

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

FABIO TADASHI NOSO  
FERNANDO TIAGO PELEGRINI

**OTIMIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE  
MONTAGEM DE CAIXAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO  
MODELOS MATEMÁTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(Tcc 2)

CURITIBA

2014

FABIO TADASHI NOSO  
FERNANDO TIAGO PELEGRINI

**OTIMIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE  
MONTAGEM DE CAIXAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO  
MODELOS MATEMÁTICOS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA

2014

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa **“OTIMIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE CAIXAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO MODELOS MATEMÁTICOS”**, realizada pelos alunos Fabio Tadashi Noso e Fernando Tiago Pelegrini, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Leandro Magatão  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Prof. MSc. Osvaldo Verussa Junior  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Prof. MSc. Tiago Rodrigues Weller  
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 19 de maio de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer a Deus, às nossas famílias, aos nossos amigos, em especial, ao nosso Professor Orientador, Leandro Magatão, e colegas da empresa que muito contribuíram para a realização desse projeto.

## RESUMO

NOSO, Fabio Tadashi; PELEGRINI, Fernando Tiago. Otimização do Balanceamento de uma Linha de Montagem de Caixas de Transmissão Utilizando Modelos Matemáticos. 2014. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba-PR, 2014.

O presente projeto consiste em um estudo de otimização do balanceamento de uma linha de montagem de caixas de transmissão de uma empresa localizada na região metropolitana de Curitiba. A linha em análise apresenta sinais de desbalanceamento nas atividades realizadas nas estações de trabalho, sendo perceptível a ociosidade de alguns operadores, além de outros desperdícios do meio produtivo. Diante dessa situação, é clara a necessidade de buscar um aperfeiçoamento na distribuição de tarefas entre as estações e os operadores da linha. Com o objetivo de resolver esse problema de desbalanceamento, primeiramente realizou-se a coleta de dados reais da linha. Após isso, o modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) apresentado por Leal (2013) foi aprimorado para contemplar características específicas da linha, tais como, existência de tarefas totalmente automatizadas e limitações de deslocamento de operadores em um conjunto de estações de trabalho. A implementação e a resolução computacional do modelo foram realizadas no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013). Foram obtidas respostas aprimoradas para o balanceamento da linha em relação à real condição operacional, indicando uma solução de equilíbrio na distribuição de tarefas entre as estações de trabalho e os operadores. Os resultados obtidos indicam, por exemplo, uma possibilidade de diminuição do tempo de ciclo de 1533 UT (Unidades de Tempo) para 1350 UT. Um experimento adicional indicou, ainda, a possibilidade de diminuição do número de operadores da linha de 18 para 16, mantendo-se a capacidade produtiva otimizada (tempo de ciclo em 1350 UT). Dessa forma, a solução de balanceamento obtida sugere uma possibilidade de aumento da eficiência da linha com a consequente redução de custos, quantificada na seção de resultados.

**Palavras-chave:** Balanceamento de Linha de Montagem; Otimização; Pesquisa Operacional (PO); Programação Linear Inteira Mista (PLIM); Redução de Custos.

## ABSTRACT

NOSO, Fabio Tadashi; PELEGRINI, Fernando Tiago. Otimização do Balanceamento de uma Linha de Montagem de Caixas de Transmissão Utilizando Modelos Matemáticos. 2014. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba-PR, 2014.

The proposal of this project is to perform a line balancing optimization study of a gearbox assembly line, located in a company in the metropolitan region of Curitiba. This line shows signs of unbalance in the activities performed in the workstations, with noticeable idleness of some operators, besides other waste from the production environment. Given this situation, it is clear the necessity to seek an improvement in the distribution of tasks between stations and operators. In order to solve this unbalance problem, first, actual information of the line was collected. After this, the mathematical model on Mixed Integer Linear Programming (MILP) presented by Leal (2013) has been improved to address specific characteristics of the line, such as the existence of total automated tasks and limitations regarding the position of operators on a set of workstations. Implementation and computational resolution of the model were performed on the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio software (IBM-CPLEX, 2013). Compared to the actual operating condition, improved results were obtained for the line balancing problem, indicating an equilibrium solution in the distribution of tasks between workstations and operators. The results indicate, for example, a possibility of decreasing the cycle time from 1533 UT (units of time) to 1350 UT. An additional experiment also indicated the possibility of reducing the number of operators from 18 to 16, maintaining an optimized production capacity (cycle time in 1350 UT). Thus, the balancing solution obtained suggests a possibility of increasing the efficiency of the line with the consequent cost reduction, quantified in the results section.

**Keywords:** Assembly Line Balancing; Optimization; Operations Research (OR); Mixed Integer Linear Programming (MILP); Cost Reduction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Layout</i> Simplificado da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão .	13
Figura 2 – Balanceamento dos Operadores da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão.....	14
Figura 3 – Balanceamento das Estações da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão.....	15
Figura 4 – Arranjo Físico por Produto em Linha Reta .....	21
Figura 5 – Exemplo de Diagrama de Precedência .....	22
Figura 6 – Linhas de produção de modelo único, misto e multimodelo.....	26
Figura 7 – Fluxograma da Metodologia.....	31
Figura 8 – Tempos de Deslocamento dos Operadores entre as Estações .....	38
Figura 9 – Diagrama de Precedências .....	39
Figura 10 – Comparação entre Ocupação dos Operadores do Resultado 1 e a Referência.....	46
Figura 11 – Comparação entre a Ocupação das Estações do Resultado 1 e a Referência.....	47
Figura 12 – Comparação entre a Alocação dos Operadores entre o Resultado 1 e a Referência.....	48
Figura 13 – Comparação entre Ocupação dos Operadores do Resultado 2 e a Referência.....	52
Figura 14 – Comparação entre a Ocupação das Estações do Resultado 2 e a Referência.....	53
Figura 15 – Comparação entre a Alocação dos Operadores entre o Resultado 2 e a Referência.....	54
Figura 16 – Comparação Entre a Ocupação dos Operadores nos Resultados Encontrados .....	59

Figura 17 – Comparação Entre a Ocupação das Estações nos Resultados Encontrados .....	60
Figura 18 – Comparação Entre a Alocação das Tarefas nos Resultados Encontrados .....	61
Figura 19 – Comparação Entre a Alocação dos Operadores nos Resultados Encontrados .....	62
Figura 20 – Cronograma de execução do trabalho .....	64



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Suptipos de SALBP	25
Quadro 2 – Comparação dos Indicadores entre a Referência e o Resultado 1	49
Quadro 3 – Alocação de Tarefas nos Postos de Trabalho do Resultado 1	49
Quadro 4 – Alocação de Postos e Tarefas por Operador do Resultado 1	50
Quadro 5 – Mudanças Necessárias para Implementação do Resultado 1	51
Quadro 6 – Comparação dos Indicadores entre a Referência e o Resultado 2	55
Quadro 7 – Alocação de Tarefas nos Postos de Trabalho do Resultado 2	55
Quadro 8 – Alocação de Postos e Tarefas por Operador do Resultado 2	56
Quadro 9 – Mudanças Necessárias para Implementação do Resultado 2	57
Quadro 10 – Comparação dos Indicadores dos Resultados Encontrados	60
Quadro 11 – Índices aplicados ao modelo matemático proposto	70
Quadro 12 – Conjuntos aplicados ao modelo matemático proposto	70
Quadro 13 – Parâmetros aplicados ao modelo matemático proposto	71
Quadro 14 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático proposto	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alocação original das tarefas, precedências e seus respectivos tempos de operação da estação ST010/15 .....	37
Tabela 2 – Comparação Financeira entre os Resultados .....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

**ALBP:** Problemas de Balanceamento de Linha de Montagem, do inglês *Assembly Line Balancing Problem*

**AT:** Operações ou Tarefas Automáticas, do inglês *Automatic Tasks*

**MILP:** Programação Linear Inteira Mista, do inglês *Mixed Integer Linear Programming*

**PLIM:** Programação Linear Inteira Mista

**PO:** Pesquisa Operacional

**SALB:** Balanceamento de Linha de Montagem Simples, do inglês *Simple Assembly Line Balancing*

**TAT:** Operações ou Tarefas Totalmente Automáticas, do inglês *Total Automatic Tasks*

**UT:** Unidades de tempo

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Contexto do Tema	12
1.2	Caracterização do Problema	15
1.3	Objetivos	17
1.4	Justificativa	18
1.5	Conteúdo do Trabalho	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	Arranjo Físico de Produção	20
2.2	Terminologia da Análise de Linhas de Produção	21
2.3	Balanceamento de Linha	24
2.3.1	Balanceamento de Linha de Montagem Simples (SALB)	24
2.3.2	Indicadores para Balanceamento de Linha	26
2.4	Programação Linear	28
2.4.1	Definições e Conceitos	28
2.4.2	Hipóteses da Programação Linear	29
2.4.3	Formulação e Aplicações de um Modelo Linear	29
2.4.4	Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	30
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>31</b>
3.1	Descrição da Metodologia	31
3.2	Justificativa da Metodologia	34
3.3	Produtos do Projeto	35
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b>	<b>36</b>
4.1	Problema e Desenvolvimento do Projeto	36
4.2	Evolução do Modelo Matemático	40
4.2.1	Evolução do Modelo Matemático: Tarefas Totalmente Automáticas	41
4.2.2	Evolução do Modelo Matemático: Alocação Factível de Trabalhadores	42
4.3	Considerações sobre Aplicação do Modelo ao Estudo de Caso	43
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>46</b>
5.1	Resultado 1	46
5.2	Resultado 2	51
5.3	Resultado 1 Vs. Resultado 2	56
5.4	Planejamento do Projeto	63
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>66</b>
6.1	Considerações Finais	66
6.2	Sugestões de Continuidade	67
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE A – MODELO MATEMÁTICO: VERSÃO APRIMORADA</b>	<b>70</b>
	O Modelo Matemático	70
	Função Objetivo	72
	Restrições aplicadas ao modelo	73
	<b>APÊNDICE B – TABELA DE DADOS DAS TAREFAS</b>	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

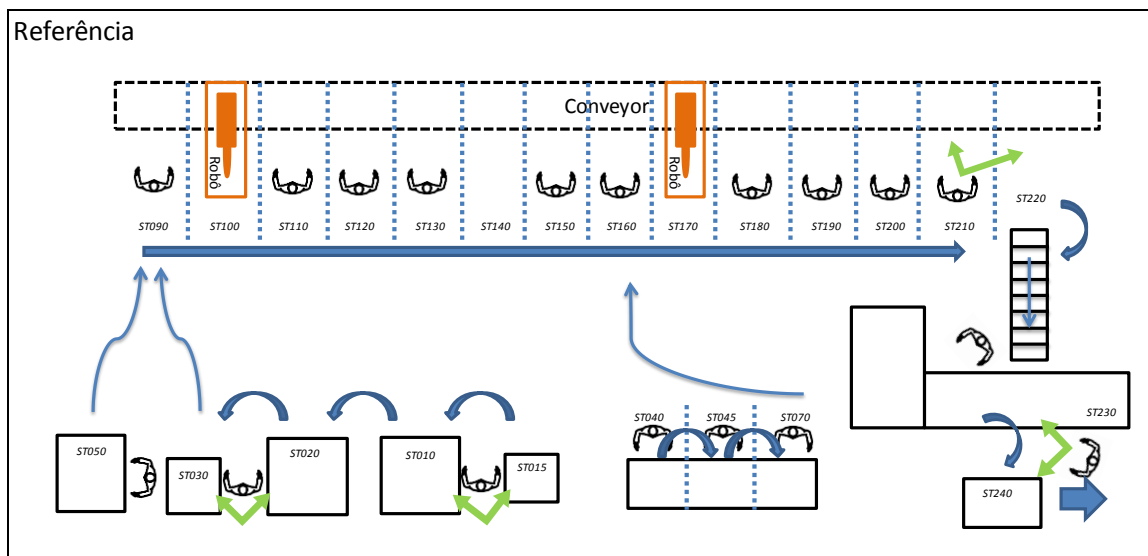
Linhas de montagem são sistemas de produção orientados pela necessidade de fluxo do produto. São típicas em indústrias de produção em massa e vêm ganhando importância em produção de produtos customizados. Dentre os problemas de decisão que surgem ao se gerenciar tais sistemas, os problemas de balanceamento de linha são importantes questões de planejamento de produção no médio prazo (BECKER e SCHOLL, 2004).

Com objetivo de auxiliar no planejamento de produção para uma linha de montagem de caixas de transmissão, a qual apresenta problemas de desbalanceamento, o presente projeto busca aperfeiçoar a distribuição de atividades através de modelagem matemática. Esse processo é realizado a partir da obtenção de dados reais do problema e posterior aplicação de conhecimentos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para sugerir soluções otimizadas para o problema de balanceamento em análise. A linha de montagem em questão localiza-se em uma empresa automobilística da região metropolitana de Curitiba-PR.

## 1.1 Contexto do Tema

A linha de produção em estudo é responsável pela montagem de um tipo de caixas de transmissão automatizada, sendo formada por 24 estações de trabalho, com 18 operadores no turno matutino e 10 no turno vespertino. O ciclo planejado da linha é de 1350 UT (Unidades de Tempo) para o primeiro turno, o que significa uma capacidade de 20 caixas por turno. Já para o segundo turno, o ciclo é de 4500 UT, com uma capacidade de 6 caixas. Ressalta-se que, no intuito de preservar os dados reais da empresa, os tempos apresentados no presente trabalho foram multiplicados por um fator numérico e são apresentados em Unidades de Tempo (UT).

As principais operações realizadas na linha são: prensagem das engrenagens nos eixos, vedação, parafusamento, testes de funcionalidade e estanqueidade, além da montagem dos componentes. A Figura 1 apresenta o *layout* simplificado da linha em estudo.

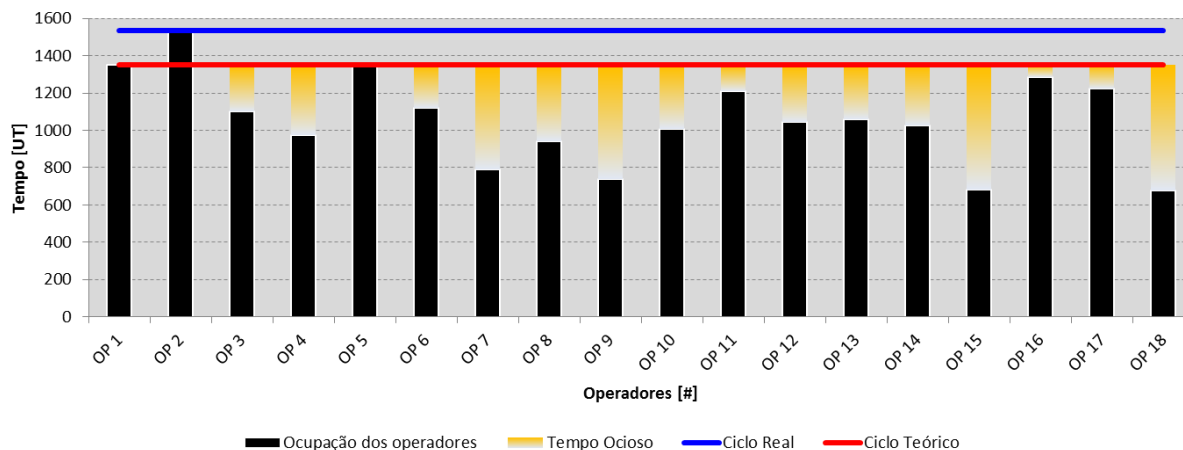


**Figura 1 – Layout Simplificado da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão**

Fonte: Autoria própria

O fluxo de produção funciona da seguinte maneira: as estações inferiores do layout da Figura 1 (e.g. ST015, ST010) são estações de preparação, onde as engrenagens são prensadas nos eixos e a carcaça e outros componentes são pré-montados. A linha principal é representada pelas estações superiores da Figura 1 (e.g. ST090, ST100), na qual existe um conveyor, ou transportador, que puxa a produção. O tempo de produção depende da velocidade do conveyor, que é ajustada para um valor constante. O fluxo de montagem segue as setas até a bancada de teste de funcionalidade na penúltima estação (ST230). Duas estações possuem robôs e são completamente automáticas (ST100, ST170). A estação ST140, na atual configuração da linha, não possui atividade alguma alocada. Após o teste final, a caixa é identificada e levada para o estoque.

A linha foi reproduzida a partir de outra linha idêntica de uma planta fora do país, mas o projeto nacional levou em conta um ciclo teórico de 1350 UT. A distribuição e a análise do agrupamento das atividades para balanceamento da linha foram feitas de forma tradicional, por um processo de “tentativa e erro”, valendo-se da experiência prática. O resultado, portanto, não foi um balanceamento ótimo, haja vista a perceptível ociosidade de alguns operadores, além de outros desperdícios dos recursos produtivos, conforme ilustrado na Figura 2, a seguir apresentada.

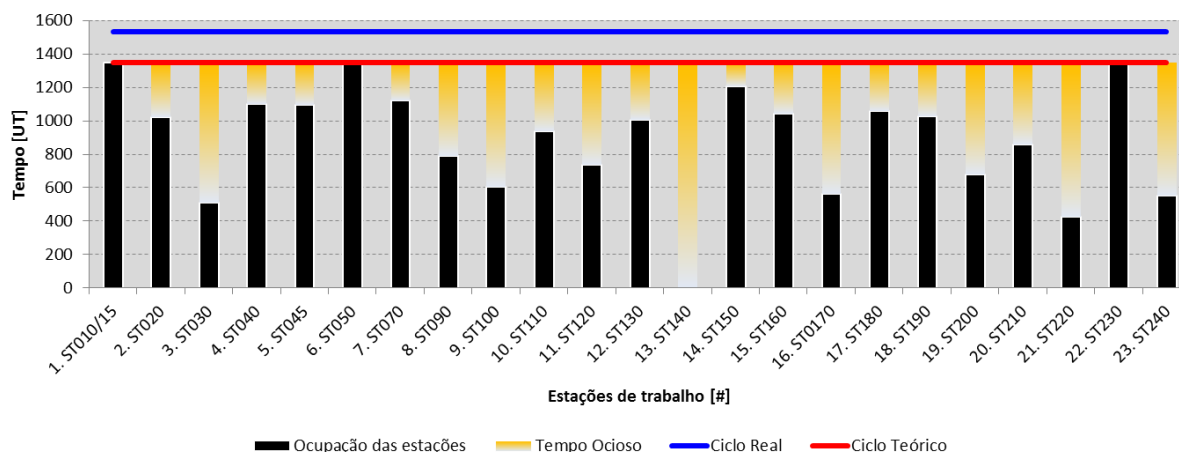


**Figura 2 – Balanceamento dos Operadores da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão**

Fonte: Autoria própria

De acordo com a Figura 2, atualmente a distribuição de atividades não garante a obtenção do ciclo teórico, pois o tempo total das atividades do operador 2 (OP 2) soma 1532 UT, o que supera o *takt time*, ou seja, o tempo de produção estipulado para suprir a demanda. Ademais, as colunas amarelas da Figura 2 indicam a quantidade de Tempo Ocioso por operador e, somando todo o Tempo Ocioso em relação ao tempo total disponível para produção segundo o ciclo real, calcula-se 31% de desperdício de tempo de trabalho. Além disso, observando a Figura 3 a seguir apresentada, pode-se notar que existe um desbalanceamento entre as estações de trabalho e, sobretudo, que o agrupamento das atividades por estações garantiria a produção das caixas dentro do ciclo teórico. Comparando esses fatos indicados pela Figura 2 e pela Figura 3, conclui-se que os operadores estão delimitando o ciclo real da linha, sendo necessário um melhor balanceamento de suas atividades para diminuir o ciclo real e, eventualmente, a ociosidade.

Diante desses fatos, medições e estudos de automação estão em andamento no chão-de-fábrica para confirmação dos tempos individuais de cada estação e posterior avaliação do potencial aumento de produtividade. Assim, à guisa de propor uma solução para esse problema de balanceamento, o presente projeto foi muito bem recebido pela área de planejamento de produção da empresa, a qual espera receber um resultado consistente pela aplicação de conhecimentos matemáticos ao problema de balanceamento em análise.



**Figura 3 – Balanceamento das Estações da Linha de Montagem de Caixas de Transmissão**

Fonte: Autoria própria

Além desses aspectos técnicos, de acordo com os analistas de mercado da empresa, as previsões de demanda para esse produto tendem a aumentar significativamente nos próximos anos, devido aos benefícios que as caixas automatizadas trazem para o segmento de transporte, como economia de combustível e redução nos custos de manutenção. Isso reforça a necessidade de uma iniciativa para redução de custos e aumento de produtividade para diferentes situações de demanda.

O presente projeto se insere nas áreas de Manufatura, Administração da Produção e Pesquisa Operacional, como parte da Otimização da Manufatura.

## 1.2 Caracterização do Problema

A Figura 2 ilustra o atual balanceamento dos operadores da linha no turno matutino, onde se pode visualizar a diferença entre o ciclo teórico e o ciclo real, assim como a quantidade de tempo ocioso de cada operador. No total são 18 operadores trabalhando na linha (as estações ST100 e ST170 são completamente automatizadas), com uma ocupação média da mão-de-obra de 69% em relação ao ciclo real, sendo o desvio padrão de 15%. Frente a esses fatos, é evidente a ociosidade de alguns operadores.

Segundo Taichii Ohno (OHNO, 1997), o criador da filosofia *just-in-time*, “se considerarmos apenas o trabalho que é necessário como trabalho real e definirmos

o resto como desperdício, a equação a seguir será verdadeira, sejam considerados trabalhadores individuais ou a linha inteira: **Capacidade atual = trabalho + desperdício**". Assim, se os desperdícios causados pela ociosidade forem suprimidos, redistribuindo-se as atividades entre as estações de trabalho, a ocupação dos operadores seria aumentada e o número destes, talvez, reduzido. Então, poder-se-ia produzir mais com menos mão-de-obra; em outras palavras, a eficiência da linha seria maior. Por outro lado, se o número de estações fosse mantido e somente as atividades fossem redistribuídas entre os postos de trabalho, seria possível produzir em um ciclo menor, de maneira mais eficiente. Portanto, considerando a configuração atual da linha, pode-se concluir que a capacidade produtiva é maior do que apenas 20 caixas de transmissão por turno, o que confere ao desbalanceamento grande responsabilidade pela ineficiência do sistema.

"A verdadeira melhoria na eficiência surge quando produzimos zero desperdício e levamos a porcentagem de trabalho para 100%. Uma vez que no Sistema Toyota de Produção devemos produzir apenas a quantidade necessária, a força de trabalho deve ser reduzida para cortar o excesso de capacidade e corresponder à quantidade necessária" (OHNO, 1997). Desta forma, uma vez que o sistema de produção da empresa em questão é baseado no Sistema Toyota de Produção, a existência de desperdícios devido à ociosidade nos meios produtivos acarreta aumento de custo. Isso prejudica a competitividade do produto, o posicionamento de preço e a lucratividade, isto é, essa ineficiência impacta a sustentabilidade do negócio como um todo.

Outro problema gerado pela demasiada ociosidade é a camuflagem de falhas. As variações nos tempos de produção tem um desvio padrão significativo em alguns casos, devido a problemas de montagem, incertezas de processo, problemas logísticos, dentre outros fatores, os quais são muitas vezes camuflados pela ociosidade da linha. Ou seja, uma falha pode gerar um desperdício de tempo facilmente recuperável pelos operadores subocupados. Além disso, essa camuflagem dificulta o trabalho dos engenheiros responsáveis no sentido de encontrar soluções mais inteligentes e econômicas para gerenciar as flutuações de processo, o que pode ocasionar em paradas mais sérias e de demorada reversão.



Todos os fatos citados confirmam o potencial produtivo ainda a ser explorado. Sendo assim, o presente trabalho busca reduzir a ociosidade dos operadores através de uma análise matemática, fazendo-se uso da Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para gerar soluções otimizadas para o problema de balanceamento em questão.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo geral do presente trabalho é aplicar conhecimentos de modelagem matemática de problemas, especificamente a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), para sugerir soluções otimizadas para um problema real de balanceamento de uma linha de montagem de caixas de transmissão em uma indústria automobilística.

Dentre os objetivos específicos podem ser citados:

- Levantamento de conhecimentos mais aprofundados sobre o tema balanceamento de linhas de montagem, buscando informações sobre suas definições, especificações, limitações, variedades, recentes avanços na área e possíveis abordagens a serem seguidas em cada caso;
- Levantamento dos tempos de produção de cada tarefa executada nas estações de trabalho, a fim de verificar a existência e resolver o problema de balanceamento da linha de montagem;
- Criação de Diagramas de Precedência entre as tarefas realizadas nas estações de trabalho para evidenciar a existência de restrições, necessárias para a resolução de um problema de balanceamento de linha de montagem;
- Verificação do funcionamento e aplicabilidade de um modelo computacional já existente desenvolvido em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), conforme descrito em Leal (2013), e direcionado a um problema real de balanceamento de linha de montagem, avaliando suas características, deficiências e validade dos resultados gerados para o cenário de estudo;
- Aprimoramento do modelo apresentado em Leal (2013) para contemplar características específicas da linha, tais como, existência de tarefas totalmente

automatizadas e limitações de deslocamento de operadores em um conjunto de estações de trabalho;

- Implementação e resolução, através de ferramenta computacional, de um modelo matemático em PLIM, aprimorado de Leal (2013), capaz de gerar soluções factíveis ao problema de balanceamento de linha de montagem, utilizando as restrições demandadas pela operação real do caso em estudo;
- Validação, utilizando os conhecimentos relativos à vivência prática, dos resultados encontrados para o problema com a aplicação do modelo matemático aprimorado;
- Comparação dos resultados obtidos com o modelo matemático com a situação prática de balanceamento, indicando possibilidades de melhoria;
- Quantificação dos resultados obtidos em valores monetários e avaliação da viabilidade econômica do projeto.

#### **1.4 Justificativa**

Frente a um mercado automobilístico extremamente competitivo, a necessidade de aumentar a produtividade é uma constante nas indústrias do ramo. E se produtividade significa diminuir custos para aumentar a lucratividade e obter um melhor posicionamento de mercado, melhorar a eficiência dos meios produtivos é um ponto chave para o sucesso do negócio.

Quando se fala em aumento de eficiência, a eliminação de desperdícios é fundamental. Para tanto, deve-se ter os seguintes pontos em mente, como afirma Ohno (1997):

1. O aumento da eficiência só faz sentido quando está associado à redução de custos. Para obter isso, tem-se que começar a produzir apenas aquilo que se necessita usando um mínimo de mão-de-obra;
2. Observe a eficiência de cada operador e de cada linha. Observe, então, os operadores como um grupo, e depois a eficiência de toda a fábrica (todas as linhas). A eficiência deve ser melhorada em cada estágio e, ao mesmo tempo, para a fábrica como um todo.

Desta forma, é totalmente indispensável uma análise ótima do balanceamento de uma linha, a fim de verificar a eficiência de cada constituinte do sistema produtivo. Porém, como cita Magatão (2013), “o processo de tomada de decisões operacionais ainda é conduzido pelo emprego de critérios experimentais”. Ainda, de acordo com o mesmo autor, estas decisões empregadas geralmente não representam a solução operacional ótima e sim uma mais conservadora. Portanto, a aplicação de modelagem matemática, aplicada ao balanceamento da linha em estudo, torna-se uma ferramenta oportuna, visando à otimização do processo produtivo atualmente implementado.

### **1.5 Conteúdo do Trabalho**

A revisão bibliográfica é realizada no Capítulo 2, que contempla uma busca do estado da arte nos temas relacionados ao presente trabalho. Nesse caso, foram definidos os conceitos de sistemas de produção, em especial linhas de produção de modelo misto, e de Pesquisa Operacional.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, que inclui desde a definição do problema, coleta de dados, alimentação e adaptação do modelo matemático, até a validação e análise dos resultados obtidos. Ainda, justifica-se a metodologia utilizada e definem-se os produtos do projeto.

Em seguida, no Capítulo 4, apresenta-se o desenvolvimento do projeto, enfatizando-se o modo como as etapas definidas na metodologia foram realizadas, além de conter informações a respeito da evolução do modelo matemático utilizado e considerações sobre a aplicação deste modelo ao presente estudo de caso.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do modelo proposto no problema real abordado, comparando-se os resultados obtidos com o balanceamento empírico da linha.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões obtidas a partir da análise realizada no Capítulo 5. Além disso, são sugeridos futuros trabalhos para dar continuidade ao que foi desenvolvido no presente trabalho.

Destaca-se também o Apêndice A, que detalha o modelo matemático aprimorado a partir do modelo proposto em Leal (2013).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

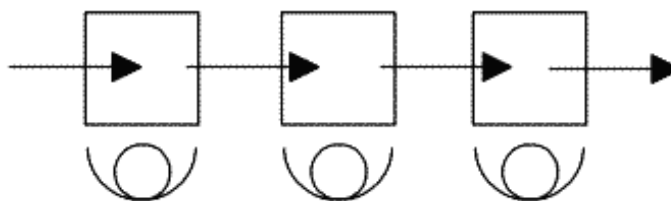
### 2.1 Arranjo Físico de Produção

O arranjo físico de uma operação produtiva pode ser entendido como a preocupação com o posicionamento físico dos recursos de transformação. A maioria dos arranjos físicos deriva de quatro tipos básicos: arranjo físico posicional; arranjo físico por processo; arranjo físico celular; e arranjo físico por produto (SLACK *et al.*, 2009). De acordo com Gaither e Frazier (2002), o objetivo principal dos arranjos físicos de manufatura é minimizar o custo de processamento, transporte e armazenamento de materiais ao longo do sistema de produção.

O modelo utilizado no cenário em análise é o arranjo físico por produto, que, na definição de Davis *et al.* (1999), é aquele no qual os processos de trabalho ou de equipamento estão dispostos de acordo com as etapas progressivas pelas quais o produto é feito. Ou seja, cada produto segue um roteiro pré-definido em que a sequência de atividades requerida coincide com a sequência na qual os processos foram arranjados fisicamente (SLACK *et al.*, 2009). Nesse caso, tipicamente utilizam-se máquinas especializadas que são configuradas uma única vez para executar uma operação específica durante um longo período de tempo em um produto (GAITHER e FRAZIER, 2002).

O arranjo físico por produto também é conhecido como arranjo físico em “fluxo” ou em “linha” (SLACK *et al.*, 2009). Adicionalmente, se o equipamento é dedicado à produção contínua de uma linha estreita de produtos, esse modelo é geralmente chamado de linha de produção ou linha de montagem (DAVIS *et al.*, 1999).

De acordo com Ritzman e Krajewski (2004), a opção por este modelo de arranjo é resultante da característica de produção repetitiva ou contínua, sendo usualmente utilizado em operações que envolvem volumes elevados. A Figura 4 ilustra um exemplo de arranjo físico por produto onde as estações de trabalho estão dispostas em linha reta. Arranjos físicos por produto em formato de L, S, O ou U também são possíveis (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).



**Figura 4 – Arranjo Físico por Produto em Linha Reta**

Fonte: (DONINNI, 2009)

As vantagens do arranjo físico por produto incluem: ritmos de processamento mais rápidos; estoques menores; menos tempo improdutivo perdido em conversões e movimentação de material (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004). Além disso, de acordo com Slack *et al.* (2009), os custos unitários para altos volumes são baixos e a oportunidade para especialização de equipamento é grande.

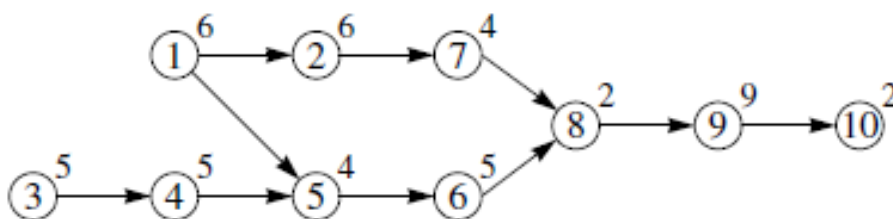
Em contrapartida, entre as desvantagens listadas por Ritzman e Krajewski (2004), citam-se: alto investimento inicial; menor flexibilidade da linha; maior custo de modificações da operação; e impossibilidade das estações trabalharem independentemente, fazendo com que o posto mais lento determine o ritmo da linha. Outras desvantagens desse modelo são a baixa robustez contra interrupções e o trabalho altamente repetitivo (SLACK *et al.*, 2009).

## 2.2 Terminologia da Análise de Linhas de Produção

Os conceitos a seguir são importantes para o entendimento do processo de balanceamento de uma linha de produção.

- **Tarefas ou elementos de trabalho:** são as menores unidades de trabalho que podem ser executadas de maneira independente (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004). Boysen *et al.* (2006) sugere uma definição alternativa que indica a tarefa como sendo uma unidade indivisível de trabalho que pode, inclusive, conter um agrupamento de pequenas ações que devem ser executadas necessariamente em sequência, sendo que a cada tarefa é atribuído um tempo de duração.
- **Precedência entre tarefas:** sequência ou ordem na qual as tarefas devem ser executadas; a precedência de cada tarefa é conhecida a partir de uma lista de tarefas que devem precedê-la imediatamente (GAITHER e FRAZIER, 2002).

- **Duração de uma tarefa:** quantidade de tempo necessária para que um trabalhador bem treinado ou uma máquina não assistida execute uma tarefa (GAITHER e FRAZIER, 2002).
- **Diagrama de precedência:** diagrama construído com o objetivo de obter uma melhor visualização de precedência entre as tarefas (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004). Um exemplo de diagrama de precedência é mostrado na Figura 5.



**Figura 5 – Exemplo de Diagrama de Precedência**

Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2004)

Neste diagrama, as tarefas são indicadas por círculos e as setas conduzem as tarefas precedentes às próximas tarefas; o número próximo a cada círculo representa o tempo requerido para a execução da respectiva tarefa. Segundo Becker e Scholl (2004), as tarefas podem ser predecessores diretos, como as tarefas 1 e 4 são para a 5, ou predecessores indiretos, como a tarefa 3 é para a 5.

- **Estação ou posto de trabalho:** localização física em que um conjunto particular de tarefas é executado (GAITHER e FRAZIER, 2002).
- **Tempo de ciclo real:** intervalo de tempo entre a saída consecutiva de dois produtos no final da linha de produção (GAITHER e FRAZIER, 2002). No caso de uma linha de montagem, o tempo de ciclo real é determinado pela estação de trabalho mais lenta da linha, comumente conhecida como “gargalo”.
- **Tempo de ciclo teórico ou *takt time*:** intervalo de tempo máximo desejável entre a saída de dois produtos consecutivos ao final da linha para se atingir a taxa de produção desejada, podendo ser obtido pela Equação (1) a seguir apresentada (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

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

em que, “*tt*” é o *takt time* em horas por unidade e “*r*” é a taxa de produção desejada em unidades por hora.

- **Número mínimo de estações de trabalho:** menor número de estações de trabalho que podem fornecer a produção exigida (GAITHER e FRAZIER, 2002). Pode ser calculada pela Equação (2), fornecida por Ritzman e Krajewski (2004).

$$ME = \frac{\sum t}{tt} \quad (2)$$

em que, “*ME*” representa o número mínimo de estações de trabalho necessárias e “ $\sum t$ ” é a soma dos tempos das tarefas.

- **Número real de estações de trabalho:** número total de estações de trabalho necessárias na linha de produção inteira, obtido pelo arredondamento do número mínimo de estações de trabalho para o próximo valor inteiro mais alto (GAITHER e FRAZIER, 2002). Assim, o valor do número real de estações de trabalho necessárias na linha de produção, “*RE*”, é obtido por  $RE = [ME]$ .
- **Utilização:** calculado pela Equação (3), indica a porcentagem de tempo que uma linha de produção trabalha (GAITHER e FRAZIER, 2002).

$$Utilização(\%) = \frac{ME}{RE} \cdot 100 \quad (3)$$

- **Eficiência:** razão entre o tempo produtivo (soma dos tempos das tarefas) e o tempo total (multiplicação do número real de estações de trabalho pelo *takt time*), expressa de forma percentual, como mostra a Equação (4) (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

$$Eficiência(\%) = \frac{\sum t}{RE \cdot tt} \cdot 100 \quad (4)$$

- **Ociosidade:** soma dos tempos improdutivos de cada estação de trabalho de uma linha de produção; para cada estação, o tempo ocioso é dado pelo *takt time* subtraído da soma dos tempos das tarefas. A Equação (5) expressa a ociosidade total de uma linha de produção (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004):

$$Ociosidade = RE.tt - \sum t \quad (5)$$

### 2.3 Balanceamento de Linha

Trata-se da análise de linhas de produção que divide igualmente o trabalho a ser feito entre as estações de trabalho, com o objetivo de minimizar o número de estações de trabalho necessário na linha de manufatura (GAITHER e FRAZIER, 2002). Alternativamente, de acordo com Ritzman e Krajewski (2004), balanceamento de linha é a atribuição de tarefas a estações em uma linha de modo a obter a taxa de produção desejada com o menor número de estações de trabalho e, extensivamente, com o menor número de operadores.

O balanceamento de linha pode ser aplicado em três diferentes situações: durante a instalação de uma linha; quando se necessita alterar a taxa de produção da linha; ou quando ocorre uma modificação do produto ou processo (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

De acordo com Becker e Scholl (2004), o problema de decisão de otimizar o balanceamento das tarefas ao longo das estações de trabalho, levando em consideração um objetivo a ser alcançado, é conhecido como problema de balanceamento de linha de montagem – também identificado pela sigla ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*). Qualquer tipo de ALBP consiste em encontrar um balanceamento de linha factível, no qual a distribuição de tarefas entre as estações de trabalho satisfaça tanto as relações de precedência quanto as demais restrições (BECKER e SCHOLL, 2004).

#### 2.3.1 Balanceamento de Linha de Montagem Simples (SALB)

Dentre os problemas de balanceamento de linha de montagem, o mais conhecido e estudado é o balanceamento de linha de montagem simples, ou abreviadamente SALB (*Simple Assembly Line Balancing*), que pode ser dividido em quatro subtipos, de acordo com a sua função objetivo (BOYSEN *et al.*, 2006):

- i. SALBP-1;
- ii. SALBP-2;
- iii. SALBP-E;
- iv. SALBP-F.



As quatro maneiras de caracterizar os problemas de SALB estão listadas no Quadro 1. A definição do subtipo de SALBP a ser utilizado depende dos parâmetros listados na nesse quadro.

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

**Quadro 1 – Suptipos de SALBP**

Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2004)

Como se observa no Quadro 1, quando o tempo de ciclo de uma linha é dado e deseja-se minimizar o número de estações de trabalho, o problema é do tipo SALBP-1. Por outro lado, se o número de estações de trabalho é dado e necessita-se minimizar o tempo de ciclo, trata-se do tipo SALBP-2. No caso em que tempo de ciclo e número de estações podem ser alterados com o objetivo de otimizar a eficiência da linha, tem-se um problema SALBP-E. Por fim, o tipo SALBP-F refere-se ao problema de encontrar um balanceamento factível quando o tempo de ciclo e o número de estações são dados (BOYSEN *et al.*, 2006).

Segundo Becker e Scholl (2004), um problema do tipo SALB deve possuir as seguintes características principais:

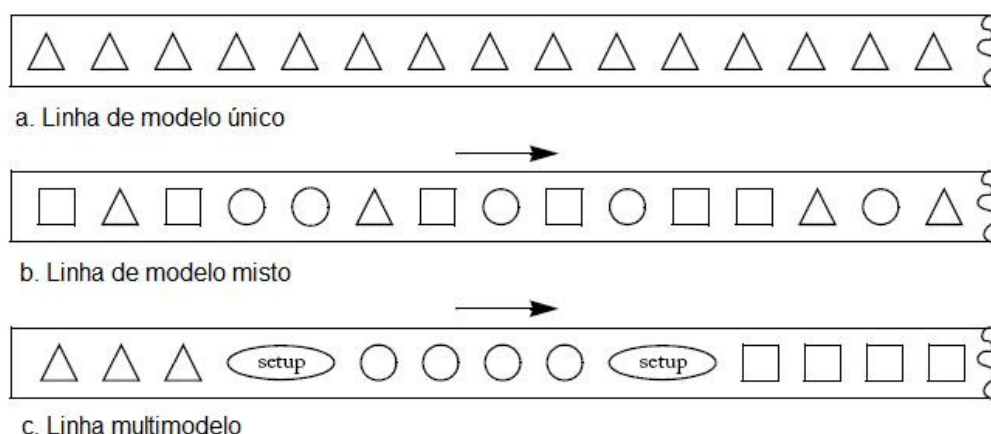
- Produção em massa de um produto homogêneo;
- Processo de produção predeterminado;
- Linha em compasso com tempo de ciclo fixo;
- Tempos de operação determinísticos e integrais, com pouca variação;
- Tarefas sem restrições de atribuição além das restrições de precedência;
- Linha em série, com número determinado de estações de trabalho;
- Todas as estações são igualmente equipadas em termos de equipamento e mão de obra.

Entretanto, de acordo com Boysen *et al.* (2006), nota-se que várias destas premissas são modificadas por diversos modelos para se adaptar à complexidade da situação real. Por exemplo, devido à demanda, é comum a existência de

sistemas de manufatura que produzem diferentes modelos de produtos em uma mesma linha de montagem (BOYSEN *et al.*, 2006). Isso pode ocorrer de duas formas diferentes em relação à configuração da linha:

1. Linha de modelo misto: a produção dos diferentes modelos de um produto básico ocorre de forma misturada na mesma linha (BOYSEN *et al.*, 2006).
2. Linha multimodelo: nesse caso, a produção ocorre em lotes; cada lote é composto por unidades de um mesmo modelo (BOYSEN *et al.*, 2006).

A Figura 6 mostra de forma esquemática o funcionamento dos modelos de linha de produção supracitados. Nota-se que cada forma geométrica representa um modelo diferente de um mesmo produto.



**Figura 6 – Linhas de produção de modelo único, misto e multimodelo**

Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2004)

### 2.3.2 Indicadores para Balanceamento de Linha

Para verificar se a execução de um balanceamento de linha foi bem sucedida em relação à distribuição de tarefas entre as estações de trabalho, dois indicadores podem ser utilizados: o Atraso de Balanceamento e o Índice de Suavidade (GERHARDT, 2005).

De acordo com Farnes e Pereira (2006), o Atraso de Balanceamento é uma medida da ineficiência da linha, que resulta em tempo improdutivo devido à distribuição imperfeita de tarefas entre as estações. Este indicador fornece um

percentual do tempo total em que a linha fica ociosa e, como mostra a Equação (6), pode ser calculado pela divisão do tempo ocioso total da linha pelo tempo que o produto leva para atravessar a linha de montagem, do começo ao fim (GERHARDT, 2005).

$$\text{Atraso de Balanceamento (\%)} = \frac{t_{total} - \sum t_{postos}}{t_{total}} \quad (6)$$

onde, “Atraso de Balanceamento (%)” indica uma medida percentual de desbalanceamento da linha, “ $t_{total}$ ” é a multiplicação do tempo de ciclo real pelo número de estações de trabalho, e “ $\sum t_{postos}$ ” indica a soma dos tempos de todas as estações.

Segundo Dessouky *et al.* (1995), um atraso de balanceamento nulo indica um balanceamento perfeito, que é obtido quando cada estação de trabalho da linha recebe a mesma carga de trabalho.

O Atraso de Balanceamento não pode ser confundido com a proporção de tempo de parada de uma linha automatizada, que é uma medida de ineficiência que resulta em paradas na linha (FARNES e PEREIRA, 2006).

Por sua vez, o Índice de Suavidade, que também é um indicador relacionado à eficiência da linha, é uma medida da variação existente entre o tempo total máximo de trabalho obtido entre as estações e os tempos totais de trabalho do restante das estações alocadas na linha de produção (GERHARDT, 2005).

Ainda de acordo com Gerhardt (2005), quanto maior este índice, maior a variação dos tempos de operação entre as estações, resultando em um balanceamento de baixa eficiência. O Índice de Suavidade pode ser calculado pela Equação (7):

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

em que, “ $RE$ ” é o número de estações de trabalho, “ $S_{max}$ ” o tempo total máximo de operação existente dentre todas as estações e “ $S_j$ ” o tempo de execução da estação “ $j$ ” (GERHARDT, 2005).

## 2.4 Programação Linear

A Programação Linear, uma área da Pesquisa Operacional (PO), é uma ferramenta matemática que permite encontrar a solução ótima para um determinado tipo de problema. O termo programação refere-se à existência de um planejamento de atividades; o termo linear, por sua vez, está relacionado com a linearidade das equações envolvidas no problema (ALMEIDA *et al.*, 2003).

### 2.4.1 Definições e Conceitos

Para a compreensão dos problemas de Programação Linear, algumas definições e conceitos são importantes:

- Função objetivo: função linear de variáveis que se pretende otimizar, ou seja, maximizar ou minimizar (ALMEIDA *et al.*, 2003).
- Variáveis de decisão: incógnitas a serem determinadas pela resolução do problema (LISBOA, 2002).
- Restrições: consiste em relacionar cada atividade e respeitar a disponibilidade dos recursos utilizados, sendo normalmente expressas na forma de equações ou inequações lineares (ALMEIDA *et al.*, 2003).
  - Restrições de não negatividade: as variáveis relacionadas na formulação do problema não podem assumir valores negativos (ALMEIDA *et al.*, 2003).
  - Restrições do problema: itens que implicam restrições às possíveis soluções (ALMEIDA *et al.*, 2003).
- Região viável ou solução viável: conjunto de restrições que representa todas as combinações admissíveis de variáveis de decisão (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).
- Parâmetro: valor que o tomador de decisão não pode controlar e que não se altera quando a solução é implementada; também conhecido como coeficiente ou constante dada (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

### 2.4.2 Hipóteses da Programação Linear

De acordo com Puccini e Pizzolato (1990 *apud* MAGATÃO, 2013, p. 14), as hipóteses fundamentais da programação linear são:

- Proporcionalidade: todos os retornos/custos e recursos utilizados variam de forma proporcional ao valor da variável do modelo.
- Aditividade: o efeito total de duas variáveis é a soma dos efeitos relacionados a cada uma delas. As hipóteses de proporcionalidade e aditividade estabelecem a linearidade da função objetivo e das restrições.
- Divisibilidade: é possível que as variáveis do modelo assumam valores fracionados.
- Certeza (determinístico): todos os parâmetros do modelo são constantes conhecidas.

### 2.4.3 Formulação e Aplicações de um Modelo Linear

Segundo Magatão (2013), o problema geral de Programação Linear é utilizado para otimizar uma função objetivo, sujeita a uma série de restrições. Nesse caso, a formulação do problema a ser resolvido segue alguns passos fundamentais (LISBOA, 2002):

- Definição da função objetivo, que representa o objetivo básico do estudo, isto é, a otimização a ser atingida.
- Identificação das variáveis de decisão envolvidas no problema.
- Identificação das restrições que afetam as variáveis.

De posse dessas informações, parte-se para a formulação de um modelo matemático, através do qual será possível resolver o problema de otimização (ALMEIDA *et al.*, 2003).

Bradley *et al.* (1977 *apud* MAGATÃO, 2013, p. 13) define a Programação Linear por meio da formulação indicada em (8):

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{max} \quad cx \\
 & Ax = b \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

onde,  $c$  é um vetor linha  $n$  dimensional de fatores de ponderação (pesos);  $x$  é um vetor coluna  $n$  dimensional de variáveis do modelo;  $A$  é uma matriz  $m$  por  $n$ ;  $b$  é um vetor coluna  $m$  dimensional ( $m$  define o número de equações do modelo); e  $x \geq 0$  refere-se à restrição de não negatividade.

De acordo com Almeida *et al.* (2003), é possível utilizar esse tipo de formulação para tomada de decisões em diversas aplicações, como por exemplo: planejamento agregado de produção; análise de produtividade de serviços; planejamento de produtos; otimização do fluxo produtivo; otimização do processo de produção.

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

Para o problema de balanceamento da linha em estudo, as possíveis soluções serão obtidas por meio de um modelo de Programação Linear Inteira Mista. Segundo Magatão (2013), esse modelo leva em consideração o fato de que certas variáveis devem assumir valores inteiros, e pode ser definido pela formulação apresentada em (9):

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{max} \quad cx + hy \\
 & Ax + Gy = b \\
 & x \geq 0 \\
 & y \in Z_+
 \end{aligned} \tag{9}$$

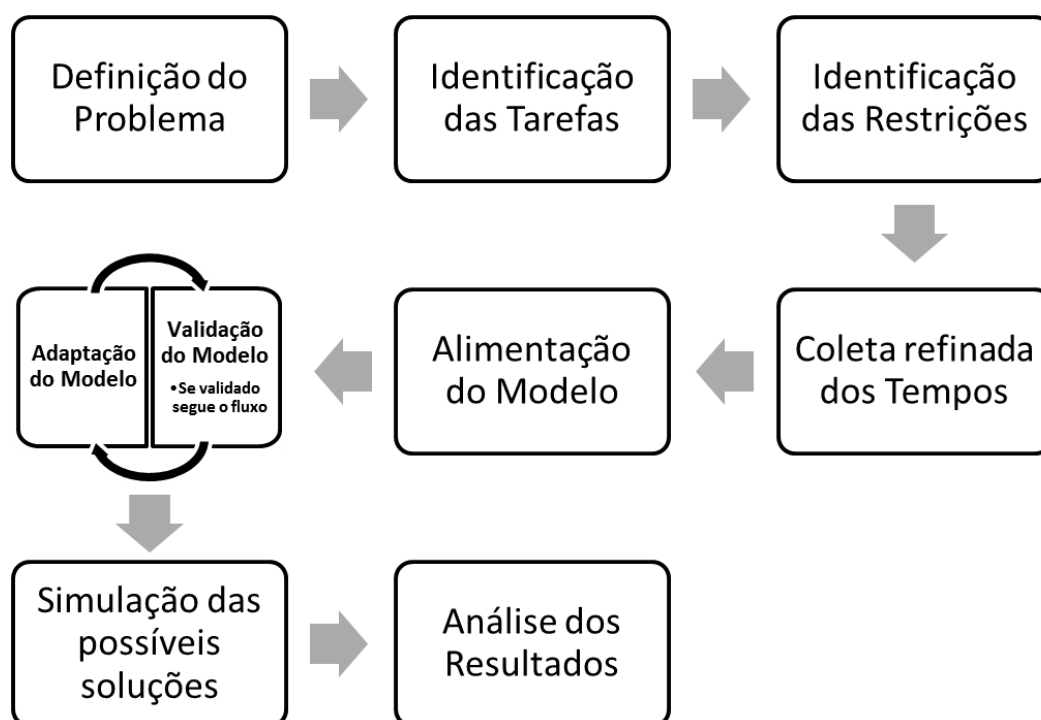
na qual,  $h$  é um vetor linha  $p$  dimensional de pesos;  $y$  é um vetor coluna  $p$  dimensional de variáveis que devem assumir valores inteiros; e  $G$  é uma matriz  $m$  por  $p$ .

A diferença entre o número de variáveis ( $n + p$ ) e o número de equações ( $m$ ) do modelo é conhecida por graus de liberdade apresentados pelo sistema (MAGATÃO, 2013).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 Descrição da Metodologia

O fluxograma apresentado na Figura 7 ilustra a metodologia aplicada para o presente projeto.



**Figura 7 – Fluxograma da Metodologia**

Fonte: Autoria própria

A metodologia deste projeto foi baseada em trabalhos de conclusão de curso sobre o mesmo tema (DONNINI, 2009; MARCILIO e SKRABA, 2010; MIBACH e CAMPOS, 2013; WATANABE e NAUIACK, 2013; LEAL, 2013), para os quais um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o problema de balanceamento de linha foi desenvolvido. Assim, seguindo os passos do fluxograma acima, o trabalho apresenta uma implementação e adaptação deste modelo para a situação problema da linha de caixas de transmissão em questão. A seguir, serão descritos cada passo da metodologia.

## **1. Definição do Problema**

Na definição do problema são estabelecidas as hipóteses de representação e ficam caracterizados os objetivos a serem atingidos com a formulação proposta (MAGATÃO, 2013). No presente caso, foi identificado e justificado o problema de balanceamento da linha em questão, conforme seções preliminarmente apresentadas.

## **2. Identificação das Tarefas**

Na sequência, cada estação de trabalho teve suas tarefas desmembradas e sequenciadas. Essa etapa foi desenvolvida juntamente com especialistas da linha, de forma que cada atividade de montagem fosse levada em consideração.

Para efeitos de balanceamento de linha, algumas tarefas elementares executadas necessariamente em sequência no mesmo posto podem ser agrupadas em blocos de tarefas, conforme evidenciam trabalhos da literatura (e.g. DONNINI, 2009; MARCILIO e SKRABA, 2010; MIBACH e CAMPOS, 2013). Esta ação tem o intuito de reduzir o número de tarefas a serem avaliadas pelo modelo matemático, de forma a não gerar desnecessária carga computacional.

Alternativamente, quando possível, algumas tarefas, principalmente as de longa duração, podem ser divididas. Este procedimento tem o intuito de prover uma alternativa de realocação para o modelo matemático tentar melhor equilibrar a carga de trabalho dos diferentes postos. Este procedimento já foi explorado com sucesso em, por exemplo, Marcilio e Skraba (2010) e Leal (2013). Por vezes, tarefas de longa duração, fixas a um determinado posto de trabalho, comprometem significativamente o balanceamento de linha, conforme evidenciado em Donnini (2009).

## **3. Identificação das Restrições**

A linha de montagem em questão possui diversas restrições devido à geometria, funcionalidade e processo de montagem do produto, as quais foram respeitadas. Nesse sentido, com o objetivo de determinar a sequência das atividades e conhecer o que deve ser montado antes e depois de cada tarefa, assim como a possibilidade de realocação, o diagrama de precedências das tarefas foi



construído, identificando o grau de liberdade de cada uma. Esse trabalho também foi realizado com a participação de especialistas da linha.

#### **4. Coleta Refinada dos Tempos**

Em um primeiro momento foram coletados os tempos por operador, por estação, no intuito de revelar o desbalanceamento existente. No entanto, para otimizar esse balanceamento é inerente uma redistribuição de tarefas e, para tanto, fez-se necessário a coleta refinada dos tempos de cada tarefa. Ou seja, nessa etapa foram coletados os tempos necessários para a execução de cada grupo indivisível de atividades existente nas diversas estações de trabalho da linha. A equipe do projeto fez a tomada de tempos baseado no diagrama de precedência elaborado na fase anterior.

#### **5. Alimentação do Modelo**

Os trabalhos de conclusão de curso desenvolvidos por Donnini (2009), Marcilio e Skraba (2010), Watanabe e Naujack (2013) e Leal (2013) foram orientados pelo professor Leandro Magatão (UTFPR/DAMEC) no tema de balanceamento de linhas. Ao longo da execução destes trabalhos, um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista voltado à resolução de problemas de balanceamento de linha foi proposto. O modelo matemático desenvolvido em Leal (2013) é aprimorado no presente trabalho, conforme detalhado *a posteriori* no Capítulo 4.

Com o diagrama de precedência e os dados de tempo do cenário real em análise, alimentou-se, inicialmente, o modelo matemático apresentado em Leal (2013) e analisou-se a capacidade de representação do cenário em estudo. Nesse momento, foram detalhadamente avaliadas as alterações necessárias que deveriam ser implementadas para tornar o modelo mais aderente à realidade operacional em estudo. No entanto, sabia-se *a priori* que a versão do modelo apresentada em Leal (2013) não abrange, por exemplo, tarefas totalmente automáticas no posto de trabalho. Assim, a fase de adaptação e validação do modelo foi fundamental.

## **6. Adaptação e Validação do Modelo**

A linha em estudo possui processos manuais e processos totalmente automáticos no mesmo posto de trabalho. A versão do modelo apresentada em Leal (2013) somente contempla tarefas automáticas que devem ser inicializadas por um operador. Tarefas totalmente automáticas não estavam contempladas na modelagem, assim como não existia a restrição para o trabalho de operadores em um conjunto limitado de estações, o que demandou uma readaptação do modelo.

Assim, nesta etapa foi realizada a adaptação do modelo para o processo de produção da linha de montagem de caixas de transmissão em análise. Além disso, validou-se a funcionalidade do modelo baseado em simulações no ambiente de modelagem e resolução computacional *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013); ou seja, o modelo foi testado e validado para o processo de montagem em *software* específico.

## **7. Simulação das Possíveis Soluções**

Com o modelo adequado para o processo de montagem em análise, uma série de execuções teste, ou simulações, foi realizada a fim de se chegar a uma solução otimizada para o problema de balanceamento deste projeto.

## **8. Análise dos Resultados**

Os resultados obtidos pelas simulações foram analisados e avaliados quanto à viabilidade de aplicação, considerando principalmente os ganhos de produtividade, redução de custos e investimentos para readaptação da linha.

### **3.2 Justificativa da Metodologia**

A diminuição de custos de produção e a melhoria em produtos e serviços são objetivos comuns a todos os setores industriais. Contudo, o processo de tomada de decisões operacionais ainda é conduzido pelo emprego de critérios experimentais. A complexidade do planejamento (*planning*) e programação (*scheduling*) da produção é contornada pela adoção de políticas operacionais conservativas, que não utilizam a capacidade máxima de operação do sistema produtivo (MAGATÃO, 2013).

Motivado pela necessidade industrial, o desenvolvimento de modelos, em especial os que empregam técnicas de otimização, tem possibilitado que

procedimentos operacionais complexos sejam avaliados de forma criteriosa, fazendo com que recursos críticos possam ser utilizados da melhor maneira possível. Neste contexto, um campo da análise de decisão denominado Pesquisa Operacional tem alcançado evolução notória. O uso de técnicas da Pesquisa Operacional na modelagem das estratégias de planejamento e programação da produção tem se mostrado como um fator decisivo para o desenvolvimento de políticas otimizadas de operação industrial. Em particular, o mercado nacional vem despertando para o grande potencial econômico apresentado por este tipo de modelagem. A razão para o interesse é simples: os modelos obtidos evidenciam procedimentos que levam a diminuição dos custos produtivos (MAGATÃO, 2013).

Além desses fatores, pode se citar bons exemplos de utilização de modelo de Programação Linear Inteira Mista, implementados através de metodologias semelhantes, na resolução de problemas de balanceamento, quais sejam:

“Com os resultados obtidos através dos modelos matemáticos, pôde-se verificar o ganho potencial das soluções de balanceamento. A análise da viabilidade dos resultados, realizada por um dos autores e especialista do sistema, identificou pontos de potencial melhoria no balanceamento da linha de montagem, principalmente no que diz respeito ao equilíbrio da carga entre os operadores, uma vez que a movimentação de tarefas entre os postos de trabalho é bastante restrita” (MARCILIO e SKRABA, 2010).

“O resultado deste trabalho foi uma possibilidade de redução do tempo de ciclo de 140,5 para 127,2 segundos, ou seja, um ganho de 10,4% (47,7 peças na produção diária) de produtividade. O investimento necessário para a implementação desses resultados na empresa é muito baixo, uma vez que o balanceamento não requer a compra de máquinas” (MIBACH e CAMPOS, 2013).

### **3.3 Produtos do Projeto**

A entrega principal do projeto é um modelo matemático aprimorado, implementado em computador, capaz de prover soluções otimizadas de balanceamento da linha de montagem de caixas de transmissão de uma empresa automobilística da região metropolitana de Curitiba-PR.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### 4.1 Problema e Desenvolvimento do Projeto

O objeto de estudo do presente projeto é a linha de montagem de caixas de transmissão de uma empresa automobilística localizada na região metropolitana de Curitiba.

O desenvolvimento do projeto iniciou-se com a coleta de dados da linha de montagem em estudo. Documentos já existentes na linha, tais quais as Instruções de Trabalho Padronizado de cada operação, foram utilizados como fonte de informação. A partir desses documentos, foi possível listar todas as atividades que devem ser realizadas para a fabricação do produto. Chegou-se a um número total de quase 1300 pequenas atividades, que representam parcelas mínimas do trabalho realizado e que foram validadas através de observação direta na linha de produção.

Com o intuito de facilitar a análise e a posterior modelagem matemática, essas atividades foram agrupadas em blocos, levando em consideração a funcionalidade/similaridade entre elas, além das restrições referentes à posição de determinados equipamentos e ferramentas. No presente trabalho, esses blocos serão denominados simplificada e como tarefas, que representam parcelas mais significativas do trabalho. Cada bloco é constituído por um conjunto de operações, agrupadas segundo a experiência do especialista do sistema, observando as operações que não podem ser executadas de modo independente uma em relação à outra (MARCILIO; SKRABA, 2010).

Num primeiro momento, para fins de avaliação e ainda com uma versão do modelo matemático baseada em Leal (2013), foram estabelecidas 165 tarefas para se realizar o balanceamento. Entretanto, ao inserir no modelo matemático os dados referentes a essas 165 tarefas, não foi possível obter um resultado em tempo computacional de poucos minutos, conforme desejado *a priori*. Isso porque, com essa quantidade de tarefas, muitas variáveis e restrições foram criadas no modelo (por exemplo, mais de 150 mil restrições), acarretando-se um tempo computacional de mais de uma hora (IBM-CPLEX versão 12.4, executado em um processador Intel i3, 1.33 GHz), sem existir convergência para um resultado factível.

Dessa forma, foi necessário reavaliar e reorganizar as tarefas consideradas no estudo. Fazendo-se uma análise mais criteriosa das atividades e agrupando-se tarefas subsequentes e que não poderiam ser deslocadas a outras estações de trabalho, chegou-se, então, a um número de 121 tarefas a serem, de modo simplificado, consideradas para o modelo matemático. Durante esse processo de simplificação, tarefas fixas manuais e automáticas foram agrupadas, reduzindo o nível de detalhamento dos dados. Isso diminuiu as possibilidades de realocação e/ou trabalho simultâneo do modelo. As estações ST010 e ST015 também foram agrupadas em uma única estação, reduzindo o número de estações de 24 para 23, para fins computacionais.

Posteriormente ao agrupamento de atividades, realizou-se a coleta dos tempos necessários para a realização de cada uma das 121 tarefas. A medição desses tempos foi realizada com o auxílio de vídeos com gravações de cada uma das operações da linha. A título de exemplo, a Tabela 1 a seguir mostra a alocação original das tarefas na estação ST010/15, a precedência entre elas e os respectivos tempos de execução. A tabela completa com a alocação das tarefas em todos os postos de trabalho encontra-se no Apêndice B.

**Tabela 1 – Alocação original das tarefas, precedências e seus respectivos tempos de operação da estação ST010/15**

Estação	Tarefa	Descrição	Precedência	Duração (UT)
1. ST010/15	1	Preparação para prensagem da engrenagem de ré e rolamento no eixo principal		150
	2	Montagem dos rolamentos e engrenagens da HP	1	1260
		Medição da folga para definição do espaçador		
		Verificar anel		
		Prensagem da engrenagem de ré e rolamento no eixo principal		
		Montar e prensar a luva do engate, os rolamentos agulha, a roda dentada (sensor), a pista do rolamento agulha (buchas) e o cubo.		
	2	Montar e prensar o rolamento e anel espaçador (Conjunto "HP")	1	1200
		Parafusar a porca para fixar as engrenagens, montar o conjunto sincronizador e rolamento. Descarregar o eixo principal para o carrinho e levar até a ST020		

Fonte: Autoria própria

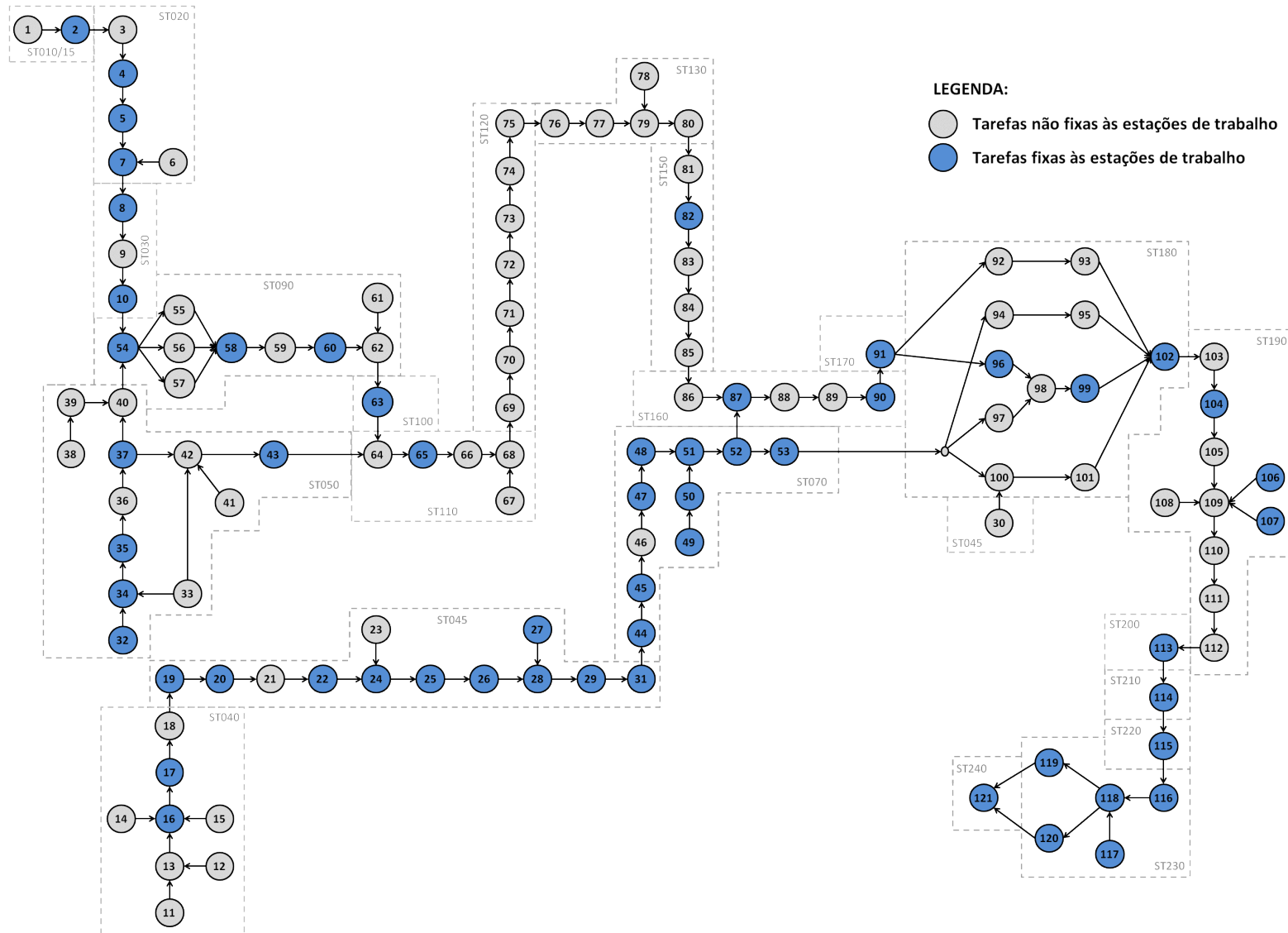
Adicionalmente, foram determinados os tempos médios de deslocamento dos operadores entre as estações, pois estes devem ser levados em conta na carga de trabalho do operador, quando ele atuar em mais de uma estação (MARCILIO; SKRABA, 2010). A Figura 8 expõe os tempos de deslocamento considerados entre os postos de trabalho. Observa-se que se trata de uma matriz simétrica, isto é, os tempos são iguais nos dois sentidos de deslocamento entre duas estações.

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1.ST010/15		5,6	5,6	4,2	7	9,8	9,8	12	11	9	7,8	7,1	7,7	8,5	9,9	11	13	15	17	19	21	23	34
2.ST020			0,7	9,8	13	4,2	15	8,2	7,4	7	7,4	8,2	11	13	14	16	18	20	22	24	25	26	37
3.ST030				9,8	13	4,2	15	8,2	7,4	7	7,4	8,2	11	13	14	16	18	20	22	24	25	26	37
4.ST040					2,8	14	5,6	16	14	12	10	9	7,8	7,1	7	7,6	8,5	9,9	11	13	15	17	28
5.ST045						17	2,8	18	16	14	13	11	9,4	8,2	7,3	7	7,3	8,2	9,4	11	13	14	26
6.ST050							20	7	7,3	8,2	9,4	11	13	14	16	18	20	22	24	26	27	28	39
7.ST070								21	19	17	15	13	11	9,9	8,5	7,6	7	7,1	7,8	9	10	11	22
8.ST090									7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	22	24	26	27	28	39
9.ST100										7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	22	24	26	27	39
10.ST110											7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	22	24	25	36
11.ST120												7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	22	22	34
12.ST130													7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	21	32
13.ST140														7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	20	31
14.ST150															7,3	8,2	9,5	11	13	14	16	18	29
15.ST160																7,3	8,2	9,5	11	13	14	15	27
16.ST170																	7,3	8,2	9,5	11	13	14	25
17.ST180																		7,3	8,2	9,5	11	12	23
18.ST190																			7,3	8,2	9,5	11	22
19.ST200																				7,3	8,2	9,1	20
20.ST210																					7,3	8,4	20
21.ST220																						9,8	21
22.ST230																							11
23.STSaida																							

**Figura 8 – Tempos de Deslocamento dos Operadores entre as Estações**

Fonte: Autoria própria

Com o objetivo de conhecer a sequência na qual as tarefas devem ser executadas, as relações de precedência foram estabelecidas, respeitando a ordem de montagem dos componentes e a ordem imposta pelo processo. Ressalta-se que algumas tarefas possuem restrições físicas, pois necessariamente devem estar em alguns postos específicos, como é o caso das tarefas 63 e 90, alocadas nos postos ST100 e ST170, respectivamente, que por se tratar de tarefas realizadas por robôs, não poderiam ser realocadas a outras estações. Para se obter uma melhor visualização da precedência entre as tarefas, o diagrama de precedência da linha foi construído e está ilustrado na Figura 9. O diagrama destaca as estações às quais as tarefas são originalmente vinculadas.



**Figura 9 – Diagrama de Precedências**  
 Fonte: Autoria própria

## 4.2 Evolução do Modelo Matemático

Após essa primeira fase de coleta e organização das informações da linha, a segunda etapa consistiu em inserir os dados no modelo matemático e iniciar a fase de adaptação do modelo para o presente projeto. Para o presente caso, o modelo utilizado foi desenvolvido com o auxílio do *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013).

Segundo Leal (2013), as premissas de modelagem utilizadas no modelo de referência foram:

- Cada tarefa deve estar alocada em um posto de trabalho: esta restrição é necessária para que o modelo considere a realização de todas as tarefas, e realize a distribuição das tarefas nos diferentes postos;
- Tarefas podem estar fixas a algum posto de trabalho: essa é uma restrição, via de regra, que é imposta em consequência do projeto da linha e arranjo de equipamentos/dispositivos. Normalmente há tarefas que demandam para sua realização um dispositivo/equipamento específico, que está alocado apenas em um posto. No diagrama de precedência as tarefas que estão fixas a um determinado posto estão destacadas com cor específica;
- Relações de precedência entre as tarefas: estas restrições são oriundas das características operacionais que devem ser respeitadas ao longo do processo de produção;
- Cada tarefa deve ser realizada por somente um operador: esta restrição é utilizada para que o modelo considere a realização de todas as tarefas e as distribua para somente um dentre os diferentes operadores;
- Exceção é feita às tarefas denominadas Tarefas Comuns as quais demandam mais de um operador para a sua execução. Neste caso, deve ser informado ao modelo matemático quais são as tarefas comuns e o número de operadores que cada uma demanda para a sua execução;



- Uma tarefa é realizada uma única vez por um operador: restrição adotada para evitar que uma tarefa seja executada mais de uma vez;
- Um operador é alocado a um posto se realizar tarefas naquele posto: restrição adotada para associar o operador a um posto de trabalho;
- As tarefas de um posto são realizadas por um único operador: restrição utilizada para limitar a presença de mais de um operador em um mesmo posto. Exceção é admitida para acomodar a condição de Tarefas Comuns realizadas nos postos de trabalho;
- Um operador pode realizar tarefas em mais de um posto: restrição observada a partir da prática operacional da linha em estudo;
- Se um operador realizar tarefas em postos distintos seu deslocamento entre os postos deve ser considerado: restrição necessária para aproximar o modelo da realidade observada no processo produtivo;
- O tempo de ciclo real da linha pode ser determinado tanto pelo posto quanto pelo operador com maior tempo de operação: considerou-se que o tempo de operação do operador também pode impor um gargalo produtivo.

Após entendimento do problema prático, observou-se que duas condições operacionais precisavam ser aprimoradas no modelo de referência: (i) Tarefas Totalmente Automatizadas; (ii) Trabalhadores que devem executar tarefas somente em um conjunto de estações.

#### **4.2.1 Evolução do Modelo Matemático: Tarefas Totalmente Automáticas**

No modelo de referência apresentado em Leal (2013) existia o conceito de Tarefas Automáticas (AT – *Automatic Task*), ou seja, aquelas realizadas em estações automatizadas mediante comando efetuado por trabalhador. Por exemplo, liberação de execução de tarefa após inspeção visual e pressionamento de botoeira. Neste caso após a liberação de uma AT, o trabalhador ficava livre para a execução de outras tarefas a ele atribuídas. À Tarefa Automática vinculava-se um operador responsável por sua liberação. À carga de trabalho do operador que executava a liberação da AT, não se vinculava a duração da execução da tarefa em si e sim

apenas o tempo de deslocamento até a estação e o tempo necessário à liberação, se este fosse significativo.

O modelo de referência não contemplava, contudo, a existência de Tarefas Totalmente Automáticas presentes na linha produtiva (TAT – *Total Automatic Tasks*), ou seja, tarefas realizadas em estações de trabalho que não demandam auxílio de operadores em momento algum. Neste caso, tanto a inicialização/d Descarregamento quanto a realização da tarefa são automáticas e não devem estar atreladas a operadores. Contudo, tarefas totalmente automáticas podem ser parte integrante de linhas de produção e, assim, influenciarem no tempo de ciclo do sistema. Este fato é observado no estudo de caso em questão, onde as estações ST100 e ST170 possuem automação suficiente para não demandarem interferência de operadores. As peças são transportadas via *conveyor* até a estação onde um sensor detecta a presença das mesmas e inicia a execução das tarefas. Após as tarefas necessárias serem executadas por robôs, as peças seguem o fluxo produtivo.

No modelo matemático de referência ocorreram modificações na geração de conjuntos e restrições de forma a contemplar a existência das Tarefas Totalmente Automáticas. O Apêndice A apresenta o modelo completo e aprimorado no presente estudo.

#### **4.2.2 Evolução do Modelo Matemático: Alocação Factível de Trabalhadores**

No modelo de referência apresentado em Leal (2013) existia o conceito de Trabalhadores Fixos a uma estação de Trabalho (*TSEX*). Assim, informava-se no arquivo de dados que um trabalhador deveria permanecer realizando as tarefas específicas alocadas a uma estação de trabalho e esta diretriz era seguida pelo modelo matemático para a obtenção de resultados. No caso de um trabalhador não estar especificado no conjunto *TSEX*, então, o mesmo estaria, em tese, livre para executar tarefas na estação (ou nas estações) designadas pelo modelo matemático. Esta liberdade, contudo, poderia conduzir a soluções matematicamente viáveis, mas que, na prática, poderiam ser difíceis de implementar.

No trabalho de Watanabe e Naujack (2013) evidencia-se esta limitação onde, em experimentos preliminares, o modelo matemático tendia a designar um trabalhador realizando tarefas em estações de trabalho distintas e distantes,

ocasionando longos deslocamentos carregado com tubos de aço de massa no limite ergonômico. Apesar de viável, o deslocamento era ergonomicamente não recomendável.

A partir dos apontamentos do trabalho de Watanabe e Naujack (2013), e da observação da realidade operacional da linha em estudo, detectou-se a necessidade de se estabelecer uma funcionalidade no modelo que permitisse designar um trabalhador a combinações viáveis de estações para realização de tarefas. Desta forma, implementou-se na nova versão do modelo a função *WSFEAS (Feasible Allocation of Workers)* para restringir as possibilidades de alocação de trabalhadores a um conjunto de estações. Desta forma, o modelo permite fixar um trabalhador a uma estação específica (funcionalidade *TSTFIX*) ou, alternativamente, informar que o mesmo pode realizar tarefas em um conjunto limitado de estações (funcionalidade *WSFEAS*).

De forma similar ao ocorrido no caso das Tarefas Totalmente Automáticas, no modelo matemático de referência ocorreram modificações na geração de conjuntos e restrições de forma a contemplar a existência de limitações de deslocamento dos trabalhadores a um conjunto de estações. O Apêndice A apresenta o modelo completo e aprimorado no presente estudo.

### **4.3 Considerações sobre Aplicação do Modelo ao Estudo de Caso**

Fazendo-se uso das funcionalidades aprimoradas no modelo matemático, conforme seção anterior, o existente arquivo de dados foi preenchido para o caso de estudo, o qual envolve: o número de tarefas (121), a quantidade de estações de trabalho (23) e o número de operadores da linha (18). Lembrando-se que, nesta linha, é realizada a manufatura de apenas um modelo do produto.

Em seguida, para redução de variáveis e redução do tempo computacional, três operadores foram fixados nas estações 1, 18 e 21. Também foram inseridas as durações de cada tarefa, além dos tempos de deslocamento dos operadores entre estações, de acordo com a Tabela 1 e a Figura 8. Posteriormente, as relações de precedência entre as tarefas foram implementadas, conforme o diagrama de precedência da Figura 9.

Adicionalmente, foi necessário incluir algumas restrições relacionadas ao local de realização de determinada tarefa, ou seja, a realização da tarefa X só pode acontecer na estação Y (*Tasks Fixed to Workstations*). Por exemplo, as tarefas 19, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 31 são fixas à estação ST045.

O caso em estudo apresenta duas tarefas totalmente automatizadas, isto é, tarefas que iniciam automaticamente, sem a presença de um operador, e que também são totalmente executadas sem a presença deste. A funcionalidade de contemplar Tarefas Totalmente Automáticas (*TAT – Totally Automated Tasks*) foi implementada no desenvolvimento do presente trabalho. As tarefas 63 e 91 foram, portanto, configuradas como TAT, sendo estas também fixas às estações ST100 e ST170, respectivamente.

Ao iniciar as simulações com o diagrama de precedência já simplificado, o modelo ainda não estava convergindo em relativo baixo tempo computacional (segundos a poucos minutos) para soluções factíveis. Assim, após análise das limitações físicas de deslocamentos dos operadores, utilizou-se a função implementada no presente trabalho WSFEAS (*Feasible Allocation of Workers*) para restringir as possibilidades de alocação de operadores. A título de exemplo, as últimas atividades do diagrama de precedência (Tarefa 113 a 121) são fixas e não permitem uma boa distribuição das tarefas entre as estações, gerando uma lacuna de tempo livre para o operador da estação ST240. Este tempo deve ser utilizado para a realização de outras tarefas em estações diferentes, contudo o deslocamento deste operador para as estações mais longínquas da linha principal (ST090 a aproximadamente ST190) é longo e passa por um corredor estreito, não recomendável ergonomicamente e de alto risco de acidente. Desta forma este operador foi limitado a trabalhar nas estações ST220, ST230 e ST240, a critério do modelo. A resposta do modelo passou, então, a convergir para resultados ótimos a partir desta implementação.

Na sequência, novas análises foram necessárias para refinar o estudo de caso. Algumas restrições não haviam sido facilmente percebidas *a priori*, como a restrita possibilidade de alocação de algumas atividades. Desta forma, algumas tarefas foram limitadas à alocação em determinadas estações pela função FEATS (*Feasible*

*allocation of Tasks to workStations*) e novas atividades fixas foram descobertas, confirmando a fidelidade do modelo à realidade.

Algumas simulações foram realizadas e notou-se que os resultados propostos pelo modelo ainda não representavam uma resposta aderente para o caso de estudo em questão. Na prática, havia a presença de uma estação vazia (ST140) na condição de referência (Figura 1) e o modelo, no entanto, não gerava uma solução com estações vazias, devido à orientação da função objetivo que procura equilibrar a carga de trabalho entre todas as estações disponíveis. Sendo assim, o modelo foi realimentado para uma condição com 22 estações, ou seja, para fins de comparação assumiu-se que a estação ST140 não existia. Os resultados obtidos foram, então, aderentes e aprimorados em relação à condição operacional desejada e são expostos no próximo capítulo.

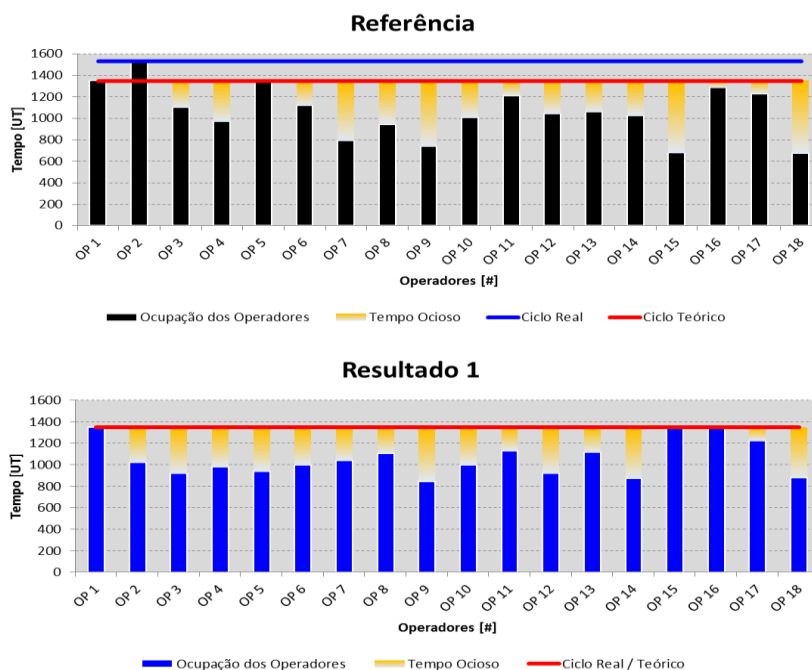
## 5 RESULTADOS

Através do modelo aprimorado e validado para o estudo de caso do presente projeto, dois diferentes resultados foram obtidos, tendo o primeiro o objetivo de minimizar o tempo de ciclo e o segundo, de reduzir o número de operadores.

Para a modelagem computacional e resolução dos modelos utilizou-se o *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.4* (ILOG-CPLEX, 2013). A plataforma computacional utilizada ao longo dos experimentos é um computador *Intel® Core™ i3 CPU U380, 1,33Ghz, 4GB RAM, plataforma Windows 7 64 bits*. Os tempos computacionais permaneceram abaixo 200 segundos nos experimentos dos resultados 1 e 2, executando-se os modelos até a otimalidade.

### 5.1 Resultado 1

O primeiro resultado é a resposta ótima para o ALBP estudado, sem alterar qualquer parâmetro, isto é, a quantidade de operadores foi mantida (18), assim como o número de estações (22) e atividades (121). A Figura 10 contém o gráfico com as ocupações dos operadores.

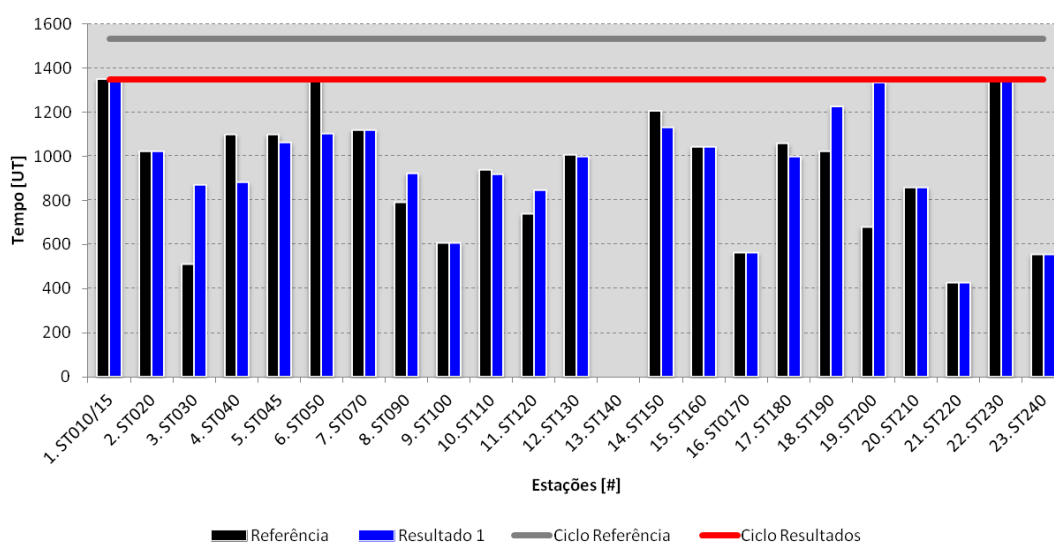


**Figura 10 – Comparação entre Ocupação dos Operadores do Resultado 1 e a Referência**

Fonte: Autoria própria

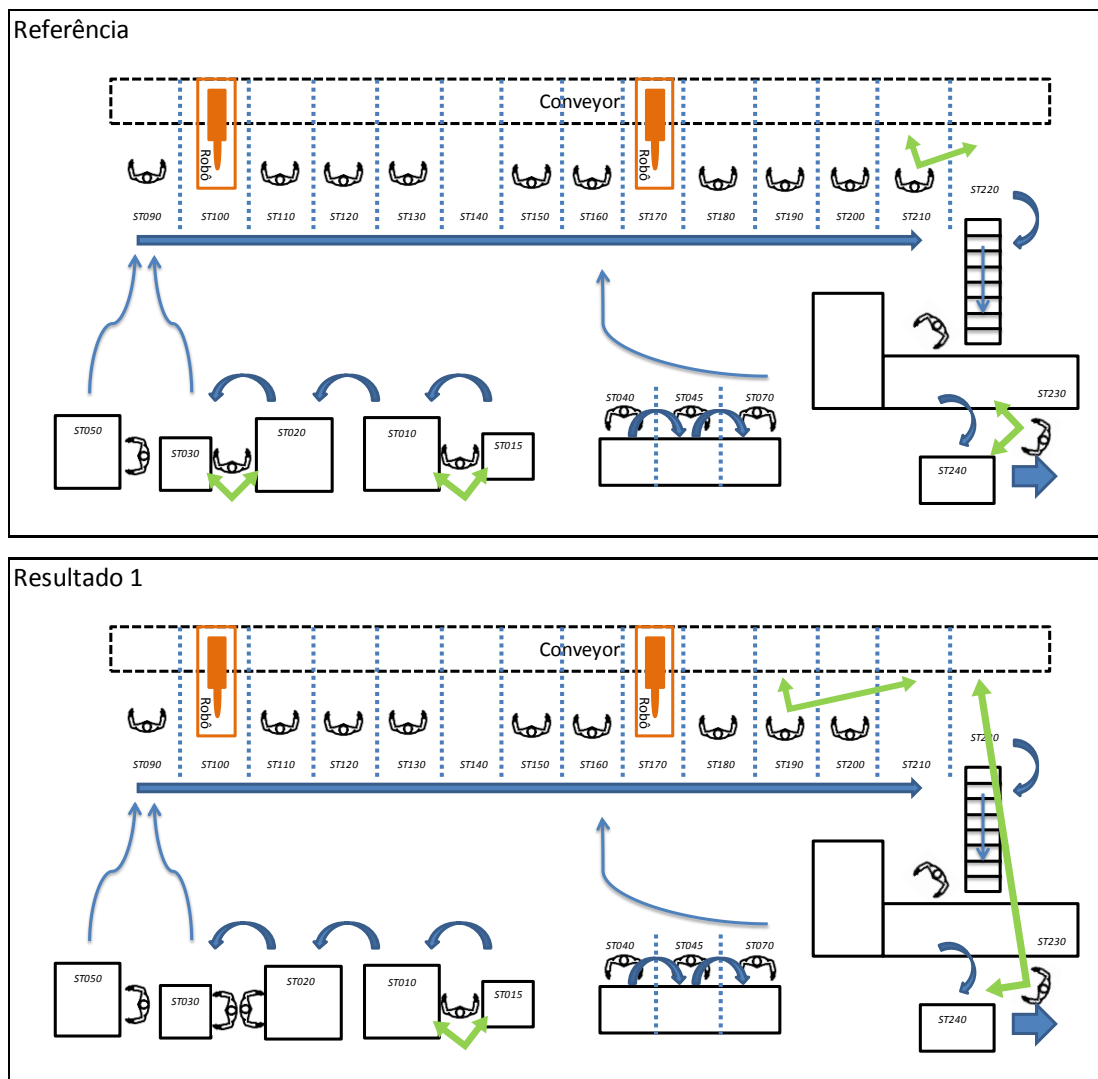
Na Figura 10, comparando com a Referência (valores da linha), pode-se notar visualmente a redução no tempo de ciclo. Já a redução na ociosidade não é, a princípio, perceptível. Contudo, a redução deste desperdício é expressa pela redução do atraso de balanceamento, o qual toma o ciclo real como base de cálculo. O Quadro 2 detalha valores em relação a este fato. Desta forma, como o ciclo real do Resultado 1 se igualou ao ciclo teórico, é notável o aumento geral da ocupação dos operadores com o ciclo real. A Figura 11 contém o gráfico da ocupação das estações. Nota-se pouca diferença entre o resultado apresentado e a situação atual, devido às restrições do processo. Como já explorado anteriormente, a linha apresentou muitas restrições de processos que impossibilitaram maiores realocações das tarefas nas estações mantendo um baixo custo.

A Figura 12 ilustra a alocação dos trabalhadores. Uma comparação entre o Resultado 1 e a Referência mostra uma redução de operadores trabalhando em mais de uma estação, passando de 4 para 3. Na solução apresentada, tem-se um operador fixo para a estação ST020 e outro para ST030, ao invés de um mútuo para as duas. Ademais, o operador da ST190 passou a ser o responsável pelas atividades da ST210 e o operador da ST240 atuará também na ST220, ao invés da ST230. Embora alguns deslocamentos tenham aumentado, a solução ainda se mostra viável ergonomicamente.



**Figura 11 – Comparação entre a Ocupação das Estações do Resultado 1 e a Referência**

Fonte: Autoria própria



**Figura 12 – Comparação entre a Alocação dos Operadores entre o Resultado 1 e a Referência**

Fonte: Autoria própria

O Quadro 2 apresenta os indicadores da solução do Resultado 1. O balanceamento dos operadores nessa simulação obteve um atraso de 22%, 9% menor que o balanceamento atual, isto é, a ociosidade dos operadores diminuiu. A suavidade também apresentou uma redução de 329 pontos, o que indica uma menor variação da ocupação dos operadores em relação à ocupação máxima obtida. Ou seja, houve uma distribuição de tarefas mais equilibrada entre os operadores.

Em relação à distribuição das tarefas nas estações, não houve melhora no atraso e uma pequena melhoria de 84 pontos na suavidade. O ciclo real, nesse caso, é determinado pelos operadores, o que justifica a redução apresentada no



balanceamento das estações, no entanto, a estação gargalo já possuía um tempo de ocupação igual ao ciclo teórico na condição de referência.

		Atraso	Suavidade	TC	Ociosidade
Operadores	Referência	31%	894	1533	23%
	Resultado 1	22%	565	1350	22%
		-9%	-329	-183	-1%
Estações	Referência	31%	948	1533	-
	Resultado 1	31%	865	1350	-
		0%	-84	-183	-

**Quadro 2 – Comparação dos Indicadores entre a Referência e o Resultado 1**

Fonte: Autoria própria

Os tempos e tarefas alocados a cada posto de trabalho são apresentados no Quadro 3 a seguir.

Posto	Tarefas	Tempo [UT]
1. ST010/15	1,2	1350
2. ST020	3,4,5,6,7	1023
3. ST030	8,9,10,11,12,13,15,23,33	873
4. ST040	14,16,17,18	883
5. ST045	19,20,21,22,24,25,26,27,28,29,30,31	1065
6. ST050	32,34,35,36,37,41,42,43	1105
7. ST070	44,45,46,47,48,49,50,51,52,53	1120
8. ST090	38,39,40,54,55,56,57,58,59,60,61,62	923
9. ST100	63	608
10. ST110	64,65,66,67,94,95,97	920
11. ST120	68,69,70,71,72,73,74,75,78	845
12. ST130	76,77,79,80,81	1000
13. ST140		0
14. ST150	82,83,84,85	1133
15. ST160	86,87,88,89,90	1043
16. ST0170	91	563
17. ST180	92,93,96,98,99,100,101,102	998
18. ST190	103,104,105,106,107,108	1228
19. ST200	109,110,111,112,113	1338
20. ST210	114	858
21. ST220	115	428
22. ST230	116,117,118,119,120	1345
23. ST240	121	555

**Quadro 3 – Alocação de Tarefas nos Postos de Trabalho do Resultado 1**

Fonte: Autoria própria

Os tempos, postos de trabalho e tarefas alocadas a cada operador são apresentados no Quadro 4 abaixo.

Operador	Postos	Tarefas	Tempo [UT]
OP 1	1. ST010/15	1,2	1350
OP 2	2. ST020	3,4,5,6,7	1023
OP 3	10. ST110	64,65,66,67,94,95,97	920
OP 4	21. ST220 + 23. ST240	115,121	983
OP 5	5. ST045	19,20,21,22,24,25,26,27,28,29,30,31	940
OP 6	17. ST180	92,93,96,98,99,100,101,102	998
OP 7	15. ST160	86,87,88,89,90	1043
OP 8	6. ST050	32,34,35,36,37,41,42,43	1105
OP 9	11. ST120	68,69,70,71,72,73,74,75,78	845
OP 10	12. ST130	76,77,79,80,81	1000
OP 11	14. ST150	82,83,84,85	1133
OP 12	8. ST090	38,39,40,54,55,56,57,58,59,60,61,62	923
OP 13	7. ST070	44,45,46,47,48,49,50,51,52,53	1120
OP 14	3. ST030	8,9,10,11,12,13,15,23,33	873
OP 15	19. ST200	109,110,111,112,113	1338
OP 16	22. ST230	116,117,118,119,120	1345
OP 17	18. ST190 + 20. ST210	103,104,105,106,107,108,114	1225
OP 18	4. ST040	14,16,17,18	883

#### Quadro 4 – Alocação de Postos e Tarefas por Operador do Resultado 1

Fonte: Autoria própria

A Figura 18, apresentada *a posteriori*, ilustra as tarefas realocadas no Resultado 1. De forma complementar, o Quadro 5 a seguir indica que apenas pequenas mudanças na linha seriam necessárias para implementar a solução obtida.

O modelo matemático gerado para o Resultado 1 apresentou 48709 restrições, 18280 variáveis, sendo 17975 binárias.

Tarefa	Descrição	Estação Inicial	Estação Proposta	Mudanças necessárias
11	Montagem das engrenagens	4	3	Mudar equipamento de estação.
12	Montagem das engrenagens	4	3	
13	Montagem das arruelas nas engrenagens	4	3	
15	Puncionamento dos eixos	4	3	
23	Levar o eixo até a bancada de montagem	5	3	Simples realocação de tarefas.
33	Desembalar a capa de rolamento e deixar em espera na prateleira. Separar a embalagem e descartar.	6	3	
38	Pegar e posicionar os bujões e visor de óleo.	6	8	Mudar parafusadeira eletrônica de estação.
39	Apertar bujões e visor de óleo	6	8	
40	Levar a carcaça principal até a MT090.	6	8	Simples realocação de tarefas.
94	Montar sensor de velocidades.	17	10	Mudar parafusadeira eletrônica de estação.
95	Apertar o sensor de velocidades do range.	17	10	
78	Retirar rebarbas dos furos onde será fixado a carcaça do filtro.	12	11	Simples realocação de tarefas.
81	Posicionar a máquina no início da estação e verificar pré montagem das tampas. Apertar os 6 parafusos escravos.	14	12	Mudar equipamento de estação.
109	Montar a TECU sobre a caixa.	18	19	Mudar o sistema de içamento de estação.
110	Apertar os parafusos de fixação da TECU.	18	19	Mudar parafusadeira eletrônica de estação.
111	Montar suporte dos tubos.	18	19	
112	Aplicar torque nos nípeis curvados e finalizar operação.	18	19	

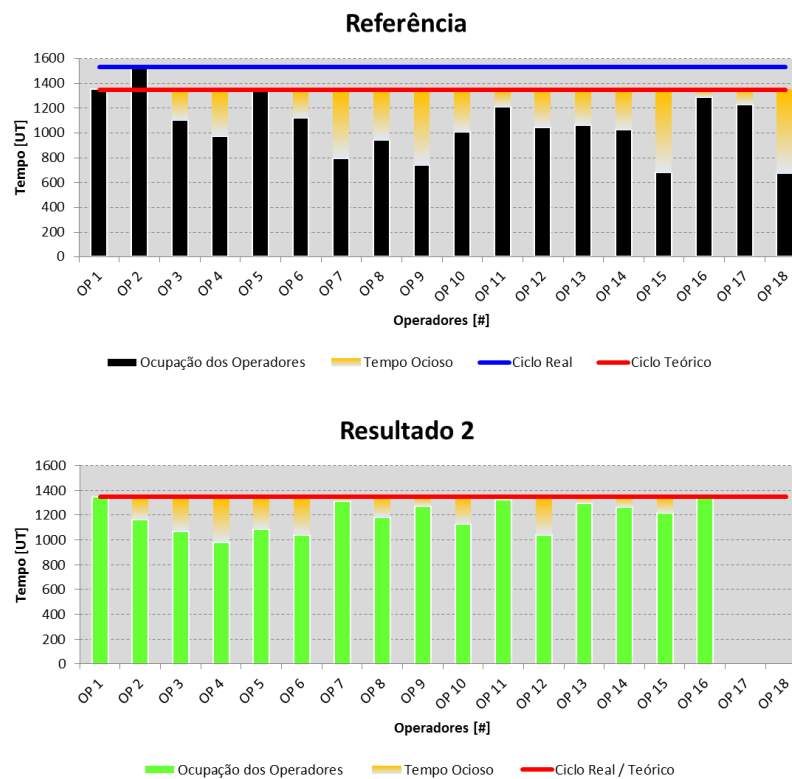
### Quadro 5 – Mudanças Necessárias para Implementação do Resultado 1

Fonte: Autoria própria

## 5.2 Resultado 2

O segundo resultado objetivou reduzir o número de operadores, mantendo o ganho de ciclo do primeiro resultado. Através de uma série de simulações, concluiu-se que o número mínimo de operadores necessários para garantir a produção no ciclo de 1350 UT é de 16. O número de estações não foi alterado, assim como nenhuma tarefa foi dividida.

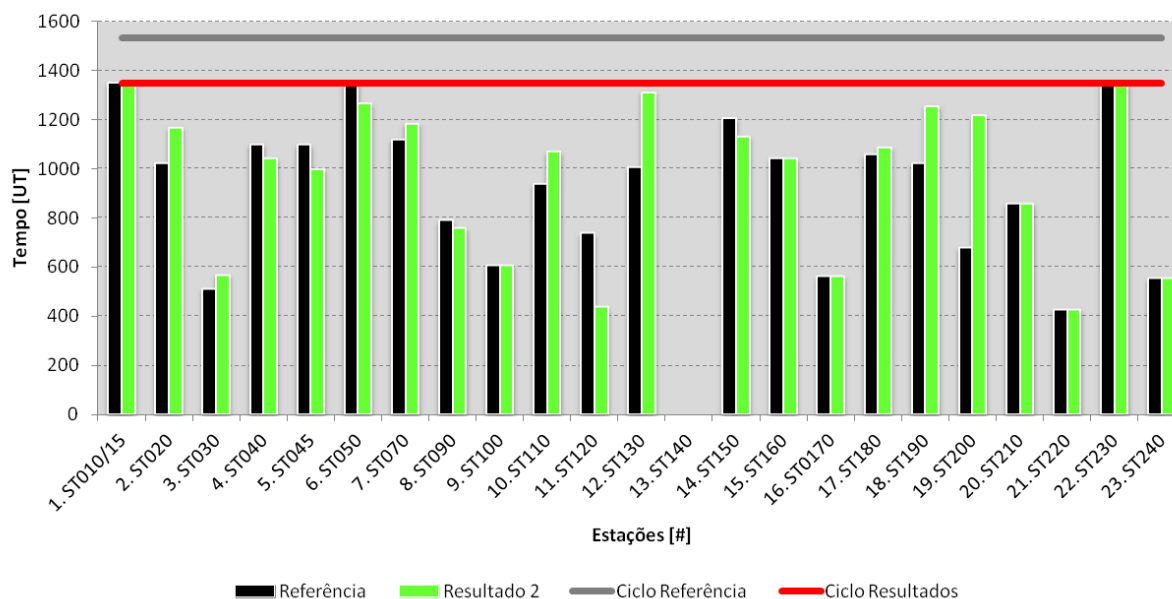
No gráfico da ocupação dos operadores na Figura 13, pode se notar a significativa redução no tempo ocioso dos trabalhadores, assim como a redução no tempo de ciclo real para o nível do ciclo teórico. Os operadores dos resultados não trabalham necessariamente nas mesmas estações do modelo de referência, devendo-se atentar a distribuição geral das ocupações. As duas colunas referentes aos OP17 e OP18 estão zeradas, pois estes representam os operadores retirados do balanceamento.



**Figura 13 – Comparação entre Ocupação dos Operadores do Resultado 2 e a Referência**

Fonte: Autoria própria

Na Figura 14, pode-se notar um leve aumento na variação da ocupação das estações, confirmando o aumento na suavidade apresentado no Quadro 6. Contudo, ainda é plausível dizer que poucas atividades foram realocadas devido às restrições de processo. É importante ressaltar também que o ganho com a redução dos operadores é muito representativo financeiramente, como será mostrado na sequência (seção 5.3), justificando a coexistência de um aumento na suavidade para a viabilidade da solução.

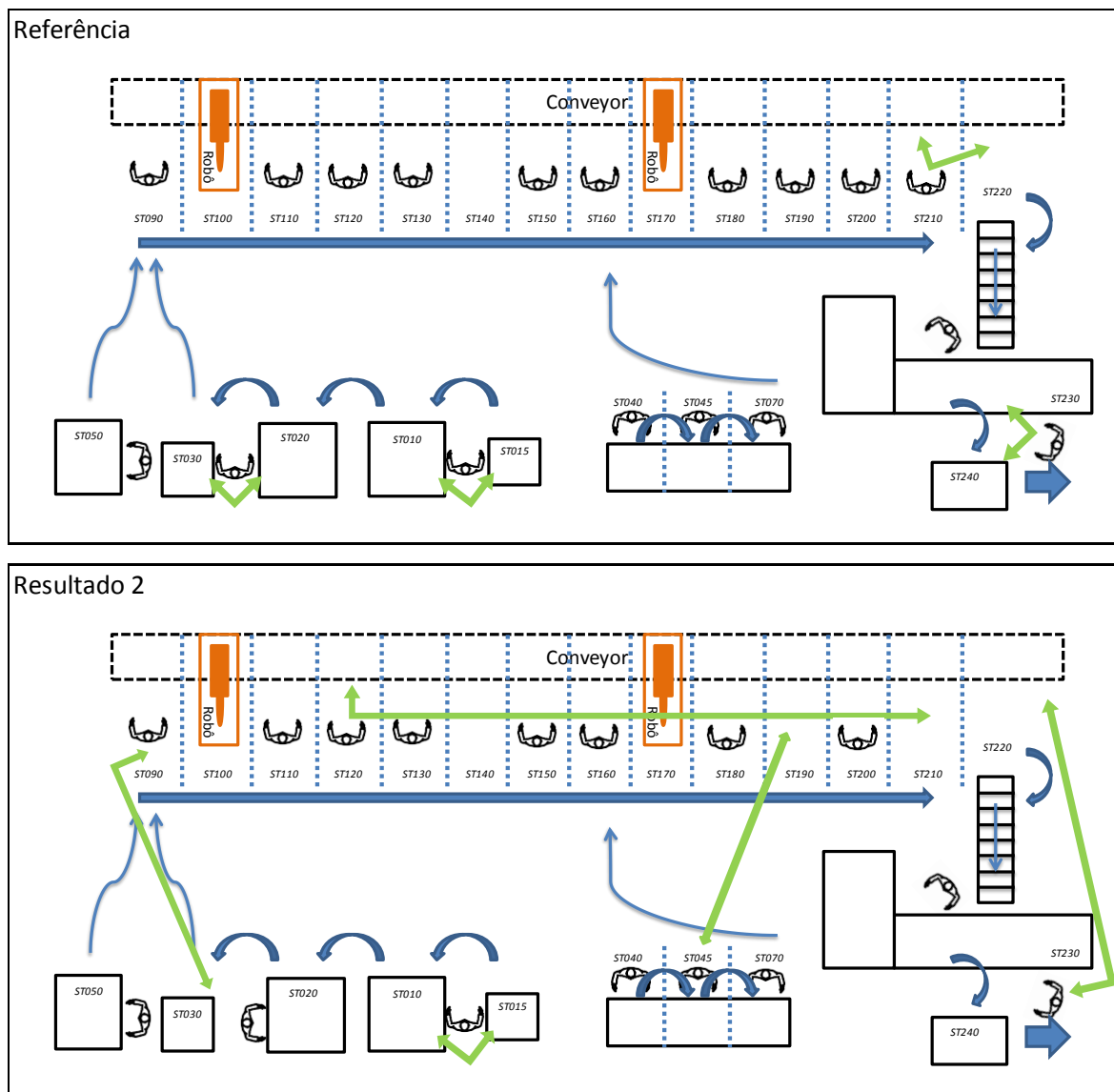


**Figura 14 – Comparação entre a Ocupação das Estações do Resultado 2 e a Referência**

Fonte: Autoria própria

Da Figura 15, percebe-se um aumento nos operadores que trabalham em mais de uma estação, passando de 4 para 5. A diferença para a situação referência é que se tem um operador trabalhando nas estações ST030 e ST090 ao invés de um operador nas estações ST020 e ST030, permanecendo um operador fixo na ST020; o operador da ST120 passa a trabalhar também na ST210, assim como o operador da ST045 passa a atuar também na ST190; por fim, o operador da ST240 atuará também na ST220 ao invés da ST230.

Embora a redução no número de operadores tenha gerado um aumento nos deslocamentos de alguns operadores, a solução ainda mostrou-se viável do ponto de vista ergonômico.



**Figura 15 – Comparação entre a Alocação dos Operadores entre o Resultado 2 e a Referência**

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no Quadro 6, o atraso do balanceamento dos operadores proposto por essa solução é de 12%, 19% menor em relação aos dados de referência, o que indica uma redução representativa da ociosidade dos operadores. A suavidade também apresentou uma redução expressiva de 580 pontos, indicando uma distribuição de atividades ainda mais justa. O tempo de ciclo real também se equiparou ao tempo de ciclo teórico e o indicador de “Ociosidade” teve 11% de melhoria. Em relação às estações, novamente o atraso de balanceamento não obteve melhoria significativa e, em contraposição, a suavidade

aumentou em 119 pontos. Isso se deve a alocação de menos atividades em determinadas estações, de forma a viabilizar o trabalho de mais operadores em mais de uma estação. O ganho no tempo de ciclo real é devido ao ciclo dos operadores. Os tempos e tarefas alocados a cada posto são apresentados no Quadro 7.

		Atraso	Suavidade	TC	Ociosidade
Operadores	Referência	31%	894	1533	23%
	Resultado 2	12%	314	1350	12%
		-19%	-580	-183	-11%
Estações	Referência	31%	948	1533	-
	Resultado 2	31%	1067	1350	-
		0%	119	-183	-

**Quadro 6 – Comparação dos Indicadores entre a Referência e o Resultado 2**

Fonte: Autoria própria

Posto	Tarefas	Tempo [UT]
1. ST010/15	1,2	1350
2. ST020	3,4,5,6,7,23,33	1168
3. ST030	8,9,10,12	568
4. ST040	11,13,14,15,16,17,18	1043
5. ST045	19,20,21,22,24,25,26,27,28,29,31	1000
6. ST050	32,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43	1268
7. ST070	30,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53	1185
8. ST090	54,55,56,57,58,59,60,62	760
9. ST100	63	608
10. ST110	64,65,66,67,68,69,94	1070
11. ST120	70,71,72,78	438
12. ST130	73,74,75,76,77,79,80,81,95,97	1313
13. ST140		0
14. ST150	82,83,84,85	1133
15. ST160	86,87,88,89,90	1043
16. ST0170	91	563
17. ST180	92,93,96,98,99,100,101,102,108	1088
18. ST190	103,104,105,106,107,109	1258
19. ST200	110,111,112,113	1218
20. ST210	114	858
21. ST220	115	428
22. ST230	116,117,118,119,120	1345
23. ST240	121	555

**Quadro 7 – Alocação de Tarefas nos Postos de Trabalho do Resultado 2**

Fonte: Autoria própria

Os tempos, postos de trabalho e tarefas alocadas a cada operador são apresentados no Quadro 8 a seguir.

Operador	Postos	Tarefas	Tempo [UT]
OP 1	1. ST010/15	1,2	1350
OP 2	2. ST020	3,4,5,6,7	1168
OP 3	10. ST110	64,65,66,67,94,95,97	1070
OP 4	21. ST220 + 23. ST240	115, 121	983
OP 5	17. ST180	92,93,96,98,99,100,101,102	1088
OP 6	4. ST040	14,16,17,18	1043
OP 7	12. ST130	76,77,79,80,81	1313
OP 8	7. ST070	44,45,46,47,48,49,50,51,52,53	1185
OP 9	5. ST045 + 18. ST190	19,20,21,22,24,25,26,27,28,29,31, 103,104,105,106,107,109	1273
OP 10	14. ST150	82,83,84,85	1133
OP 11	3. ST030 + 8. ST090	8,9,10,12,54,55,56,57,58,59,60,62	1328
OP 12	15. ST160	86,87,88,89,90	1043
OP 13	11. ST120 + 20. ST210	70,71,72,78,114	1295
OP 14	6. ST050	32,34,35,36,37,41,42,43	1268
OP 15	19. ST200	109,110,111,112,113	1218
OP 16	22. ST230	116,117,118,119,120	1345

**Quadro 8 – Alocação de Postos e Tarefas por Operador do Resultado 2**

Fonte: Autoria própria

A Figura 18 , apresentada *a posteriori*, ilustra as tarefas realocadas no Resultado 2. De forma complementar, o Quadro 9 a seguir indica que apenas pequenas mudanças na linha seriam necessárias para implementar a solução obtida. O modelo matemático gerado para o Resultado 2 apresentou 41333 restrições, 15632 variáveis, sendo 15367 binárias.

### 5.3 Resultado 1 Vs. Resultado 2

Diante dos resultados encontrados, pode se afirmar que o Resultado 2 é uma evolução do Resultado 1, já que o ganho de ciclo apresentado pelo primeiro permaneceu no segundo resultado, além da redução de dois operadores. Na Figura 16 pode-se fazer uma comparação franca dos resultados e notar a visível redução de ocupação no Resultado 2, além do ganho de ciclo dos dois resultados em relação à referência. A Figura 17 mostra a ocupação das estações nos três casos e, visualmente, a diferença de ocupação entre os casos é pequena.



Tarefa	Descrição	Estação Inicial	Estação Proposta	Mudanças necessárias
23	Levar o eixo até a bancada de montagem	5	2	Simple realocação de tarefas.
33	Desembalar a capa de rolamento e deixar em espera na prateleira. Separar a embalagem e descartar.	6	2	Simple realocação de tarefas.
12	Montagem das engrenagens	4	3	Mudar equipamento de estação.
61	Levar o carrinho trilógic até a área demarcada na MT050 e retornar à MT090.	8	6	Simple realocação de tarefas.
30	Parafusar helicoides e montar plug plástico	5	7	Mudar parafusadeira de estação.
69	Fazer verificação inicial e prensar retentor no eixo de entrada.	11	10	Mudar equipamento de estação.
94	Montar sensor de velocidades.	17	10	
78	Retirar rebarbas dos furos onde será fixado a carcaça do filtro.	12	11	
73	Montar tubo flexível.	11	12	Simple realocação de tarefas.
74	Montar CVU.	11	12	
75	Conectar o chicote CCA, cortar excesso das presilhas e finalizar operação.	11	12	
81	Posicionar a máquina no início da estação e verificar pré montagem das tampas. Apertar os 6 parafusos escravos.	14	12	Mudar equipamento de estação.
95	Apertar o sensor de velocidades do range.	17	12	Mudar parafusadeira de estação.
108	Montar pinos guias fixos e móveis e posicionar junta da TECU no assentamento da carcaça principal.	18	17	Simple realocação de tarefas.
110	Apertar os parafusos de fixação da TECU.	18	19	Mudar parafusadeira de estação.
111	Montar suporte dos tubos.	18	19	Simple realocação de tarefas.
112	Aplicar torque nos nípeis curvados e finalizar operação.	18	19	Mudar parafusadeira de estação.

### Quadro 9 – Mudanças Necessárias para Implementação do Resultado 2

Fonte: Autoria própria

O Quadro 10 apresenta o resultado de todos os indicadores para os dois resultados. Em relação aos operadores, o atraso de balanceamento foi 10% menor para o Resultado 2 em relação ao Resultado 1, assim como a suavidade melhorou 251 pontos. Ou seja, tanto a ociosidade como a distribuição de atividades foram melhores para o Resultado 2. Nos dois casos a redução no ciclo real foi de 183 UT, igualando-se ao ciclo teórico. Em relação às estações, o Resultado 1 apresentou uma distribuição mais uniforme, segundo a redução de 84 pontos no índice de suavidade. Em contraposição, o Resultado 2 piorou o índice em 119 pontos.

A Tabela 2 apresenta uma comparação financeira para estimar os ganhos dos resultados obtidos com o modelo. Segundo dados da empresa, considerou-se um

custo anual aproximado por operador de 92.400,00 \$ (unidades monetárias). O Resultado 1 apresentou um aumento potencial de 13,5% na produtividade, produzindo, anualmente, 534 caixas a mais no turno em análise, isto é, cerca de 2 caixas a mais para o turno em análise, diariamente. Considerando o custo de mão-de-obra como um custo fixo, não houve redução deste custo no Resultado 1.

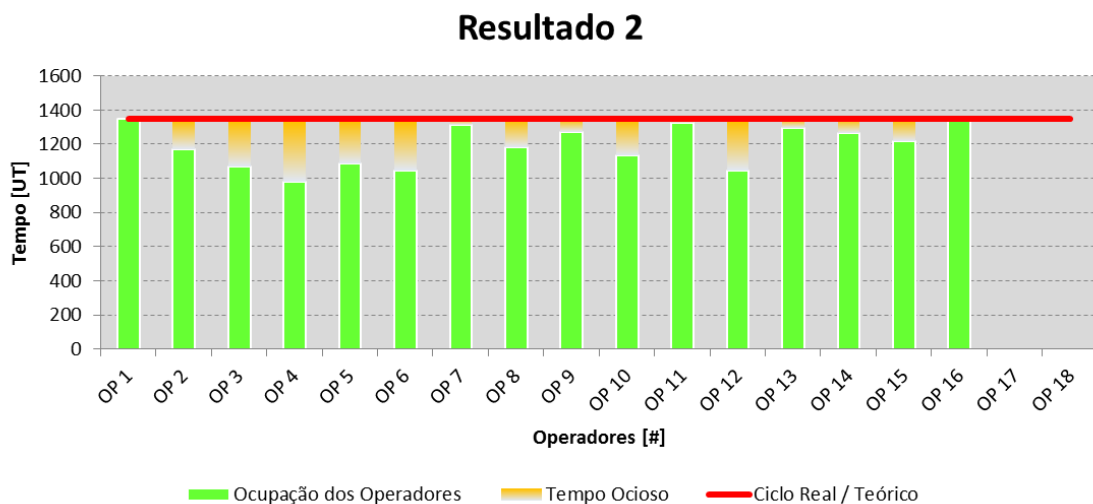
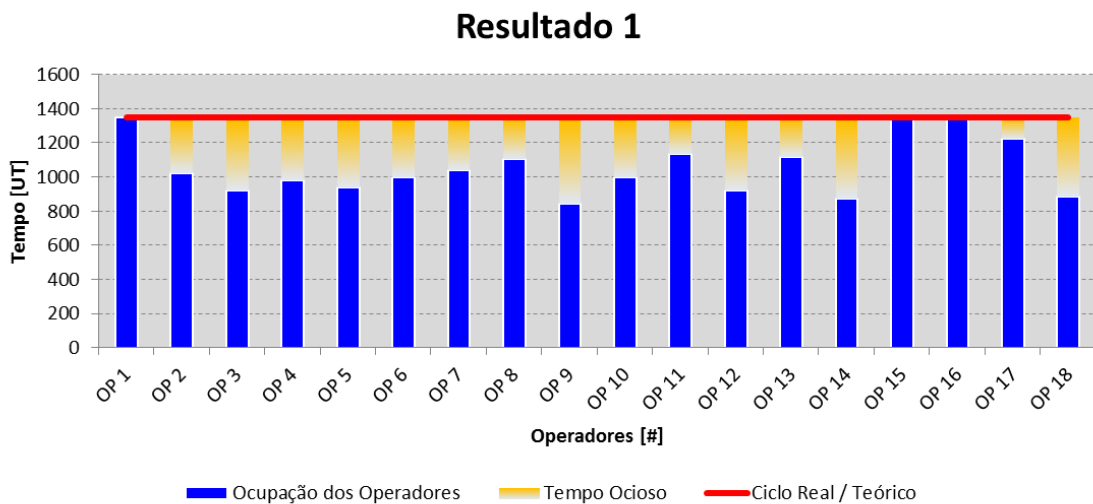
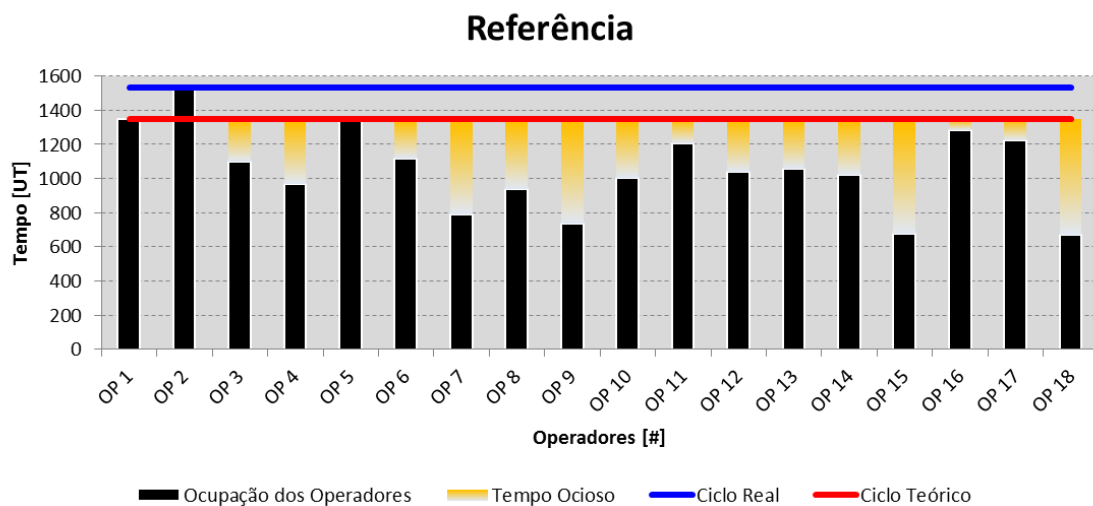
Já para o Resultado 2, além do ganho em produtividade, expresso pela primeira resposta, houve uma redução de custo devido à diminuição no número de operadores. Tal redução, traduzida em recursos monetários, equivale a um montante de, aproximadamente, 185.000,00 \$ ao ano, isto é, o custo de mão-de-obra para uma produção de 113,5% da produção atual pode ser 11% menor, de acordo com a solução indicada no Resultado 2.

De forma complementar, poder-se-ia também estimar o ganho financeiro gerado pela produção de 534 caixas de transmissão a mais no turno em análise. Contudo, neste caso, deve-se supor que exista demanda do produto e que todos os outros setores da empresa devem também suportar o aumento de produção para acomodar a produção potencial, não só de caixas de transmissão, mas de veículos como um todo. Ademais, a informação de lucro do produto é confidencial da empresa. Apenas a título de ilustração, supondo-se um lucro por caixa de 10.000 \$, então, o Resultado 2 poderia conduzir a um aumento potencial de lucro de cerca de 5.340.000,00 \$ por ano no turno em análise.

**Tabela 2 – Comparação Financeira entre os Resultados**

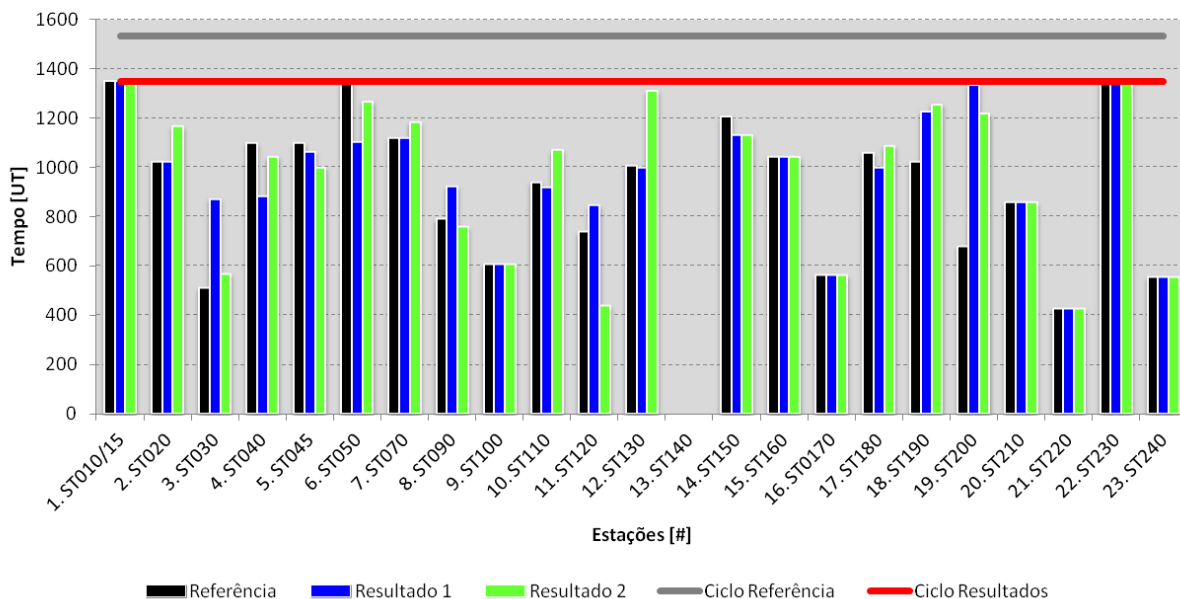
	Referência	Resultado 1	Resultado 2
<b>Tempo de Ciclo no turno em análise (UT)</b>	1532,5	1350	1350
<b>Operadores no turno em análise (Unidades)</b>	18	18	16
<b>Caixas produzidas por Ano no turno em análise (Unidades)</b>	3946	4480	4480
<b>Custo Estimado de Operadores por Ano no turno em análise (\$)</b>	1.663.200,00	1.663.200,00	1.478.400,00
<b>Diminuição Anual de Custo com Mão-de-Obra no turno em análise (\$)</b>	-	-	184.800,00
<b>Aumento Potencial da Produção de Caixas no turno em análise (Unidades)</b>	-	534	534

Fonte: Autoria própria



**Figura 16 – Comparação Entre a Ocupação dos Operadores nos Resultados Encontrados**

Fonte: Autoria própria



**Figura 17 – Comparação Entre a Ocupação das Estações nos Resultados Encontrados**

Fonte: Autoria própria

		Atraso	Suavidade	TC	Ociosidade
Operadores	Referência	31%	894	1533	23%
	Resultado 1	22%	565	1350	22%
		-9%	-329	-183	-1%
	Resultado 2	12%	314	1350	12%
		-19%	-580	-183	-11%
	Estações	Referência	31%	948	1533
Resultado 1		31%	865	1350	-
		0%	-84	-183	-
Resultado 2		31%	1067	1350	-
		0%	119	-183	-

**Quadro 10 – Comparação dos Indicadores dos Resultados Encontrados**

Fonte: Autoria própria

Referência																						
1. ST010/15	2. ST020	3. ST030	4. ST040	5. ST045	6. ST050	7. ST070	8. ST090	9. ST100	10. ST110	11. ST120	12. ST130	13. ST140	14. ST150	15. ST160	16. ST0170	17. ST180	18. ST190	19. ST200	20. ST210	21. ST220	22. ST230	23. ST240
OP 1	OP 2	OP 2	OP 3	OP 4	OP 5	OP 6	OP 7		OP 8	OP 9	OP 10		OP 11	OP 12		OP 13	OP 14	OP 15	OP 16	OP 16	OP 17	OP 18
1	3	8	11	19	32	44	54	63	64	69	76		81	86	91	92	103				116	121
2	6	9	12	20	33	45	55		65	70	77		82	87		93	104				117	
	4	10	13	21	34	46	56		66	71	78		83	88		94	105				118	
	5		14	22	35	47	57		67	72	79		84	89		95	106				119	
	7		15	23	36	48	58		68	73	80		85	90		96	107				120	
			16	24	37	49	59			74						97	108					
			17	25	38	50	60			75						98	109					
			18	26	39	51	61									99	110					
				27	40	52	62									100	111					
				28	41	53										101	112					
				29	42											102						
				30	43																	
				31																		

1º Resultado: Com 22 Estações e 18 Operadores. Rebalanceamento da situação de referência. Tentativa de redução do tempo de ciclo.																						
1. ST010/15	2. ST020	3. ST030	4. ST040	5. ST045	6. ST050	7. ST070	8. ST090	9. ST100	10. ST110	11. ST120	12. ST130	13. ST140	14. ST150	15. ST160	16. ST0170	17. ST180	18. ST190	19. ST200	20. ST210	21. ST220	22. ST230	23. ST240
OP 1	OP 2	OP 14	OP 18	OP 5	OP 8	OP 13	OP 12		OP 3	OP 9	OP 10		OP 11	OP 7		OP 6	OP 17	OP 15	OP 17	OP 4	OP 16	OP 4
1	3	8	14	19	32	44	38	63	64	68	76		82	86	91	92	103	109	114	115	116	121
2	4	9	16	20	34	45	39		65	69	77		83	87		93	104	110			117	
	5	10	17	21	35	46	40		66	70	79		84	88		96	105	111			118	
	6	11	18	22	36	47	54		67	71	80		85	89		98	106	112			119	
	7	12		24	37	48	55		94	72	81			90		99	107	113			120	
		13		25	41	49	56		95	73						100	108					
		15		26	42	50	57		97	74						101						
		23		27	43	51	58			75						102						
		33		28		52	59			78												
				29		53	60															
				30			61															
				31			62															

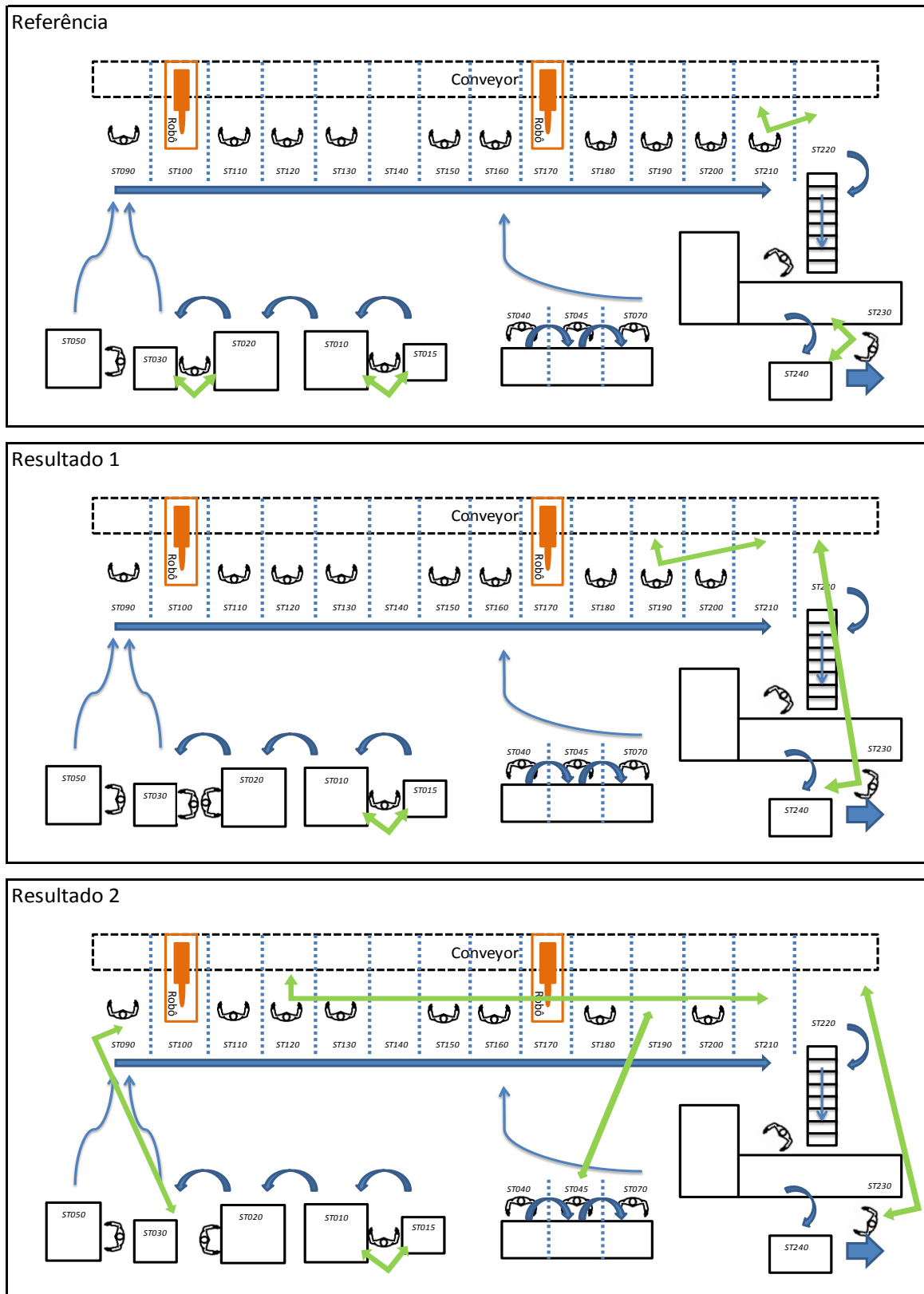
  

2º Resultado: Com 22 Estações e 16 Operadores. Tentativa de redução de mão-de-obra.																						
1. ST010/15	2. ST020	3. ST030	4. ST040	5. ST045	6. ST050	7. ST070	8. ST090	9. ST100	10. ST110	11. ST120	12. ST130	13. ST140	14. ST150	15. ST160	16. ST0170	17. ST180	18. ST190	19. ST200	20. ST210	21. ST220	22. ST230	23. ST240
OP 1	OP 2	OP 11	OP 6	OP 9	OP 14	OP 8	OP 11		OP 3	OP 13	OP 7		OP 10	OP 12		OP 5	OP 9	OP 15	OP 13	OP 4	OP 16	OP 4
1	3	8	11	19	32	30	54	63	64	70	73		82	86	91	92	103	110	114	115	116	121
2	4	9	13	20	34	44	55		65	71	74		83	87		93	104	111			117	
	5	10	14	21	35	45	56		66	72	75		84	88		96	105	112			118	
	6	12	15	22	36	46	57		67	78	76		85	89		98	106	113			119	
	7		16	24	37	47	58		68		77			90		99	107				120	
	23		17	25	38	48	59		69		79					100	109					
	33		18	26	39	49	60		94		80					101						
				27	40	50	62				81					102						
				28	41	51					85					108						
				29	42	52					97											
				31	43	53																
					61																	

Legenda: XX Atividades não realocadas    XX Atividades realocadas    XX Atividades na posição de referência

**Figura 18 – Comparação Entre a Alocação das Tarefas nos Resultados Encontrados**  
 Fonte: Autoria própria



**Figura 19 – Comparação Entre a Alocação dos Operadores nos Resultados Encontrados**

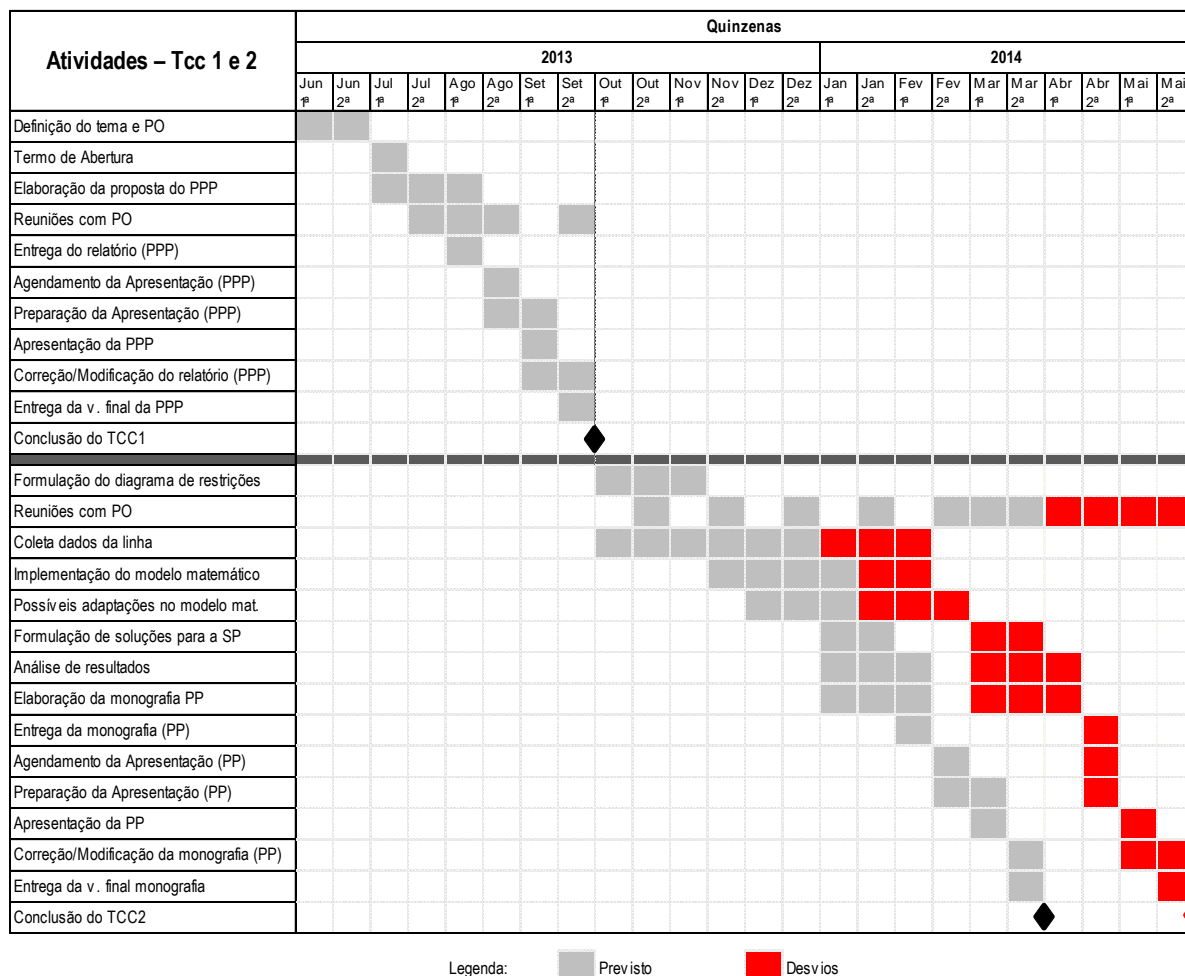
Fonte: Autoria própria

#### 5.4 Planejamento do Projeto

O planejamento do presente projeto passou por alguns imprevistos que acarretaram em atrasos em relação ao cronograma, tais quais:

- Atraso na coleta de informações: a empresa não possuía dados consolidados de duração de cada tarefa em análise, o que acarretou mais tempo do que o planejado para a coleta dos dados necessários;
- Diagrama de precedências com muitas tarefas e conexões: devido à quantidade de tarefas da linha em análise, obteve-se um diagrama de precedências grande em relação a trabalhos anteriormente desenvolvidos. Por exemplo, em Donnini (2009) apresenta-se diagrama de precedência com 52 tarefas, em Marcilio e Skraba (2010) com 70 tarefas, em Watanabe e Naujack (2013) com 48 tarefas e em Leal (2013) com 77 tarefas. No presente trabalho, o diagrama possui 121 tarefas, implicando dificuldades para o correto levantamento das interconexões do diagrama e, posteriormente, ocasionando a resolução do modelo em um tempo computacional relativamente elevado (vários minutos);
- Atraso na adaptação do modelo: a adaptação do modelo para o presente estudo tomou mais tempo do que o planejado. Foi necessária a implementação de uma série de aprimoramentos na geração de conjuntos do modelo a fim de viabilizar a solução em tempo computacional não proibitivo (segundos a poucos minutos), além das dificuldades impostas por inconsistências em versões preliminares do diagrama de precedências, identificadas à medida que simulações eram executadas;
- A análise dos resultados também se tornou complexa devido à quantidade de tarefas, as quais foram analisadas uma a uma a cada simulação;
- Atraso na escrita da monografia: devido a todos os atrasos anteriormente elencados, a elaboração da monografia, por consequência, sofreu atrasos.

As diferenças de datas entre o cronograma previsto e o tempo de execução do trabalho estão ilustradas na Figura 20.



**Figura 20 – Cronograma de execução do trabalho**

Fonte: Autoria própria

Em relação aos produtos do projeto, as principais entregas foram concretizadas com sucesso, quais sejam: modelo matemático adaptado para a solução problema e uma solução otimizada para o estudo de caso.

Em relação aos riscos previstos para o projeto, pode-se destacar o impacto que a coleta de informações gerou no andamento do trabalho. Embora prevista uma medida de contingência para a falta de informações, isso não foi suficiente para mitigar o atraso no projeto, pois o detalhamento dos tempos e tarefas, assim como a criação do diagrama de precedência, foram pré-requisitos de sobrevivência do trabalho, ou seja, sem esses dados o trabalho não poderia evoluir.

A necessidade de um tempo computacional elevado (vários minutos) foi um parâmetro não planejado, que gerou um retrabalho enorme durante a elaboração do diagrama de precedências. A versão preliminar do diagrama apresentava 165



tarefas e foi adaptada para contemplar 121 tarefas, minimizando-se efeitos de dificuldade de convergência computacional. Para este risco, um estudo sobre a capacidade dos sistemas computacionais seria interessante. Os demais riscos foram mitigados seguindo as medidas de contingência.

A metodologia do projeto foi seguida como planejado, mostrando-se eficaz para a realização desse tipo de estudo. No entanto, os prazos de realização de cada etapa devem ser revisados de acordo com os riscos presentes em cada etapa.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou um estudo de balanceamento para uma linha de montagem de caixas de transmissão de uma empresa automobilística da região de Curitiba-PR.

Inicialmente, por meio de levantamento e concatenação de dados práticos, evidenciou-se o estado deficitário de balanceamento da linha em questão. Na sequência, aprimorou-se um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) proposto em Leal (2013) para também contemplar duas características do cenário em análise: (i) Presença de Tarefas Totalmente Automáticas; (ii) Operadores que só podem realizar tarefas em um grupo limitado de estações de trabalho.

O modelo matemático aprimorado foi, então, implementado no *software* de otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013) e essa implementação permitiu a solução do problema de balanceamento de linha de montagem no cenário prático em análise. Desta forma, o objetivo geral do trabalho, destacado na Seção 1.3, foi cumprido.

A utilização da modelagem matemática possibilitou sugerir um balanceamento otimizado de tarefas nas estações de trabalho e da carga de trabalho dos operadores. Um primeiro estudo de caso (Seção 5.1) evidenciou uma redução no Tempo de Ciclo de 1533 UT para 1350 UT, isto é, um aumento de produtividade de 13,5% (cerca de 2 caixas a mais no turno de trabalho em análise, diariamente), além de reduzir em 9% o tempo ocioso dos trabalhadores e melhorar a distribuição das atividades (Quadro 10).

Num segundo estudo de caso (Seção 5.2), os resultados apresentaram a possibilidade de melhoria do processo produtivo corrente (diminuição do Tempo de Ciclo de 1533 UT para 1350 UT) com a utilização de 16 operadores ao invés de 18 (Figura 16). Ademais, a distribuição de atividades entre os operadores foi ainda mais suave ou equilibrada (Quadro 10). A redução de dois operadores por turno é muito significativa para a empresa, que tem a possibilidade de alocá-los para outras

tarefas e evitar uma possível contratação. A Tabela 2 evidencia os ganhos financeiros estimados pela redução de custo do Resultado 2, os quais somam cerca de 185.000 \$ anualmente no turno em análise, o que indubitavelmente retornaria em curto prazo os investimentos necessários para efetuar as pequenas mudanças inerentes ao funcionamento da solução (Quadro 9).

Todos os resultados encontrados só foram possíveis devido à adequabilidade da metodologia aplicada e ao eficiente modelo matemático, o qual comprova a eficácia e viabilidade de se fazer análises de balanceamento de linha através de modelagem matemática.

## **6.2 Sugestões de Continuidade**

O trabalho realizado evidenciou que existem possibilidades para futuros desenvolvimentos a se considerar. Elencam-se aqui sugestões para a continuidade do desenvolvimento do modelo proposto:

- Melhoria do relatório de dados gerado pelo modelo matemático: evidenciar de forma automática os resultados em interface com o usuário (e.g., planilha eletrônica), mostrando as atividades alocadas em cada estação e operador, assim como os tempos de deslocamento associados a cada um destes. Além disso, seria interessante saber a natureza da tarefa (manual, automática ou totalmente automática) e se é fixa ou não. Isso ajudaria na análise dos dados após cada execução do modelo matemático.
- Criação de um livro de bolso para utilização do modelo;
- Criação de uma interface de alimentação de dados que exija menos conhecimento sobre o modelo matemático (para leigos);
- Análise de parâmetros para aplicação do modelo, como por exemplo: limites de quantidade de tarefas, tipos de linhas, orientação para coleta de tempos, entre outros;
- Criação de indicadores para avaliação ergonômica das soluções propostas;
- Estudos de caso em outras linhas de montagem com Operações Totalmente Automáticas.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Daniela; LOURENÇO, Paulo; PINTO, Sandrina. **Programação Linear**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra / Departamento de Matemática. Coimbra, 2003.

BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. **State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing**. European Journal of Operational Research, v. 168, p. 666-693, 2004.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin. **A classification of assembly line balancing problems**. European Journal of Operational Research, v. 183, p. 674-693, 2006.

DAVIS, Mark M.; AQUILANO, Nicholas J.; CHASE, Richard B. **Fundamentos da Administração da Produção**. 3ª edição. São Paulo: Bookman, 1999.

DESSOUKY, M. M.; ADIGA, S.; PARK, K. **Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards**. International Journal of Production Research, v. 33, n. 3, p. 757-775, 1995.

DONNINI, Nelson. **Estudo de Otimização por Meio de Modelos Matemáticos para uma Linha de Montagem de Bancos de Automóveis**. Projeto Final de Curso II. UTFPR / DAMEC. Curitiba, 2009.

FARNES, Vanessa; PEREIRA, Néocles. **Balanceamento de linha de montagem com uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca**. XIII SIMPEP. Bauru, 2006.

GAITHER, Norman; FRAZIER, Greg. **Administração da produção e operações**. 8ª edição. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.

GERHARDT, Melissa. **Sistemática para Aplicação de Procedimentos de Balanceamento em Linhas de Montagem Multi-modelos**. Dissertação de Mestrado. UFRGS / Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2005.

IBM-CPLEX. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Disponível em < [http://www-304.ibm.com/ibm/university/academic/pub/page/ban\\_ilog\\_programming](http://www-304.ibm.com/ibm/university/academic/pub/page/ban_ilog_programming)>. Acesso em: 08 de abril de 2014.

LEAL, Cesar Augusto. **Balanceamento de Linhas de Montagem por Meio de Modelos de Programação Linear Inteira Mista: Estudos em Indústria Automotiva**. Projeto Final de Curso II. UTFPR / DAMEC. Curitiba, 2013.

LISBOA, ÉRICO. **Pesquisa operacional**. Apostila da Disciplina. Rio de Janeiro, 2002.

MAGATÃO, Leandro. **Pesquisa operacional**. Notas de Aula. UTFPR / DAMEC. Curitiba, 2013.

MARCILIO, Ivair; SKRABA, Marco. **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, 2010.

MIBACH, Fernando; CAMPOS, Leonardo. **Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba, 2013.

OHNO, Taiichi. **O Sistema Toyota de Produção, além da produção em larga escala**. Versão traduzida: ARTMED Editora S.A., 1997.

RITZMAN, Larry P.; KRAJEWSKI, Lee J. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Pearson Education, 2004.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3ª edição. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

WATANABE, Willian Hitoshi; NAUIACK, Luiz Rodrigo Murara. **Otimização do Balanceamento de uma Linha de Solda/Usinagem de Tubos com o Auxílio de um Modelo Matemático e Simulação Computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba, 2013.

## APÊNDICE A – MODELO MATEMÁTICO: VERSÃO APRIMORADA

### O Modelo Matemático

Assim como realizado por Leal (2013), para a implementação do modelo foram consideradas as definições de índices, conjuntos, parâmetros e variáveis. Os índices estão descritos no Quadro 11, os conjuntos utilizados estão descritos no Quadro 12, os parâmetros no Quadro 13 e as variáveis no Quadro 14.

**Quadro 11 – Índices aplicados ao modelo matemático proposto**

<b>Índice</b>	<b>Descrição</b>
$t$	Tarefa
$m$	Modelo
$c$	Cluster
$si$	Posto de trabalho inicial
$sf$	Posto de trabalho final
$w$	Operador
$sp$	Estação precedente
$ss$	Estação sucedente
$tp$	Tarefa precedente
$ts$	Tarefa sucedente
$movtime$	Tempo de deslocamento entre estações
$nw$	Número de operadores exigido para a execução de uma tarefa

**Quadro 12 – Conjuntos aplicados ao modelo matemático proposto**

<b>Conjunto</b>	<b>Descrição</b>
$Tasks(t)$	Conjunto de tarefas. Composto pelas tarefas " $t$ " de 1 a $NT$ .
$Stations(s)$	Conjunto de postos de trabalho. Composto pelos postos " $s$ " de 1 a $NS$ .
$Workers(w)$	Conjunto de operadores. Composto pelos operadores " $w$ " de 1 a $NW$ .
$Models(m)$	Conjunto de modelos. Composto pelos modelos " $m$ " de 1 a $NM$ .
$T_S(t,s)$	Conjunto que indica quais tarefas podem ser alocadas a cada um dos postos de trabalho. Limitado por $TSFIX(t,s)$ e $FATS(t,s)$ .
$MS(m,s)$	Conjunto auxiliar de modelos e postos de trabalho para a formação de clusters
$MC(m,c)$	Conjunto auxiliar de modelos e clusters
$CS(c,s)$	Conjunto de estações que compõe cada cluster
$MCS(m,c,s)$	Conjunto de estações que compõe cada cluster para cada modelo
$W_S(w,s)$	Operadores que podem ser alocados em cada posto de trabalho. Limitado por $WSFIX(w,s)$ e por $WSFEAS(w,s)$ .
$W_S_S(w,sp,ss)$	Conjunto esparsos dos possíveis deslocamentos de operadores entre postos de trabalho. Limitado por $W_S(w,s)$ , $WSFIX(w,s)$ e $WSFEAS(w,s)$ . Deslocamentos para estações com somente tarefas totalmente automáticas ( $TAT$ ) são filtrados, impedindo operadores de se deslocarem a estações de $TATs$ .
$T_W(t,w)$	Tarefas que podem ser realizadas por cada operador. Limitado por $WSFIX(w,s)$ , $WSFEAS(w,s)$ , $TSFIX(t,s)$ e $FATS(t,s)$ .
$T_W_S(t,w,s)$	Possíveis alocações de tarefa e operadores a postos de trabalho. Limitado por $T_S(t,s)$ , $T_W(t,w)$ e $W_S(w,s)$ .
$Share_W(t,w,s)$	Conjuntos dos possíveis operadores que podem atuar em cada uma das Tarefas Comuns. Limitado por $T_S(t,s)$ , $T_W(t,w)$ e $W_S(w,s)$ .
$T_nW(t,nw)$	Quantidade de operadores exigidos para cada tarefa.
$S_nW(nw,s)$	Número de operadores que devem ser alocados em cada posto de trabalho.

Quadro 13 – Parâmetros aplicados ao modelo matemático proposto

Parâmetro	Descrição
$NT$	Número de tarefas.
$NS$	Número de postos de trabalho.
$NW$	Número de operadores.
$NM$	Número de modelos.
$OR(m)$	Taxa de ocupação de cada modelo na linha.
$WSFIX(w,s)$	Operadores fixos a estações específicas.
$WSFEAS(w,s)$	Operadores podem ser alocados a um conjunto de estações específicas.
$CSS(c,si,sf)$	Conjunto com as estações iniciais e finais de cada <i>cluster</i> .
$FT(s)$	Pré-carga alocada à estação. Valor dado em UT.
$PREC(tp,ts)$	Restrições de precedência entre as tarefas.
$DTm(m,t)$	Duração de cada uma das tarefas para cada modelo. Valor dado em UT.
$MT(sp,ss,MovTime)$	Tempo de movimentação entre postos de trabalho. Valor dado em UT.
$TSEFIX(t,s)$	Tarefas fixas a estações específicas.
$FATS(t,s)$	Possíveis alocações de tarefas em postos de trabalho.
$M$	Constante para ponderações na função objetivo. Valor adotado, $M = 100$ .
$Mc$	Constante auxiliar para formulação <i>Big-M</i> . Valor adotado, $Mc = NT$ .
$eps$	Constante auxiliar mínima para formulação <i>Big-M</i> . Valor adotado, $eps = 0,1$ .
$AT(t,s)$	Operações Automáticas e estações às quais elas estão fixas.
$TAT(t,s)$	Operações Totalmente Automáticas e estações às quais elas estão fixas.
$CnT(t,s,nw)$	Conjunto contendo Tarefas Comuns, cada tarefa " $t$ " presente em uma estação " $s$ " e que demanda " $nw$ " trabalhadores à sua realização.
$avS$	Carga de trabalho média dos postos de trabalho. Valor dado em UT.
$avW$	Carga de trabalho média dos operadores. Valor dado em UT.
$avDT(t)$	Duração média de uma tarefa. Obtida a partir da média ponderada do tempo de execução da tarefa em um modelo específico pelo fator de ocupação do modelo na linha, $OR(m)$ . Valor dado em UT.

Quadro 14 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático proposto

Variável	Descrição
$CT$	Tempo de ciclo. Valor dado em UT.
$WTime [Workers]$	Carga de trabalho de cada operador. Valor dado em UT.
$TS [T_S]$	Variável binária que indica a alocação de tarefas nos postos de trabalho
$TW [T_W]$	Variável binária que indica a designação de tarefas para operadores
$TWS [T_W_S]$	Variável que indica a alocação de tarefas e operadores nos postos de trabalho. Assume valores binários.
$WS [W_S]$	Variável que indica quantas tarefas cada operador realiza em cada um dos postos de trabalho da linha
$WSb [W_S]$	Variável binária que indica quais operadores estão alocados em quais postos de trabalho
$DifS [Stations]$	Diferenças entre a carga de trabalho de cada posto e a carga média. Valor dado em UT.
$WSSb [W_S_S]$	Variável binária para indicar os deslocamentos entre postos de trabalho realizados por cada operador
$MaxDifW$	Máxima diferença de carga de trabalho entre operadores. Valor dado em UT.
$Dur [MS]$	Tempo de execução em cada posto para cada modelo para cada <i>cluster</i> . Valor dado em UT.
$CTm [MC]$	Tempo de ciclo de cada modelo em cada estação para cada <i>cluster</i> . Valor dado em UT.
$DifC [MC]$	Diferença de tempo de ciclo entre <i>clusters</i> . Valor dado em UT.

### Função Objetivo

Para a definição da função objetivo do modelo foram considerados cinco termos que deveriam ser minimizados. Para que houvesse uma adequação de prioridade foram utilizados os parâmetros “ $M$ ” como fatores de multiplicação (ponderação). Os termos a serem minimizados são elencados a seguir:

- (a) Tempo de ciclo;
- (b) O somatório das diferenças entre a carga de trabalho de cada posto e a carga de trabalho média dos postos de trabalho;
- (c) A máxima diferença entre a carga de trabalho dos operadores em relação à carga de trabalho média dos operadores;
- (d) Número total de deslocamentos entre postos de trabalho pelos operadores;
- (e) O somatório das diferenças de tempo de ciclo entre *clusters*.

A função objetivo é descrita na Expressão(1) abaixo.

$minimize(z) =$

$$(M * M) * CT +$$

$$(1) * \sum_{s \in Stations} DifS(s) +$$

$$M * MaxDifW +$$

**Expressão(1)**

$$\left(\frac{M}{10}\right) * \sum_{(w,sp,ss) \in W\_S\_S} WSSb(w, sp, ss) +$$

$$(10 * M) * \sum_{(m,c) \in MC} DifC(m, c)$$

Nota-se que há os fatores de ponderação escolhidos para determinar os itens de maior e menor importância. Para o primeiro termo, o fator escolhido foi  $M*M$  (10.000), colocando-o em nível de importância máximo na função; o último termo tem fator  $10*M$  (1000), sendo o segundo mais importante; o terceiro termo apresenta fator  $M$  (100), sendo o terceiro em importância; o quarto termo tem fator



$M/10$  (10), ficando, portanto, em penúltimo lugar em importância; e o segundo termo recebe fator 1, sendo, portanto, o termo com menor fator de importância dentre os cinco termos avaliados. Ou seja, os cinco termos foram colocados em patamares não competitivos na função objetivo. Por exemplo, minimizar o tempo de ciclo é prioritário em relação aos demais termos. Uma solução que, por exemplo, tivesse maior tempo de ciclo, mas apresentasse um menor valor para o somatório de  $DifS(s)$  não seria considerada a solução ótima na avaliação do modelo.

### Restrições aplicadas ao modelo

A primeira restrição que deve ser imposta ao modelo é de que cada tarefa deve ser realizada em apenas um posto de trabalho, o que é garantido pela Equação(2) exposta a seguir.

$$\sum_{(t,s) \in T_S} TS(t,s) = 1 \quad \forall t \in Tasks \quad \text{Equação(2)}$$

É de fundamental importância que as relações de precedência entre as tarefas apresentadas no diagrama de precedências sejam cumpridas. A Inequação(3) impõe que as tarefas sucedentes (índice  $ts$ ) sejam realizadas posteriormente às suas tarefas precedentes (índice  $tp$ ) para todos os pares de tarefas pertencentes ao conjunto de relações de precedência  $PREC$ .

$$\sum_{(tp,s) \in T_S} s * TS(tp,s) \leq \sum_{(ts,s) \in T_S} s * TS(ts,s) \quad \forall (tp,ts) \in PREC \quad \text{Inequação(3)}$$

A Inequação(4) determina o tempo de ciclo real da linha ao atribuir à variável  $TC$  o maior valor dentre os tempos de execução dos postos de trabalho da linha.

$$\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s)) + FT(s) \leq TC \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(4)}$$

A Inequação(5) e a Inequação(6) visam determinar as diferenças entre as cargas de trabalho alocadas a cada posto de trabalho e carga média de todos os postos da linha.

$$DifS(s) \geq \sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) - avS \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(5)}$$

$$DifS(s) \leq - \sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) + avS \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(6)}$$

Nota-se que se fez necessária a utilização de duas inequações nessa restrição. Isso foi necessário para contemplar os casos em que a carga do posto é superior à carga média, aplicável à Inequação(5), e os casos em que a carga do posto é inferior à média, situação considerada pela Inequação(6). Pode-se resumir o funcionamento dessa restrição da seguinte forma:

- Se  $\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) > avS$ , então  $\begin{cases} difS(s) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difS(s) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Portanto, a Inequação(5) em conjunto com o fato do valor de  $difS(s)$  estar sendo minimizado na função objetivo, faz com que  $difS(s)$  assumo o valor de  $\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) - avS$ .
- Se  $\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) < avS$ , então  $\begin{cases} difS(s) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difS(s) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Portanto, a Inequação(6) em conjunto como fato do valor de  $difS(s)$  estar sendo minimizado, faz com que  $difS(s)$  assumo o valor de  $-\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) + avS$ .
- Se  $\sum_{(t,s) \in T_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) = avS$ , então  $\begin{cases} difS(s) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difS(s) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Como valor de  $difS(s)$  está sendo minimizado na função de avaliação, então  $difS(s) = 0$ .

A Equação(7) torna obrigatório que cada tarefa seja realizada por  $nw$  operadores. Isto é obtido ao se igualar a quantidade de tarefas alocadas a postos de trabalho com a quantidade de tarefas designadas aos operadores.

$$\sum_{(t,s) \in T_S} TS(t,s) = \sum_{(t,s) \in T_W} \frac{TW(t,w)}{nw} \quad \forall (t,nw) \in T_{nw} \quad \text{Equação(7)}$$

A Inequação(8) define que cada tarefa seja realizada apenas uma vez por  $nw$  operadores.

$$\sum_{(t,w) \in T\_W} TW(t,w) \leq nw \quad \forall (t,nw) \in T\_nW \quad \text{Inequação(8)}$$

A Inequação(9), a Inequação(10) e a Inequação(11) determinam quais os postos em que um operador realiza tarefas. Esta formulação obedece à lógica de que um operador é alocado a um posto se a tarefa está alocada neste posto e o operador realiza esta tarefa. Nesse sentido a variável  $TWS(t,w,s)$  assume a função de um “E” lógico entre as variáveis  $TW(t,w)$  e  $TS(t,s)$ .

$$TWS(t,w,s) \leq TW(t,w) \quad \forall (t,w,s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(9)}$$

$$TWS(t,w,s) \leq TS(t,s) \quad \forall (t,w,s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(10)}$$

$$TWS(t,w,s) \geq TW(t,w) + TS(t,s) - 1 \quad \forall (t,w,s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(11)}$$

A Inequação(12) e a Inequação(13) são restrições auxiliares na alocação dos operadores aos postos trabalho da linha com o intuito de fornecer cortes ao auxílio no processo de busca do *solver*, reduzindo o tempo computacional.

$$\sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t,w,s) \geq TW(t,w) \quad \forall (t,w) \in T\_W \quad \text{Inequação(12)}$$

$$\sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t,w,s) \geq TS(t,s) \quad \forall (t,s) \in T\_S \quad \text{Inequação(13)}$$

A Equação(14) caracteriza o número de tarefas associadas a um operador em um posto de trabalho ao somar todas as tarefas a ele atribuídas.

$$WS(w,s) = \sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t,w,s) \quad \forall (w,s) \in W\_S \quad \text{Equação(14)}$$

A Inequação(15) e a Inequação(16) definem que, se pelo menos uma tarefa é realizada por um operador em um posto de trabalho, então este operador será alocado nesse posto de trabalho. Se o operador estiver alocado a um determinado posto então a variável  $WSb(w,s)$  assumirá valor um, caso contrário assumirá valor zero.

$$WS(w,s) \geq (-Mc - eps) * (1 - WSb(w,s)) + eps \quad \forall (w,s) \in W\_S \quad \text{Inequação(15)}$$

$$WS(w,s) \leq Mc * WSb(w,s) \quad \forall (w,s) \in W\_S \quad \text{Inequação(16)}$$

A Inequação(17) garante que o número de operadores que podem ser alocados em cada estação seja menor ou igual a  $nw$ .

$$\sum_{(w,s) \in W_S} WSb(w,s) \leq nw \quad \forall (nw,s) \in S_nW \quad \text{Inequação(17)}$$

A Inequação(18), a Inequação(19) e a Inequação(20) determinam restrições de alocação dos operadores em relação aos postos de trabalho de forma análoga ao realizado na Inequação(9), na Inequação(10) e na Inequação(11). De fato, a variável  $WSSb(w,s,ss)$  indica se ocorreu o deslocamento do operador  $w$  da estação  $s$  para a estação  $ss$ . Esta variável é particularmente influenciada pelo conjunto  $W_S_S$ , o qual filtra possibilidades de deslocamento de operadores para estações com somente Tarefas Totalmente Automáticas (*TATs*), as quais, por definição, não demandam o auxílio de operadores.

$$WSSb(w,s,ss) \leq WSb(w,s) \quad \forall (w,s,ss) \in W_S_S \quad \text{Inequação(18)}$$

$$WSSb(w,s,ss) \leq WSb(w,ss) \quad \forall (w,s,ss) \in W_S_S \quad \text{Inequação(19)}$$

$$WSSb(w,s,ss) \geq WSb(w,s) + WSb(w,ss) - 1 \quad \forall (w,s,ss) \in W_S_S \quad \text{Inequação(20)}$$

O tempo de ocupação de cada operador é dado pela Equação(21), a qual prevê a soma de quatro fatores:

- (a) Tempo de execução de tarefas em postos de trabalho;
- (b) Tempo total de deslocamento entre estações;
- (c) Carga de trabalho previamente alocada ao posto de trabalho ao qual o operador é alocado.
- (d) O negativo do somatório (subtração) do tempo de execução das Operações Automáticas relacionadas ao operador.

O último fator é derivado diretamente da consideração de Operações Automáticas. Operações Automáticas não devem onerar a carga de trabalho dos operadores, por isso o tempo de execução destas é desconsiderado no tempo total de trabalho dos operadores.

Ressalta-se que a variável  $TW(t,w)$  indica, inclusive no caso de operações automáticas, que uma tarefa  $t$  está associada a um operador  $w$ . Isto permite saber

que a operação automática  $t$  foi inicializada pelo operador  $w$ . Desta forma, conforme necessidade poder-se-ia considerar o valor do tempo estimado para inicialização de tarefas automáticas como fator integrante da carga de trabalho do operador. Por simplicidade, contudo, este tempo de inicialização da operação automática foi desconsiderado.

$$WTime(w) =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{(t,w) \in T\_W} avDT(t) * TW(t, w) + \\ & \sum_{(w,sp,ss) \in W\_S\_S} WSSb(w, sp, ss) * movtime + \\ & \sum_{(w,s) \in W\_S} FT(s) * WSb(w, s) + \sum_{(w,s) \in WSFIX} FT(s) + \sum_{(w,s) \in WSFEAS} FT(s) - \\ & \sum_{(t,w) \in AT\_W} avDT(t) * TW(t, w) \end{aligned} \quad \text{Equação(21)}$$

Assim, considerou-se que o tempo de ciclo pode ser determinado pelo operador com a maior carga de trabalho, conforme mostra a Inequação(22) a seguir apresentada.

$$WTime(w) \leq CT \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(22)}$$

A máxima diferença de carga de trabalho de um operador em relação à carga de trabalho média ( $avW$ ) é descrita pela Inequação(23) e pela Inequação(24) a seguir apresentadas.

$$MaxDifW \geq WTime(w) - avW \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(23)}$$

$$MaxDifW \geq -(WTime(w)) + avW \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(24)}$$

De forma análoga ao caso da comparação das cargas dos postos de trabalho com a carga média dos postos realizada na Inequação(5) e na Inequação(6), utilizou-se duas inequações para que fossem contemplados tanto os casos em que a carga do operador é superior à carga média, aplicável à Inequação(23), quanto os casos em que a carga do operador é inferior à média, situação considerada pela Inequação(24). A diferença nesse caso é que se busca determinar, e posteriormente

minimizar, a máxima diferença entre as cargas dos operadores, sendo que no caso dos postos de trabalho visava-se minimizar o somatório das diferenças. Pode-se resumir o funcionamento dessa restrição da seguinte forma:

- Se  $WTime(w) > avW$ , então  $\begin{cases} MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Portanto, a Inequação(23) em conjunto com o fato do valor de  $MaxDifW(w)$  estar sendo minimizado na função objetivo, faz com que  $MaxDifW(w)$  assumira o valor de  $WTime(w) - avW$ .
- Se  $WTime(w) < avW$ , então  $\begin{cases} MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Portanto, a Inequação(24) em conjunto como fato do valor de  $MaxDifW(w)$  estar sendo minimizado, faz com que  $MaxDifW(w)$  assumira o valor de  $-(WTime(w)) + avW$ .
- Se  $WTime(w) = avW$ , então  $\begin{cases} MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ MaxDifW(w) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$ . Como valor de  $MaxDifW(w)$  está sendo minimizado na função de avaliação, então  $MaxDifW(w) = 0$ .

O tempo de execução de cada posto de trabalho dentro de um *cluster* para cada modelo “*m*” é dado pela Equação(25).

$$Dur(m, s) = \sum_{(t,s) \in T_s} (DTm(m, t) * TS(t, s) + FT(s)) \quad \forall (m, s) \in MS \quad \text{Equação(25)}$$

O tempo de ciclo de cada modelo “*m*” é obtido através da Inequação(26) abaixo.

$$\sum_{m \in Models} (OR(m) * Dur(m, s)) + FT(s) \leq CT \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(26)}$$

A Inequação(27) determina que o tempo de execução de um modelo em um posto de trabalho “*s*” deve ser limitado pelo tempo de ciclo desse modelo no *cluster* no qual está inserido.

$$Dur(m, s) \leq CTm(m, c) \quad \forall m, c, s \in MCS \quad \text{Inequação(27)}$$

A linha é composta por pelo menos um *cluster*. Caso haja mais de um, há a necessidade de criação de um *buffer* e o modelo deve minimizar a diferença entre os tempos de ciclo dos *clusters*. Essa condição é garantida pela Inequação(28) em conjunto com a função objetivo, Expressão(1).

$$CTm(m, c) - Dur(m, s) \leq DifC(m, c) \quad \forall m, c, s \in MCS \quad \text{Inequação(28)}$$

## APÊNDICE B – TABELA DE DADOS DAS TAREFAS

Estação	Tarefa	Descrição	Precedência	Duração (UT)
1. ST010/15	1	Preparação para prensagem da engrenagem de ré e rolamento no eixo principal.		150
	2	Montagem dos rolamentos e engrenagens da HP		
		Medição da folga para definição do espaçador	1	1260
	2	Verificar anel		
		Prensagem da engrenagem de ré e rolamento no eixo principal		
	2	Montar e prensar a luva do engate, os rolamentos agulha, a roda dentada (sensor), a pista do rolamento agulha (bucha) e o cubo.		
		Montar e prensar o rolamento e anel espaçador (Conjunto "HP")	1	1200
	3	Parafusar a porca para fixar as engrenagens, montar o conjunto sincronizador e rolamento. Descarregar o eixo principal para o carrinho e levar até a ST020.		
		Iniciar o sistema e preparar para a prensagem da primeira engrenagem	2	140
	4	PRENSAGEM DAS ENGRENAGENS 1		0
2. ST020	6	Colocar a capa "menor" junto com a capa "maior" dentro da embalagem.		60
	4	Preparar para a prensagem da segunda engrenagem		
		PRENSAGEM DAS ENGRENAGENS 2		
	4	Preparação para prensagem da terceira engrenagem		
		PRENSAGEM DAS ENGRENAGENS 3	3	638
	5	Preparar para prensar o rolamento na ponta superior do eixo		
		Prensar rolamento superior		
	5	Preparar e prensar o rolamento inferior do eixo.		
		Montar anel-trava	4	73
	7	Finalizar montagem e dispor os eixos até a ST030	5, 6	113
3. ST030	8	Preparar e montar êmbolos no eixo de entrada.		
		Posicionar luva, conjunto sincronizador, engrenagem reduzida e rolamento no eixo de entrada e prensar o conjunto pré-montado.	7	360
	9	Prensar conjunto		
		Montar anel-trava.	8	48
10	Finalizar montagem e dispor o eixo de entrada sobre o eixo principal. Depois encaixar o eixo secundário no eixo principal e dispor o conjunto pré-montado em espera para a ST090.	9	103	
4. ST040	16	Iniciar montagem. Posicionar carcaça e montar engrenagens. Montagem das arruelas na carcaça. Montagem dos eixos das engrenagens na carcaça. Prensagem dos eixos. Preparação para o primeiro cravamento.	13,14,15	285
	17	Primeiro cravamento (automático)	16	510
	12	Montagem das engrenagens		58
	17	Preparação para o segundo cravamento	16	0
Segundo cravamento (automático)				



	11	Montagem das engrenagens		85
	17	Preparação para o terceiro cravamento	16	0
		Terceiro cravamento (automático)		
	13	Montagem das arruelas nas engrenagens	11.12	35
	17	Preparação para o quarto cravamento	16	0
		Quarto cravamento (automático)		
	14	Puncionamento dos eixos		28
	17	Preparação para o quinto cravamento	16	0
		Quinto cravamento (automático)		
	15	Puncionamento dos eixos		40
	18	Inspeccionar cravamento e finalizar montagem.	17	60
	19	Iniciar montagem do rolamento	18	43
		Posicionamento do guia (automático)		
	20	Posicionar rolamento e prensar	19	175
		Prensagem do rolamento		
	23	Levar o eixo até a bancada de montagem		33
	21	Montagem do anel trava	20	73
	22	Elevação da carcaça	21	63
	24	Montagem do anel "V" e posicionar o eixo planetário na prensa	22, 23	75
	27	Pegar <i>kit</i> e posicionar sobre a mesa		25
	25	Preparação e acionamento para prensagem do eixo na carcaça	24	23
5. ST045	26	Prensagem do eixo na carcaça	25	63
		Preparação e acionamento para prensagem do retentor e sensor de velocidades		
		Prensagem do retentor		
	28	Preparação e acionamento para prensagem do flange	26, 27	330
		Prensagem da flange		
		Posicionar o anel <i>O-ring</i> no flange e apertar porca de fixação		
	29	Preparação para o cravamento da porca	28	95
		CRAVAMENTO DA PORCA		
	30	Parafusar helicoides e montar <i>plug</i> plástico		65
	31	Finalizar montagem	29, 30	38
	34	Preparação e prensagem das capas de rolamento na carcaça principal	32, 33	175
	38	Pegar e posicionar os bujões e visor de óleo		38
		Preparação para prensagem da primeira capa de rolamento na carcaça principal		
		Prensar a primeira capa		
6. ST050	35	Preparação para prensagem da segunda capa de rolamento na carcaça principal	34	200
		Prensar a segunda capa		
	36	Etiquetagem	35	18

	39	Apertar bujões e visor de óleo	38	60
	37	Descarregar carcaça principal	36	100
	42	Preparação para prensagem das capas na carcaça de embreagens	37, 33, 41	175
	43	Prensagem da primeira capa na carcaça de embreagem	42	338
	40	Levar a carcaça principal até a ST090.	39, 37	35
	41	Montar pinos-trava e passar óleo nos assentamentos da carcaça de embreagens.		75
	32	Passar óleo nos assentamentos da carcaça principal		25
	43	Preparação para prensagem da segunda capa na carcaça principal	42	0
		Prensagem da segunda capa na carcaça de embreagens		
	33	Desembalar a capa de rolamento e deixar em espera na prateleira. Separar a embalagem e descartar		113
	43	Finalizar montagem da carcaça de embreagem e dispor no dispositivo de saída	42	0
	44	Iniciar sistema e prensar o anel na engrenagem de acoplamento	31	118
	45	Preparação para prensagem da trava do anel	44	168
		Prensagem da trava do anel		
	49	Preparação para parafusamento dos parafusos do garfo		48
	45	Preparação para cravamento das travas do anel		0
		Cravamento das travas do anel		
	46	Preparação para prensagem da engrenagem anelar e anel trava	45	88
	47	Preparação para prensagem do anel sincronizador	46	68
7. ST070		Prensagem do anel sincronizador		
	48	Colocar o <i>Engaging Ring</i> e o tubo de lubrificação no transportador automático	47	35
	50	Apertar os parafusos de fixação do garfo e cravar os parafusos	49	75
	51	Encaixar o garfo no conjunto sincronizador	48, 50	50
	52	Montar conjunto no range. Depois dispor para o carrinho de transporte e acionar o AGC para enviar as peças até a ST160.	51	300
	53	Retirar o range finalizado e carregar o range em espera. Montar suporte 'L' e parafusos com buchas na carcaça. Disponibilizar o range finalizado para a ST180	52	125
	54	Iniciar o sistema e montar a carcaça no <i>conveyor</i>	10, 40	195
	61	Levar o carrinho <i>trilogic</i> até a área demarcada na ST050 e retornar à ST090		30
	55	Montar níquel de ar e magneto "imã" na carcaça	54	55
	56	Montar tubo de sucção da caixa	54	95
8. ST090	57	Montar válvula de alívio na caixa	54	38
	58	Montar os eixos na carcaça principal	55, 56, 57	120
	59	Montar batente do conjunto de freio do eixo intermediário	58	85
	60	Lubrificar rolamentos e limpar assentamento da caixa. Finalizar operação	59	75
	62	Movimentação dos carrinhos: ST090 -> ST010; ST030 -> ST050-> ST090	60, 61	98
9. ST100	63	Robô 1	62	608

	64	Iniciar sistema e preparar/posicionar a carcaça da embreagem com parafusos sobre a carcaça principal	63, 43	280
10. ST110	65	Apertar os parafusos de fixação da carcaça da embreagem (25)	64	508
	66	Montar fitas <i>hellerman</i>	65	55
	67	Movimentar carrinhos: ST110 ->ST050->ST110		73
	68	Finalizar operação	66, 67	25
	69	Fazer verificação inicial e prensar retentor no eixo de entrada	68	113
11. ST120	70	Montar o conjunto de freio da caixa	69	168
	71	Montar tubo de ar do freio	70	95
	72	Montar CCA	71	93
	73	Montar tubo flexível	72	68
	74	Montar CVU	73	108
	75	Conectar o chicote CCA, cortar excesso das presilhas e finalizar operação	74	95
12. ST130	76	Montar conjunto bomba de óleo com engrenagem inversora	75	310
	77	Montar eixo da engrenagem reversora na carcaça principal	76	165
	78	Retirar rebarbas dos furos onde será fixada a carcaça do filtro		83
	79	Montar filtro na carcaça principal	77, 78	278
	80	Pré-montar tampas do eixo principal e intermediário com parafusos escravos	79	173
14. ST150	81	Posicionar a máquina no início da estação e verificar pré montagem das tampas. Apertar os 6 parafusos escravos	80	75
		Preparação e acionamento para medição dos calços		
		Medição dos calços		
	82	Pegar os dois calços selecionados e colocar no dispositivo de medição da máquina. Confirmar calços selecionados pela máquina	81	498
		Desmontar sistema de medição		
	83	Soltar parafusos escravos e retirar tampas	82	118
	84	Montar anéis espaçadores	83	118
	85	Montar tampas com os calços selecionados (12 parafusos)	84	400
	86	Fazer verificação inicial da montagem anterior e provar os torques das tampas e parafuso do eixo da reversora. Olear o eixo principal	85	425
	87	Preparação e prensagem do <i>engaging ring</i> no eixo principal	86, 52	200
15. ST160	88	Montar o anel elástico e o anel espaçador duplo	87	150
	89	Montar tubo de distribuição de óleo	88	125
		Limpar assentamento		
	90	Montar tubo de distribuição pequeno no assentamento da carcaça principal	89	143
	Finalizar operação			
16. ST170	91	Robô 2	90	563
17. ST180	97	Posicionar o dispositivo do range na flange	53	18
	100	Montar anel <i>O-ring</i> na canaleta do range e posicionar tampa da PTO	53	90
	94	Montar sensor de velocidades	53	18
	96	Verificar aplicação de silicone no assentamento	91	40
	98	Posicionar o range sobre a carcaça principal	96, 97	140
	92	Montar conjunto inibidor	91	70

	99	Montar suportes e apertar todos os parafusos de fixação do range na carcaça principal	98	545
	93	Apertar o conjunto inibidor	92	25
	95	Apertar o sensor de velocidades do range	94	25
	101	Apertar os parafusos de fixação da PTO	100	75
	102	Finalizar operação	93, 95, 99, 101	13
	103	Preparação para programação da TECU	102	133
	104	Programação da TECU	103	860
	105	Desconectar o cabo de programação da TECU	104	23
	106	Posicionamento dos pinos do range		83
	107	Centralizar a luva de engate da segunda e terceira marcha		40
18. ST190	108	Montar pinos guias fixos e móveis e posicionar junta da TECU no assentamento da carcaça principal		90
	109	Montar a TECU sobre a caixa	105, 106, 107, 108	120
	110	Apertar os parafusos de fixação da TECU	109	400
	111	Montar suporte dos tubos	110	75
	112	Aplicar torque nos nípeis curvados e finalizar operação	111	63
		Montar nípeis na lateral do protetor do filtro		
		Montagem das mangueiras do resfriador na carcaça do filtro		
		Montagem do resfriador		
		Ajustar posição das mangueiras e apertar com torquímetro <i>wireless</i>		
19. ST200	113	Fazer verificação e finalizar operação	112	680
		Digitar <i>Serial Number</i> do <i>retarder</i> e apertar os quatro parafusos do <i>retarder</i>		
		Montar resfriador do <i>retarder</i>		
		Montar chicote elétrico e bujões, depois finalizar operação		
20. ST210	114	<i>Leak Test</i>	113	858
21. ST220	115	Retirar caixa do <i>conveyor</i> e presilhar tubos, além de registrar a caixa	114	428
	116	Preparação para o teste de funcionabilidade (Operador 1)	115	325
22. ST230	118	Teste de funcionabilidade (Operador 1)	116, 117	650
	119	Retirar conexões, finalizar montagem e dispor a caixa no <i>pallet</i> (Operador 1)	118	250
	117	Preparação para o teste de funcionabilidade (Operador 2)		40
23. ST240	120	Retirar conexões (Operador 2)	118	80
	121	Colocar placa de identificação e dispor a caixa no <i>buffer</i>	119, 120	555