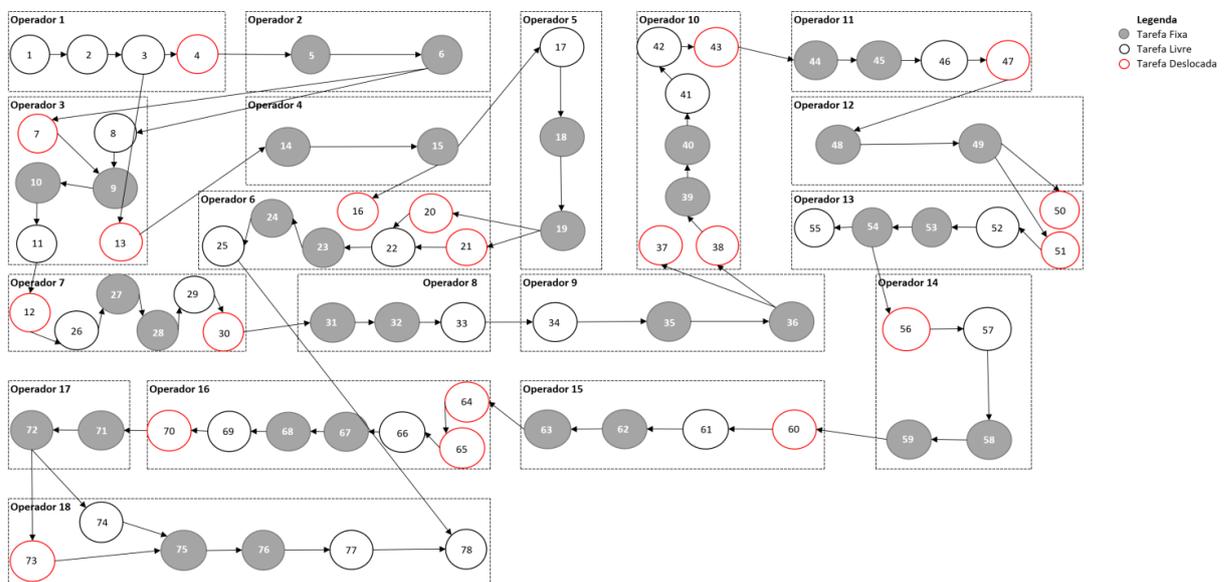
<b>Tarefa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Estação Atual</b>	<b>Estação Proposta</b>	<b>Plano de Ação</b>	<b>Investimento (\$)</b>
4	Retirada de peças	2	1	Gestão operadores;	\$ 0,00
7	Deslocamento	2	3	Gestão operadores;	\$ 0,00
12	Depósito de peças para exame visual	3	7	Realocação de suportes para armazenagem de peças do exame visual;	\$ 300,00
13	Retirada de peças	4	3	Gestão operadores;	\$ 0,00
16	Deslocamento	4	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
20	Check visual	5	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
21	Deslocamento	5	6	Gestão operadores;	\$ 0,00
30	Retirada de peças	8	7	Gestão operadores;	\$ 0,00
37	Inspeção formas e visual	9	10	Reposicionamento da célula de inspeção para otimizar deslocamento do operador 10;	\$ 500,00
38	Deslocamento	9	10	Gestão operadores	\$ 0,00
43	Preparação do suporte de lavagem	11	10	Gestão operadores	\$ 0,00
47	Retirada de peças	12	11	Gestão operadores	\$ 0,00
50	Inspeção formas e visual	12	13	Reposicionamento da célula de inspeção para otimizar deslocamento do operador 13;	\$ 500,00
51	Deslocamento	12	13	Gestão operadores	\$ 0,00
56	Deslocamento	13	14	Gestão operadores	\$ 0,00
60	Deslocamento	14	15	Gestão operadores	\$ 0,00
64	Deslocamento	15	16	Gestão operadores	\$ 0,00
65	Armazenamento	15	16	Gestão operadores	\$ 0,00
70	Retirada de peças	17	16	Gestão operadores	\$ 0,00
73	Deslocamento	17	18	Gestão operadores	\$ 0,00
<b>Total</b>					<b>\$ 1.300,00</b>

**Fonte: Os autores, 2019**

O orçamento de apenas \$1.300 se justifica, pois, as restrições aplicadas foram realmente rigorosas, portanto as mudanças propostas são basicamente movimentações de bancada ou melhoria na gestão de operadores.

A Figura 20 a seguir ilustra a alocação de tarefas a postos de trabalho (operadores) de acordo com as sugestões fornecidas pelo modelo matemático. Nota-se que as relações de precedência entre tarefas são totalmente respeitadas, mas há mudanças em relação à alocação original, apresentada na Figura 15.

**Figura 20 – Diagrama de precedências modelo misto cenário implementável**



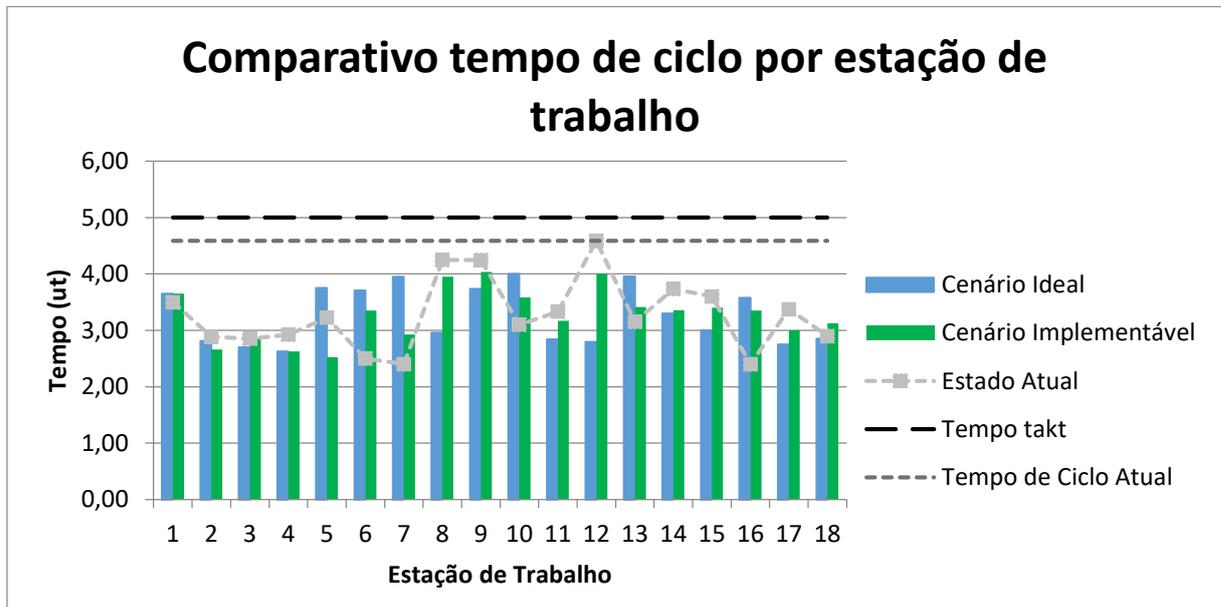
**Fonte: Os autores, 2019**

Da mesma maneira que o cenário ideal, o cenário implementável apresenta boa parte de suas mudanças propostas sem custo algum, 17 das 20 propostas consistem basicamente em melhorar a gestão dos operadores para uma otimização da capacidade produtiva e \$1.300,00 do orçamento necessário seriam para possibilitar que as inspeções de qualidade sejam feitas por outros operadores.

### 4.3 ANÁLISES E COMPARATIVOS

Primeiramente os dados foram consolidados na Figura 21, que apresenta a comparação entre os tempos de cada estação para o estado atual e os cenários otimizados.

**Figura 21 – Comparação do tempo de ciclo por estação de trabalho entre o estado atual e os cenários otimizados**



Fonte: Os autores, 2019

Com os dados explicitados nas seções 4.1 e 4.2 foi possível comparar os três cenários (Atual, ideal e implementável). As análises se baseiam em 4 parâmetros principais.

- Tempo de ciclo;
- Máxima diferença entre tempo das estações de trabalho;
- Número de mudanças necessárias no estado atual;
- Orçamento necessário para implementar as mudanças.

Todos os indicadores mencionados acima estão consolidados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Comparativo dos parâmetros do estado atual e cenários otimizados**

Indicador	Estado Atual	Cenário Ideal	Cenário Implementável
Tempo de Ciclo (ut)	4,59	4,00	4,03
Máxima Diferença (ut)	2,19	1,38	1,51
Número de mudanças	-	63	20
Orçamento (\$)	-	\$ 337.000,00	\$ 1.300,00

Fonte: Os autores, 2019

Nessa primeira análise pode-se notar que tanto o cenário ideal quanto o cenário implementável apresentam melhorias significativas em comparação ao estado atual.

Para explicitar essas melhorias cada índice será comparado separadamente nas seções 4.3.1 a 4.3.4. Nessas seções indicadores secundários serão adicionados para demonstrar as vantagens de cada cenário.

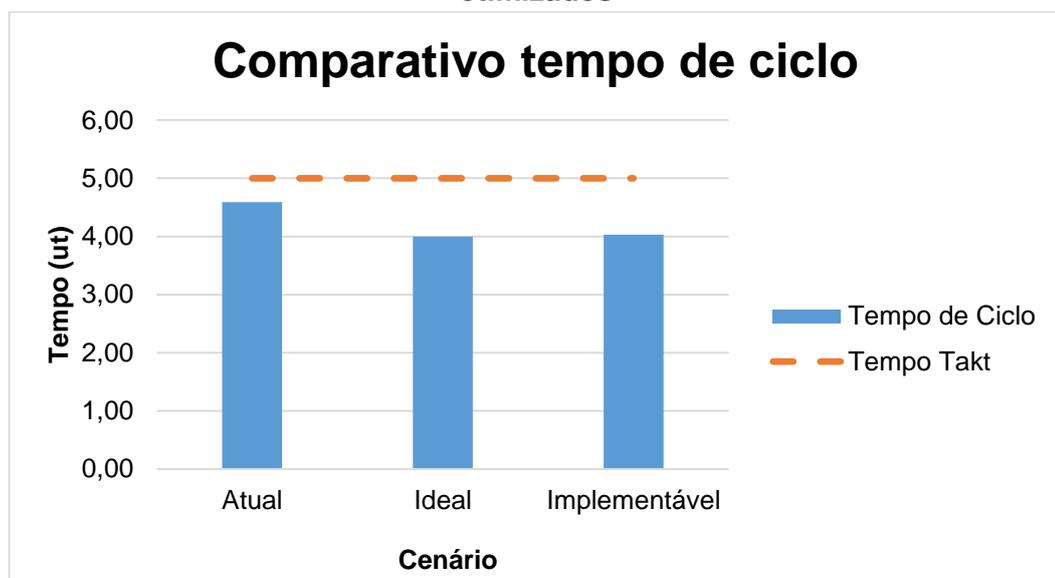
#### 4.3.1 Tempo de ciclo

Para a análise do tempo de ciclo foram adicionados dois indicadores auxiliares para complementar o resultado.

- Ganho percentual no tempo de ciclo por mudança;
- Ganho percentual no tempo de ciclo por milhar investido;

Primeiramente a Figura 22 apresenta a comparação entre os tempos de ciclo do estado atual e os cenários otimizados.

**Figura 22 – Comparação entre os tempos de ciclos para o estado atual e cenários otimizados**



Fonte: Os autores, 2019

No quesito a seguir vemos que tanto o cenário implementável, quanto o cenário ideal apresentam resultados muito parecidos. Enquanto o cenário implementável obteve uma melhoria de 12,20% o cenário ideal obteve uma melhoria de 12,80%. Em primeiro momento, parece interessante aplicar o cenário ideal, mas a Tabela 13 apresenta de forma sucinta todos os indicadores para que seja possível completar a análise.

**Tabela 13 – Comparativo dos indicadores para tempo de ciclo**

<b>Indicador</b>	<b>Estado Atual</b>	<b>Cenário Ideal</b>	<b>Cenário Implementável</b>
Tempo de Ciclo (ut)	4,59	4,00	4,03
Melhoria em relação ao estado atual	-	12,80%	12,20%
Ganho percentual por mudança	-	0,20%/mudança	0,60%/mudança
Ganho percentual por milhar investido	-	0,04%/milhar	9,38%/milhar

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 13 indica claramente que apesar do cenário ideal apresentar o melhor tempo de ciclo, não é o melhor de ponto de vista operacional e financeiro da empresa.

O ganho percentual em tempo de ciclo por mudança aplicada para o cenário implementável é 3 vezes maior do que para o cenário ideal, o que indica que depois de um certo ponto de otimização algumas mudanças são ajustes finos no balanceamento, mas não trazem tanto benefício na produtividade da empresa.

Por fim, o ganho percentual por milhar investido mostra o verdadeiro impacto financeiro de cada mudança. Nota-se que o indicador do cenário implementável é mais de 200 vezes maior do que para o cenário ideal, o que indica que algumas mudanças propostas exigem um grande investimento financeiro e não têm o retorno esperado no indicador em questão.

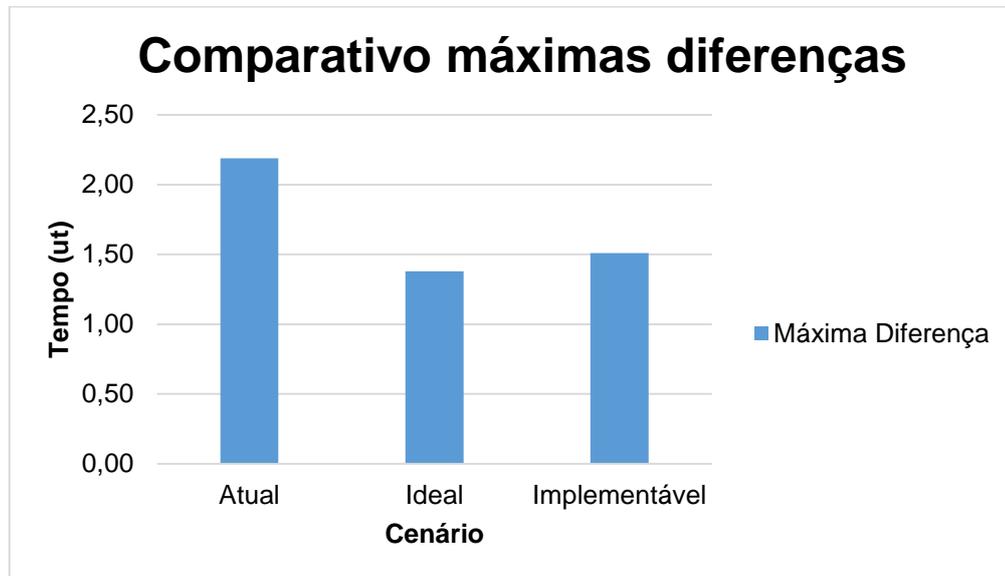
#### 4.3.2 Máxima diferença

Para a análise foi utilizado o mesmo princípio de indicadores utilizados para o tempo de ciclo:

- Ganho percentual na máxima diferença por mudança;
- Ganho percentual na máxima diferença por milhar investido;

Primeiramente a Figura 23 apresenta a comparação entre as máximas diferenças no estado atual.

**Figura 23 – Comparação entre as máximas diferenças para o estado atual e cenário otimizados**



**Fonte: Os autores, 2019**

Novamente o cenário ideal apresentou o melhor resultado da análise, de 36,98% abaixo do estado atual, enquanto o estado implementável apresentou uma melhora de 31,05%.

Em primeiro momento o cenário ideal parece o mais vantajoso, portanto a Tabela 14 apresenta os outros indicadores para completar a análise.

**Tabela 14 – Comparativo dos indicadores para máxima diferença**

Indicador	Estado Atual	Cenário Ideal	Cenário Implementável
Máxima diferença (ut)	2,19	1,38	1,51
Melhoria em relação ao estado atual	-	36,98%	31,05%
Ganho percentual por mudança	-	0,59%/mudança	1,24%/mudança
Ganho percentual por milhar investido	-	0,11%/milhar	23,88%/milhar

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 14 em conjunto com a Figura 23 torna possível uma análise mais completa. Nota-se que o ganho percentual por mudança do cenário implementável é duas vezes maior que o mesmo indicador para o cenário ideal, mostrando que as mudanças realizadas no cenário implementável são mais eficazes.

Outro fator a ser levado em consideração é o ganho por milhar investido. O segundo cenário otimizado apresenta um indicador mais de 200 vezes maior que o

primeiro, ou seja, é possível conseguir uma melhoria significativa sem tanto investimento financeiro.

#### 4.3.3 Número de Mudanças e Orçamento

Nas seções 4.3.1 e 4.3.2 foram discutidos os impactos positivos na linha. Já o objetivo dessa seção é compreender o impacto para a empresa, tanto na questão de número de mudanças a serem feitas quanto no investimento necessário para efetivamente realizar essas mudanças.

Para análise deste último parâmetro foram adicionados os seguintes indicadores secundários.

- Número de modificações com custos;
- Número de modificações sem custo;
- Investimento por modificação;

O consolidado de todas os indicadores utilizados para analisar o número das mudanças e os orçamentos estão na Tabela 15:

**Tabela 15 – Comparativo dos indicadores Número de mudanças e orçamento**

Indicador	Cenário Ideal	Cenário Implementável	(Implementável/Ideal-1)
Número de modificações	63	20	-68,26%
Número de modificações com custos	14	3	-78,58%
Número de modificações sem custos	49	17	-65,31%
Investimento Total	\$337.000,00	\$1.300,00	-99,62%
Investimento por modificação	\$5.349,00	\$65,00	-98,79%

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 15 mostra como o cenário implementável propõe um investimento 99,62% menor que o cenário ideal, com um investimento por modificação 98,79% menor. Tal fato decorre pela caracterização do modelo em não permitir movimentações de máquinas, que são o maior motivo de investimento do cenário ideal.

#### 4.3.4 Cenário Ideal x Cenário Implementável

Os resultados apresentados na seção 4.3.1 a 4.3.3 deixam claro que tanto o cenário ideal, quanto o cenário implementável têm um grande potencial para melhorar a linha atual. Portanto, essa seção tem como principal objetivo consolidar as informações e apresentar uma comparação entre as duas otimizações propostas.

Para isso a Tabela 16 apresenta a consolidação de todos os indicadores primários e secundários mencionados.

**Tabela 16 – Comparativo dos indicadores principais e secundários entre os cenários otimizados**

<b>Indicador</b>	<b>Cenário Ideal</b>	<b>Cenário Implementável</b>	<b>Implementável VS Ideal</b>
<b>Tempo de Ciclo (ut)</b>	<b>4,00</b>	<b>4,03</b>	<b>0,75%</b>
Melhoria em relação ao estado atual	12,80%	12,20%	-3,17%
Ganho percentual por mudança	0,20%/mudança	0,60%/mudança	200,00%
Ganho percentual por milhar investido	0,04%/milhar	9,38%/milhar	234 vezes
<b>Máxima diferença (ut)</b>	<b>1,38</b>	<b>1,51</b>	<b>12,69%</b>
Melhoria em relação ao estado atual	36,98%	31,05%	-16,03%
Ganho percentual por mudança	0,59%/mudança	1,24%/mudança	110,17%
Ganho percentual por milhar investido	0,11%/milhar	23,88%/milhar	217 vezes
<b>Número de modificações</b>	<b>63</b>	<b>20</b>	<b>-68,26%</b>
Número de modificações com custos	14	3	-78,58%
Número de modificações sem custos	49	17	-65,31%
<b>Investimento Total</b>	<b>\$337.000,00</b>	<b>\$1.300,00</b>	<b>-99,62%</b>
Investimento por modificação	\$5.349,00	\$65,00	-98,79%

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 16 indica claramente que o método ideal apresenta os melhores parâmetros para a linha com as mudanças implementadas, com um melhor resultado de 0,75% para o tempo de ciclo e de 12,69% para a maximização das diferenças. Esses resultados eram esperados uma vez que no modelo ideal qualquer modificação na linha que não afetasse as precedências do produto ou de padrões internacionais da empresa era possível.

No entanto, para implementar tal resultado seria necessário investir \$337.000,00 em 63 mudanças a serem realizadas na linha, enquanto o cenário implementável

propõe apenas 20 mudanças e \$1.300,00, valores 68,26% e 99,62% menores, respectivamente.

O ponto crucial de análise que define o cenário implementável como mais viável é quando se analisa os indicadores secundários que revelam o ganho em relação às mudanças feitas ou ao investimento feito. O cenário dois apresenta resultados de 200,00% e 110,17% melhores no ganho percentual por mudanças de tempo de ciclo e máximas diferenças, respectivamente. Já nos indicadores que levam em conta o investimento financeiro, os resultados são 200 vezes melhores.

Portanto, apesar de apresentar indicadores um pouco abaixo do cenário ideal, o cenário implementável se mostra mais viável devido à facilidade e baixo investimento em sua implementação na linha.

#### **4.4 RETORNO DO INVESTIMENTO**

Os ganhos produtivos obtidos com o cenário implementável podem ser bastante significativos. Para isso foram mensurados o tempo de *payback* e os possíveis ganhos em termos de aumento de produção. Para elaboração dos cálculos foram feitas algumas hipóteses simplificadoras:

- A empresa produz em três turnos todos os dias do ano, ou seja, foram consideradas 24 horas de produção diárias, 365 dias no ano;
- O cálculo leva em conta que a produção não sofra grandes variações em relações ao padrão da empresa;
- A linha otimizada é o gargalo da empresa e a melhoria no tempo de ciclo seria igual à melhoria na produção final.
- Paradas inesperadas na linha não são contempladas no cálculo;
- Toda a produção extra seria vendida sem afetar os custos unitários do produto e nem seu preço de venda para o cliente final;

Com essas hipóteses simplificadoras e a Equação (10) foi possível calcular o ponto de equilíbrio em termos da produção necessária para o investimento de \$1.300,00.

$$PE_p = \frac{II}{(R_{unit} - C_{unit})} \quad (10)$$

Onde:

$PE_p$  Representa o ponto de equilíbrio em termos de produção;

$II$  Representa o investimento inicial necessário para implementação do cenário;

$R_{unit}$  e  $C_{unit}$  Representam, respectivamente, a receita e o custo unitário do produto, sendo sua diferença o lucro por unidade vendida;

Para definir os *inputs* foram utilizadas as bases de dados recentes (últimos 12 meses) da empresa e utilizadas as médias das mesmas. A Tabela 17 apresenta os *inputs* e resultados do cálculo.

**Tabela 17 – Inputs e resultados do cálculo de ponto de equilíbrio**

Parâmetro	Descrição	Valor
$II$	Investimento inicial	\$1.300
$R_{unit}$	Receita unitária	\$17,40
$C_{unit}$	Custo unitário	\$14,50
$PE_p$	Ponto de equilíbrio	449 Produtos

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 17 indica que com apenas 449 produtos produzidos e vendidos, com esse parâmetro e utilizando a Equação (11) podemos chegar no tempo de *payback* da solução proposta.

$$Payback_h = \frac{PE_p}{(Prod_d * \%Melhoria)} * 24 \quad (11)$$

Onde:

$Payback_h$  Representa o tempo em horas necessário para que a mudança proposta de um retorno igual o seu investimento necessário;

$PE_p$  Representa o ponto de equilíbrio em termos de produção;

$Prod_d$  Representa a produção diária da linha;

$\%Melhoria$  Representa o ganho da implementação das mudanças propostas.

A Tabela 18 apresenta os *inputs* e resultados do cálculo.

**Tabela 18 – Inputs e resultados do cálculo de *payback***

Parâmetro	Descrição	Valor
$PE_p$	Ponto de equilíbrio	449 produtos
$Prod_d$	Produção diária	32.000 produtos
$\%Melhoria$	Percentual de melhoria	12,20%
$Payback_h$	<i>Payback</i> em horas	2 horas e 45 minutos

**Fonte: Os autores, 2019**

A Tabela 18 mostra que a solução proposta paga o seu investimento necessário em pouco menos de 3 horas, o que confirma que as soluções são de baixo custo e dão um retorno em um tempo muito baixo.

Para concluir as análises foi mensurado qual seria o ganho diário, mensal e anual para a empresa com a Equação (12):

$$Ganho = (R_{unit} - C_{unit}) * Prod_d * \%Melhoria * n_d \quad (12)$$

Onde:

*Ganho* Representa o ganho financeiro para a empresa;

$R_{unit}$  e  $C_{unit}$  Representam respectivamente a receita e o custo unitário do produto, sendo sua diferença o lucro por unidade vendida;

$Prod_d$  Representa a produção diária da linha;

$\%Melhoria$  Representa o ganho da implementação das mudanças propostas.

$n_d$  Representa o número de dias considerados na análise;

A Tabela 19 apresenta de forma resumida os ganhos diários, mensais e anuais da empresa em produtividade e em questão de lucro para o cenário implementável.

**Tabela 19 – Ganhos de produtividade e em lucro pós-implementação do cenário implementável**

<b>Parâmetro</b>	<b>Estado Atual</b>	<b>Cenário implementável</b>	<b>Ganho</b>
Produção Diária	32.000	35.904	3.904
Lucro Diário	\$ 92.800,00	\$ 104.121,60	\$ 11.321,60
Produção Mensal	960.000	1.077.120	117.120
Lucro Mensal	\$ 2.784.000,00	\$ 3.123.648,00	\$ 339.648,00
Produção Anual	11.680.000	13.104.960	1.424.960
Lucro Anual	\$ 33.872.000,00	\$ 38.004.384,00	\$ 4.132.384,00

**Fonte: Os autores, 2019**

Com um tempo de *payback* de menos de 3 horas e um potencial de ganho de mais de 4 milhões de unidades monetárias para a empresa o método se mostrou altamente eficaz em propor soluções de grande impacto e com investimentos acessíveis para a companhia.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho na seção 5.1 e as sugestões de continuidade para este projeto de pesquisa na seção 5.2.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Projeto de Pesquisa analisou a possibilidade de otimização do balanceamento da usinagem dura de uma fábrica de bicos injetores por meio da aplicação de programação matemática.

No Capítulo 1 é detalhado o problema de balanceamento da linha de estudo, que é evidenciado pelo gráfico presente na Figura 2, apresentada nesse mesmo capítulo. Uma base para o conhecimento do fluxo da linha é apresentada também nesse capítulo.

No Capítulo 2 é construída a base teórica, tanto para análises de linha de produção quanto para os conceitos de Pesquisa Operacional empregados. Deste modo, viabiliza-se a posterior implementação do método e interpretação dos resultados obtidos.

No Capítulo 3, com base nos estudos teóricos acerca dos modelos matemáticos, e pautado em conceitos de linha de montagem e Pesquisa Operacional, propõe-se uma metodologia de balanceamento de linha utilizando Programação Linear Inteira Mista. Esta metodologia tem por base um modelo matemático da literatura Sikora, Lopes e Magatão (2017), o qual será resolvido por meio de um *solver*. A Metodologia é esquematizada na Figura 8 e envolve etapas como análise de tarefas, alocação em estações de trabalho, implementação no modelo matemático e, por fim, proposta com viabilidade de implementação.

No Capítulo 4, apresentou-se primeiramente o estado atual da linha em análise na seção 4.1. Em seguida foram propostos dois cenários de análise na seção 4.2; por fim os dois cenários otimizados foram comparados com o estado atual e entre si na seção 4.3.

O cenário atual apesar de apresentar um resultado melhor tanto para a melhoria do tempo de ciclo quanto para as máximas diferenças entre estações, 12,80 e 36,98% em relação ao estado atual, apresentou um relativo alto investimento de \$337.000,00.

No caso do cenário nominado como implementável, o investimento necessário foi de apenas \$1.300,00. Para tal cenário é possível obter uma melhoria de 12,20% no tempo de ciclo e de 31,05% para a máxima diferença. Na seção 4.4 foi feita uma análise de *payback* para o cenário de baixo custo de implementação, que é de 2 horas e 45 minutos. Este cenário apresenta potencial de ganhos para a empresa que chegam nos valores anuais de 1,4 milhões unidades de produtos, aumentando o lucro em cerca de \$ 4 milhões.

## 5.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

O presente trabalho fez diversas análises de cenários e possíveis impactos financeiros com a implementação das mudanças, algumas continuações do trabalho seriam:

- Durante o modelo muitas ações de custo zero foram observadas, então aplicar um modelo que permitisse apenas essas mudanças mostraria o resultado de mudanças puramente de gestão de recursos;
- Realizar uma análise em que fosse possível retirar um ou dois funcionários e analisar o impacto no tempo de ciclo;
  - Aplicar o modelo matemático em outras linhas de montagem da empresa;
  - Implementar as soluções propostas e analisar se realmente os resultados práticos condizem com os teóricos;
- Propor uma mudança de *layout* fabril para a empresa, tendo em vista que os deslocamentos dos operários têm um grande impacto no tempo de ciclo.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Giancarlo F.; PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre R. **Simulações de arranjos físicos por produto e balanceamento de linha de produção: O estudo de um caso real no ensino para estudantes de engenharia.**In: XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 2007.

BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 183, p. 674-693, 2006. ISSN 2.

BRADLEY, S.; HAX, A.; MAGNANTI, T. **Applied mathematical programming.** Boston: Addison-Wesley, 1977.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, 2007.

BUKCHIN, J.; RUBINOVITZ, J. **A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection.** IIE transactions, v. 35, p. 73-85, 2006. ISSN 1.

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. n 3.

EREL, E.; GOKCEN, H. **Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem.** European Journal of Operational Research, v. 116, n. 1, p. 194-204, 1999.

GAITHER, Norman; FRAZIER, Greg. **Administração da produção e operações.** São Paulo: Pioneira, 2001. pp.279-307.

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

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

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

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-RJ.

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.

LOPES, T. C.; SIKORA, C. G. S.; MOLINA, R. G.; SCHIBELBAIN, D.; RODRIGUES, L. C.; MAGATÃO, L. (2017). **Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study**. European Journal of Operational Research, 263(3), 1033-1048.

MAGATÃO, L. **Pesquisa Operacional**. Apostila da Disciplina. Curitiba-Pr, 2016.

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

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

MARCILIO, I.; SKRABA, M. **Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista**. Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba-PR, 2010.

MERENGO, C.; NAVA, F.; POZZETTI, A. **Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines**. International Journal of Production Research, v. 37, n. 12, p. 2835-2860, 1999.

MICHELS, A. S.; LOPES, T. C.; SIKORA, C. G. S.; MAGATÃO, L. **A Benders' decomposition algorithm with combinatorial cuts for the multi-manned assembly line balancing problem**. European Journal of Operational Research, 278(3), 796-808. 2019.

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2a edição; São Paulo, editora Cengage Learning – 2011.

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

OLIVEIRA, F. S. et al. **Mixed Assembly Line Rebalancing: A Binary Integer Approach Applied To Real World Problems In The Automotive Industry**. International Journal of Automotive Technology, v. 13, p. 933-940, 2012.

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

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

PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. D. (1990). **Programação Linear** 2ª Ed. Rio de Janeiro-RJ.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and practice**. 4. 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. Tese em Engenharia Industrial.

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

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

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002. pp. 396-413.

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

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

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

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

WILLIAMS, H. P. **Model building in mathematical programming**. 5. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 432 p.

## APÊNDICE A – QUADRO DE TAREFAS

(Continua)

Descrição	Estação	N. Fluxograma	Descrição	Tempo da Tarefa	Tempo Ponderado
Entrada	1	1	Deslocamento	0,90	0,90
Entrada	1	2	Retirada de peças	0,60	0,60
Entrada	1	3	Separar as peças	2,00	2,00
Lapidação furo cego	2	4	Retirada de peças	0,60	0,15
Lapidação furo cego	2	5	Alimentação da máquina	1,20	0,30
Lapidação furo cego	2	6	Tempo da máquina	9,45	2,36
Lapidação furo cego	2	7	Deslocamento	0,30	0,08
Lavagem	3	8	Preparação do cesto de lavagem	1,20	0,30
Lavagem	3	9	Alimentação da máquina	1,20	0,30
Lavagem	3	10	Tempo da máquina	5,70	1,43
Lavagem	3	11	Deslocamento	2,40	0,60
Lavagem	3	12	Depositar peças para exame visual	0,90	0,23
Lapidação furo óleo	4	13	Retirada de peças	0,60	0,15
Lapidação furo óleo	4	14	Alimentação da máquina	1,20	0,30
Lapidação furo óleo	4	15	Tempo da máquina	9,30	2,33
Lapidação furo óleo	4	16	Deslocamento	0,60	0,15
Lavagem após extrude	5	17	Preparação do suporte	1,20	0,30
Lavagem após extrude	5	18	Alimentação da máquina	2,60	0,65
Lavagem após extrude	5	19	Tempo da máquina	6,30	1,58
Lavagem após extrude	5	20	Check visual	1,20	0,30
Lavagem após extrude	5	21	Deslocamento	1,60	0,40
Lavagem	6	22	Preparação do suporte de lavagem	0,80	0,20
Lavagem	6	23	Alimentação da máquina	0,20	0,05
Lavagem	6	24	Tempo da máquina	8,40	2,10
Lavagem	6	25	Deslocamento	0,60	0,15
Exame visual furo cego	7	26	Retirada de peças	1,80	0,45
Exame visual furo cego	7	27	Alimentação equipamento	0,60	0,15
Exame visual furo cego	7	28	Exame visual	4,80	1,20
Exame visual furo cego	7	29	Deslocamento	2,40	0,60
Retificação chanfro auxiliar	8	30	Retirada de peças	0,30	0,30
Retificação chanfro auxiliar	8	31	Alimentação da máquina	1,20	1,20
Retificação chanfro auxiliar	8	32	Tempo da máquina	2,25	2,25
Retificação chanfro auxiliar	8	33	Deslocamento	0,50	0,50
Retificação diâmetro de guia e assento	9	34	Retirada de peças	0,13	0,13
Retificação diâmetro de guia e assento	9	35	Alimentação da máquina	0,30	0,30
Retificação diâmetro de guia e assento	9	36	Tempo da máquina	3,60	3,60
Retificação diâmetro de guia e assento	9	37	Inspeção formas e visual	0,16	0,16
Retificação diâmetro de guia e assento	9	38	Deslocamento	0,05	0,05
Escovar diâmetro da guia	10	39	Alimentação da máquina	0,60	0,60
Escovar diâmetro da guia	10	40	Tempo da máquina	1,80	1,80
Escovar diâmetro da guia	10	41	Inspeção	0,40	0,40
Escovar diâmetro da guia	10	42	Deslocamento	0,30	0,30
Lavagem	11	43	Preparação do suporte de lavagem	0,27	0,27
Lavagem	11	44	Alimentação da máquina	0,07	0,07
Lavagem	11	45	Tempo da máquina	2,80	2,80
Lavagem	11	46	Deslocamento	0,20	0,20
Retificação forma externa e cúpula	12	47	Retirada de peças	0,10	0,10
Retificação forma externa e cúpula	12	48	Alimentação da máquina	0,60	0,60
Retificação forma externa e cúpula	12	49	Tempo da máquina	3,40	3,40
Retificação forma externa e cúpula	12	50	Inspeção formas e visual	0,32	0,32
Retificação forma externa e cúpula	12	51	Deslocamento	0,17	0,17
Rebarbação furos de injeção	13	52	Retirada de peças	0,60	0,15
Rebarbação furos de injeção	13	53	Alimentação da máquina	1,80	0,45
Rebarbação furos de injeção	13	54	Tempo da máquina	8,10	2,03
Rebarbação furos de injeção	13	55	Inspeção Visual	1,20	0,30
Rebarbação furos de injeção	13	56	Deslocamento	0,90	0,23
Lavagem	14	57	Preparação do suporte de lavagem	0,27	0,27
Lavagem	14	58	Alimentação da máquina	0,07	0,07
Lavagem	14	59	Tempo da máquina	2,80	2,80
Lavagem	14	60	Deslocamento	0,60	0,60

(Continuação)

Descrição	Estação	N. Fluxograma	Descrição	Tempo da Tarefa	Tempo Ponderado
Gravação	15	61	Retirada de peças	0,10	0,10
Gravação	15	62	Alimentação da máquina	0,60	0,60
Gravação	15	63	Tempo da máquina	2,10	2,10
Gravação	15	64	Deslocamento	0,20	0,20
Gravação	15	65	Armazenamento	0,60	0,60
Inspeção	16	66	Deslocamento	1,80	0,45
Inspeção	16	67	Alimentação da máquina	1,20	0,30
Inspeção	16	68	Tempo da máquina	4,20	1,05
Inspeção	16	69	Deslocamento	2,40	0,60
Retificação superfície de vedação	17	70	Retirada de peças	0,60	0,15
Retificação superfície de vedação	17	71	Alimentação da máquina	3,60	0,90
Retificação superfície de vedação	17	72	Tempo da máquina	8,40	2,10
Retificação superfície de vedação	17	73	Deslocamento	0,90	0,23
Lavagem	18	74	Preparação do suporte de lavagem	0,80	0,20
Lavagem	18	75	Alimentação da máquina	0,20	0,05
Lavagem	18	76	Tempo da máquina	8,40	2,10
Lavagem	18	77	Deslocamento AGIE / HE	0,60	0,15
Entrada de material AGIE/HE	18	78	Entrada de material	0,40	0,40