

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

CESAR AUGUSTO LEAL

**BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM POR MEIO DE  
MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA:  
ESTUDOS EM INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013



CESAR AUGUSTO LEAL

**BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM POR MEIO DE  
MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA:  
ESTUDOS EM INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

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

2013



## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Balanceamento de Linhas de Montagem por meio de Modelos de Programação Linear Inteira Mista: Estudos em Indústria Automotiva", realizado pelo aluno CESAR AUGUSTO LEAL, como requisito parcial 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

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Paulo Antônio Reaes

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 23 de agosto de 2013.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Leandro Magatão, por ter aceitado o desafio de tornar este trabalho uma realidade apesar dos prazos exíguos, por ter estado sempre disponível para ajudar e por ter dado tamanha atenção durante todas as fases de execução do projeto.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Maria Eliane da Silva, por ter me apoiado em todos os momentos e por ter entendido a minha ausência em determinados momentos para que essa conquista pudesse ser alcançada.

Agradeço à minha namorada, Kianny Taborda, por estar presente sempre que precisei, por não me deixar desistir nas dificuldades e por acreditar que eu iria conseguir até nos momentos em que eu mesmo não acreditava.





“Através dos séculos existiram homens que deram os primeiros passos, por novas estradas, armados com nada além de sua própria visão.” **Ayn Rand**



## RESUMO

LEAL, Cesar Augusto. Balanceamento de Linhas de Montagem por Meio de Modelos de Programação Linear Inteira Mista: Estudos em Indústria Automotiva. 2013. 166 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba-PR, 2013.

Em sistemas produtivos com arranjo físico por produto, ou linhas de produção, o tempo entre a finalização de dois produtos consecutivos afeta a produtividade da linha. Esse tempo é definido como o tempo de ciclo e é dado pela estação de trabalho cujo tempo total de execução das tarefas é o maior dentre todas na linha. De forma a se aumentar a produtividade de uma linha de montagem busca-se, geralmente, uma redução no tempo de ciclo. É usual, nesse contexto, a aplicação métodos de otimização que enfoquem o balanceamento da linha produtiva. O balanceamento da linha atua no sentido de reduzir a diferença entre os tempos dos postos de trabalho, visando uma redução no tempo do posto com maior carga de trabalho da linha, chamado posto gargalo. O presente projeto contempla a aplicação de um estudo de otimização para o balanceamento de linhas de montagem de modelo misto com duas condições operacionais especiais: Operações Automáticas e Tarefas Comuns. Operações Automáticas são aquelas realizadas por equipamentos automáticos, sem exigir a presença de operadores durante a execução da tarefa. Tarefas Comuns são caracterizadas por exigirem ou se beneficiarem do trabalho conjunto de dois ou mais operadores em sua execução. As duas condições são frequentemente encontradas na indústria automotiva, setor ao qual pertence a indústria na qual está situada a linha de montagem que foi o foco do estudo realizado no presente trabalho. Essa linha foi escolhida especialmente por apresentar tanto Operações Automáticas, quanto Tarefas Comuns. Para a obtenção das propostas de balanceamento foi desenvolvido um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) o qual indica a distribuição ótima de atividades entre os postos de trabalho e entre os operadores da linha estudada. Objetiva-se com o presente projeto: avaliar as influências que as Operações Automáticas e as Tarefas Comuns agregam ao balanceamento de uma linha de montagem; determinar um resultado factível mais próximo das condições operacionais reais para o balanceamento da linha de montagem estudada. Ao se avaliar os resultados obtidos através do modelo desenvolvido notou-se que as duas características citadas causam mais impacto na distribuição dos tempos dos operadores do que na distribuição dos tempos dos postos de trabalho. Foi possível identificar também que, nos casos estudados, Operações Automáticas geraram ganhos no balanceamento se alocadas no posto gargalo da linha. Tarefas Comuns, por sua vez, podem causar um aumento na carga de trabalho dos operadores e, por consequência, podem gerar correspondentes aumentos no tempo de ciclo da linha. Tarefas Comuns podem ser, no entanto, indispensáveis do ponto de vista operacional em vários casos reais. Em última instância, pode-se dizer que o modelo proposto possibilita a solução de problemas de balanceamento com características complexas ao levar em conta a possibilidade de existência de Operações Automáticas e Tarefas Comuns em linhas de montagem.

**Palavras-chave:** Balanceamento de linha de montagem, Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Pesquisa Operacional, Operações Automáticas, Tarefas Comuns.



## ABSTRACT

LEAL, Cesar Augusto. Balanceamento de Linhas de Montagem por Meio de Modelos de Programação Linear Inteira Mista: Estudos em Indústria Automotiva. 2013. 166 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba-PR, 2013.

In product layout manufacturing systems, or production lines, the elapsed time between the completion of two consecutive products affects the line productivity. This elapsed time is defined as the cycle time of the line and it is given by the workstation with greatest processing time within the line. In order to reach a productivity increase, the cycle time must be diminished and optimization methods that aim at balancing the production line are commonly used in this context. The line balancing acts to minimize the gap among the workstations processing times, aiming to reduce the processing time of the busiest station of the line, called the bottleneck station. This project takes into account a mixed-model assembly line balancing problem that features two special operational conditions: Automatic Tasks and Common Tasks. Automatic Tasks are the ones that are executed by automated equipment, without the need of action from a worker throughout its execution. Common Tasks are distinguished by requiring or benefiting from the simultaneous work of two or more operators. Both conditions can be frequently seen in automotive industries, as is the case of the assembly line that was focused on this paper. This assembly line was chosen because both Automatic and Common Tasks are featured on it. In order to get the desired results of the line balancing, a mathematical model in Mixed Integer Linear Programming (MILP), which indicates the optimum distribution of the tasks among stations and workers in the line, was developed. The goal in this work is to evaluate the influences that Automatic and Common Tasks have on the Assembly Line Balancing Problem and reach a feasible solution closer to the real operational conditions of the studied line. The results show that both Automatic and Common Tasks causes more changes to the workers time distribution than they do to the workstations time distribution. It was possible to see also that, within studied scenarios, the only way to achieve time cycle reduction with Automatic Tasks is to assign them to the bottleneck station of the line. In addition, it was observed that Common Tasks can increase the workers workload and raise the cycle time accordingly. Common tasks, though, can be imperative in a number of cases in industrial scenarios. At last, it can be said that the proposed model can solve non-trivial assembly line balancing problems as it takes into account the possibility of occurrence of both Automatic Tasks and Common Tasks in assembly lines.

**Keywords:** Assembly line balancing, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Operational Research, Automatic Tasks, Common Tasks.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ocupação de Postos de Trabalho em Linha de Produção de Bancos de Automóveis .....	29
Figura 2 – Ocupação de Postos de Trabalho em uma Linha de Produção de Veículos Semipesados .....	30
Figura 3 – Ocupação de Operadores em uma Linha de Produção de Veículos Semipesados .....	31
Figura 4 – Arranjo Físico de Produto em Linha Reta .....	39
Figura 5 – Exemplo de Diagrama de Precedência .....	40
Figura 6 – Linhas de montagem para modelo único e múltiplos modelos .....	45
Figura 7 – Diagrama de Precedência Equivalente .....	48
Figura 8 – Comparação hipotética entre linhas com diferentes índices de suavidade .....	52
Figura 9 – Posições de trabalho em um automóvel .....	54
Figura 10 – Exemplo de tarefas extra-longas.....	55
Figura 11 – Comparação entre linhas com múltiplos operadores e linhas com estações paralelas .....	57
Figura 12 – Disposição dos Centros de Usinagem .....	64
Figura 13 – Fluxograma básico do processo de modelagem.....	66
Figura 14 – Diagrama de Precedência Original.....	72
Figura 15 – Ocupação de Postos de Trabalho para Modelo L2H1 .....	75
Figura 16 – Ocupação de Operadores para o Modelo L2H1.....	75
Figura 17 – Ocupação de operadores para o Modelo L1H1 .....	76
Figura 18 – Diagrama original de tempos dos postos para o Modelo L2H1 .....	77
Figura 19 – Diagrama original de tempos dos postos para o Modelo L1H1 .....	78
Figura 20 – Comparação dos tempos dos operadores entre o Modelo Proposto e o Modelo Original .....	103

Figura 21 – Comparação dos tempos dos postos de trabalho entre o Modelo Proposto e o Modelo Original.....	104
Figura 22 – Tempos dos operadores para o balanceamento de referência sem Operações Automáticas ou Tarefas Comuns.....	106
Figura 23 – Tempos dos postos de trabalho para o balanceamento de referência sem Operações Automáticas ou Tarefas Comuns.....	107
Figura 24 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-1 .....	108
Figura 25 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-1 .....	109
Figura 26 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-2 .....	111
Figura 27 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-2 .....	111
Figura 28 – Comparação dos tempos dos operadores as condições (a) e (b) do Estudo AT-3 .....	114
Figura 29 – Comparação dos tempos dos operadores as condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4 .....	116
Figura 30 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (d) do Estudo AT-4..	118
Figura 31 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (d) do Estudo AT-4..	118
Figura 32 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (e) do Estudo AT-4..	120
Figura 33 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (e) do Estudo AT-4..	120
Figura 34 – Comparação entre os tempos dos postos de trabalho para as condições (d) e (e) do Estudo AT-4.....	121
Figura 35 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-1 .....	122
Figura 36 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-1 .....	123
Figura 37 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-2 .....	126
Figura 38 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-2 .....	126
Figura 39 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-3 .....	129
Figura 40 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-3.....	129
Figura 41 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-4 .....	132
Figura 42 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-4 .....	133



Figura 43 – Diagrama de Precedências Proposto.....	138
Figura 44 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-CnT.....	140
Figura 45 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-CnT .....	140



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre tipos de SALB .....	43
Tabela 2 – Postos e Tarefas em linha de montagem com Tarefas Comuns .....	60
Tabela 3 – Alocação inicial de operadores.....	61
Tabela 4 – Alocação de operadores proposta.....	62
Tabela 5 – Comparação dos resultados das alocações inicial e proposta .....	62
Tabela 6 – Alocação original das tarefas e seus respectivos tempos de operação ..	70
Tabela 7 – Alocação original dos operadores em relação aos Postos de Trabalho para o Modelo L2H1 .....	73
Tabela 8 – Alocação original dos operadores em relação aos Postos de Trabalho para o Modelo L1H1 .....	73
Tabela 9 – Tempos de deslocamentos entre os postos de trabalho .....	74
Tabela 10 – Indicadores originais da linha de montagem para o Modelo L2H1 .....	76
Tabela 11 – Indicadores originais da linha de montagem para o Modelo L1H1 .....	76
Tabela 12 – Comparação dos índices obtidos para o balanceamento dos operadores entre o Modelo Proposto e o Modelo Original.....	104
Tabela 13 – Comparação dos índices obtidos para o balanceamento de postos de trabalho entre o Modelo Proposto e o Modelo Original .....	104
Tabela 14 – Índices obtidos para o balanceamento de referência .....	107
Tabela 15 – Índices de balanceamento obtidos para o Estudo AT-1 .....	109
Tabela 16 – Índices de balanceamento obtidos para o Estudo AT-2 .....	112
Tabela 17 – Tempos de execução das cinco tarefas mais longas não associadas ao posto 14 .....	113
Tabela 18 – Comparação dos Índices de balanceamento obtidos para as condições (a) e (b) do Estudo AT-3.....	114
Tabela 19 – Comparação dos Índices de balanceamento obtidos para as condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4 .....	116

Tabela 20 – Alocação das tarefas entre os operadores associados ao posto com Operação Automática nas condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4 .....	117
Tabela 21 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-1 .....	123
Tabela 22 – Comparação entre as tarefas alocadas ao posto 12 na Referência e no Estudo CnT-1 .....	124
Tabela 23 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-2 .....	127
Tabela 24 – Comparação entre as tarefas alocadas ao posto 12 na Referência e no Estudo CnT-2 .....	127
Tabela 25 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-3 .....	130
Tabela 26 – Índices obtidos para o balanceamento da hipótese (i) .....	133
Tabela 27 – Índices obtidos para o balanceamento da hipótese (ii).....	133
Tabela 28 – Divisão da Tarefa 24 .....	136
Tabela 29 – Divisão da Tarefa 45 .....	136
Tabela 30 – Divisão da Tarefa 62 .....	136
Tabela 31 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo AT-CnT .....	141

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cálculos de Atraso de Balanceamento e Índice de Suavidade	51
Quadro 2 – Conjuntos aplicados ao modelo matemático original	80
Quadro 3 – Índices aplicados ao modelo matemático original	80
Quadro 4 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático original	80
Quadro 5 – Parâmetros aplicados ao modelo matemático original	81
Quadro 6 – Conjuntos aplicados ao modelo matemático proposto	89
Quadro 7 – Índices aplicados ao modelo matemático proposto	89
Quadro 8 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático proposto	90
Quadro 9 – Parâmetros aplicados ao modelo matemático proposto	90
Quadro 10 – Comparação do Modelo Original com o Modelo Proposto	98
Quadro 11 – Roteiro dos estudos realizados e seus objetivos	102
Quadro 12 – Relação de Operações Automáticas	135
Quadro 13 – Relação de Tarefas Comuns	135
Quadro 14 – Resumo dos estudos realizados e seus resultados	142



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

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

**CnT:** Tarefas Comuns, do inglês *Common Tasks*

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

**PLIM:** Programação Linear Inteira Mista

**PO:** Pesquisa Operacional

**RALB:** Balanceamento de Linha de Montagem Robotizada, do inglês *Robotic Assembly Line Balancing*

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

**VWALBP:** Problema de Balanceamento de Linha de Montagem com Postos de Trabalho Flexíveis, do inglês *Variable Workplaces Assembly Line Balancing Problem*

**UT:** Unidades de tempo





# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	Contexto do Tema	27
1.2	Caracterização do Problema	28
1.3	Objetivos	33
1.4	Justificativa	34
1.5	Conteúdo ou Etapas do Trabalho	35
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>37</b>
2.1	Arranjo físico por Produto	37
2.2	Terminologia da Análise de Linhas de Produção	39
2.3	Balanceamento de Linha	42
2.3.1	Balanceamento de Linha de Montagem Simples (SALB)	43
2.3.2	Restrições para Balanceamento de Linha de Montagem Simples	43
2.3.3	Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto	47
2.4	Balanceamento de linhas de montagem com operadores múltiplos	52
2.5	Balanceamento de linhas de montagem com Tarefas Comuns	58
2.6	Balanceamento de linhas de montagem com Operações Automáticas	63
2.7	Modelagem Matemática	65
2.8	Conclusões preliminares do capítulo	67
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>69</b>
3.1	Problema Real a ser Abordado	69
3.1.1	Introdução	69
3.1.2	Características da linha estudada	69
3.1.3	Modelo matemático original	78
3.2	O Modelo Matemático Proposto	86
3.2.1	Introdução	86
3.2.2	Operações Automáticas	87
3.2.3	Tarefas Comuns	87
3.2.4	Notações Matemáticas	88
3.2.5	Função Objetivo	90
3.2.6	Restrições aplicadas ao modelo	92
3.2.7	Comparação do Modelo Original com o Modelo Proposto	97
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>101</b>
4.1	Roteiro dos Estudos	101
4.2	Avaliação do problema original	103
4.3	Definição de um resultado de referência	105
4.4	Avaliação dos efeitos causados pelas Operações Automáticas no balanceamento da linha	107
4.4.1	Estudo AT-1: Efeitos da alocação de Operações Automáticas no Posto Gargalo	107
4.4.2	Estudo AT-2: Efeitos de Operações Automáticas com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo	110
4.4.3	Estudo AT-3: Comparação dos efeitos da alocação de Operações Automáticas dentro e fora do Posto Gargalo	113
4.4.4	Estudo AT-4: Operações Automáticas em postos com somente uma tarefa alocada	115
4.5	Avaliação dos efeitos causados pelas Tarefas Comuns no balanceamento da linha	122
4.5.1	Estudo CnT-1: Efeitos da alocação de Tarefas Comuns no Posto Gargalo	122

4.5.2	Estudo CnT-2: Efeitos de Tarefas Comuns com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo	125
4.5.3	Estudo CnT-3: O efeito do número de operadores alocados em uma Tarefa Comum	128
4.5.4	Estudo CnT-4: Avaliação dos efeitos da aplicação de Tarefas Comuns com ganhos no tempo de execução da tarefa	131
4.6	Análise do balanceamento de linha de montagem com a presença simultânea de Operações Automáticas e Tarefas Comuns	134
4.6.1	Definição das Operações Automáticas	134
4.6.2	Definição das Tarefas Comuns	135
4.6.3	Divisão dos blocos de tarefas	135
4.6.4	Definição de um novo Diagrama de Precedências	136
4.6.5	Estudo AT-CnT: Avaliação dos resultados obtidos para o balanceamento da linha de montagem com Operações Automáticas e Tarefas Comuns	139
4.7	Resumo dos Estudos Realizados	141
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE</b>	145
5.1	Conclusões	145
5.2	Sugestões de continuidade:	148
	<b>REFERÊNCIAS</b>	149
	<b>ANEXO A – TAREFAS DA ESTAÇÃO 01: <i>FRONT ROOF</i></b>	153
	<b>ANEXO B – TAREFAS DA ESTAÇÃO 02: LONGARINA ESQUERDA</b>	154
	<b>ANEXO C – TAREFAS DA ESTAÇÃO 03: LONGARINA DIREITA</b>	155
	<b>ANEXO D – TAREFAS DA ESTAÇÃO 04: TETO/EXTENSÃO DO TETO</b>	156
	<b>ANEXO E – TAREFAS DA ESTAÇÃO 05: ASSOALHO DIREITO E ESQUERDO</b>	157
	<b>ANEXO F – TAREFAS DA ESTAÇÃO 06: ASSOALHO FRONTAL E CENTRAL</b>	158
	<b>ANEXO G – TAREFAS DA ESTAÇÃO 07: JUNÇÃO DOS ASSOALHOS E FRONTAIS</b>	159
	<b>ANEXO H – TAREFAS DA ESTAÇÃO 08: LATERAL ESQUERDA</b>	160
	<b>ANEXO I – TAREFAS DA ESTAÇÃO 09: LATERAL DIREITA</b>	161
	<b>ANEXO J – TAREFAS DA ESTAÇÃO 10: PRÉ-MONTAGEM PAINEL TRASEIRO</b>	162
	<b>ANEXO L – TAREFAS DA ESTAÇÃO 11: PAINEL TRASEIRO</b>	163
	<b>ANEXO M – TAREFAS DA ESTAÇÃO 12: GEOMETRIA</b>	164
	<b>ANEXO N – TAREFAS DA ESTAÇÃO 13: <i>RESPOT</i></b>	165
	<b>ANEXO O – TAREFAS DA ESTAÇÃO 14: SOLDA MANUAL</b>	166

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

A produção em larga escala torna possível a redução dos custos de produção devido à grande quantidade de unidades produzidas do mesmo produto. A divisão do trabalho leva a aumentos na destreza dos trabalhadores e na produtividade. O mais alto nível de divisão do trabalho é obtido pela organização da produção em linhas de montagem (AMEN, 2001).

Em uma linha de produção composta por postos de trabalho por onde o produto passa de forma sequencial, o tempo de ciclo é o tempo decorrente entre a finalização de dois produtos consecutivos. Caracteristicamente, esse valor é determinado pelo posto de trabalho cujo tempo para realização das tarefas é o mais elevado, denominado, por isso, “posto gargalo”. Assim, quanto menor for este tempo de realização das tarefas no posto gargalo, menor será o tempo de ciclo e, por consequência, maior será a produtividade da linha.

Um tempo muito díspar entre os postos de trabalho caracteriza um desperdício de recursos e, nesse contexto, surgiu o conceito de balanceamento de linha. A ideia consiste, basicamente, em fazer com que o tempo de execução das operações associadas a postos de trabalho/operadores seja o mais equilibrado possível, reduzindo o efeito de “gargalo” na linha. Entretanto, realizar o balanceamento de uma linha de produção não é uma tarefa trivial, e ferramentas que auxiliem nesta tarefa são uma necessidade nos contextos industriais. Contudo, segundo Magatão (2001), o processo de tomada de decisões operacionais ainda é conduzido por critérios experimentais conservativos, que não exploram toda a capacidade produtiva dos sistemas.

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência que busca auxiliar o processo de tomadas de decisões operacionais por meio, por exemplo, da solução de modelos matemáticos que representam as variáveis apresentadas em problemas reais. Assim, a PO pode fornecer ferramentas estratégicas para a solução de problemas industriais e, em particular, para os problemas de balanceamento de linhas produtivas.

Uma das técnicas de sucesso da PO é a Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Um modelo desenvolvido em PLIM é composto, basicamente, por variáveis, que podem assumir valores discretos ou contínuos, uma função de avaliação a ser otimizada e restrições que limitam os valores das variáveis (WILLIAMS, 1999). Os modelos de PLIM permitem que uma grande variedade de problemas práticos sejam abordados, contudo, a linearidade na formulação deve ser observada.

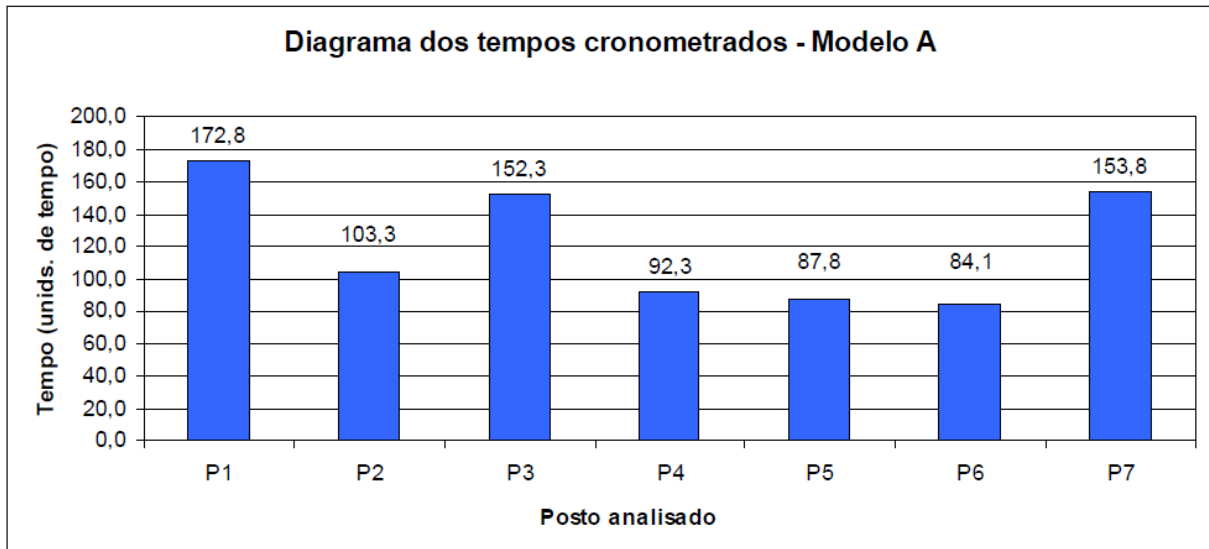
O presente projeto busca aprimorar o modelo desenvolvido em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o balanceamento de linhas produtivas proposto em Donnini (2009) e posteriormente expandido em Marcilio e Skraba (2010). Objetiva-se abranger um maior número situações reais que possam ser otimizadas através da evolução deste modelo. O projeto insere-se, portanto, no contexto da Pesquisa Operacional, como parte da Otimização da Manufatura.

## **1.2 Caracterização do Problema**

Conforme o que foi citado na Seção 1.1, é bastante comum que linhas de montagem industriais estejam desbalanceadas. Um resultado ótimo de balanceamento dificilmente é obtido sem a realização de análises mais aprofundadas. E é nesse contexto que pode ser aplicada a Pesquisa Operacional em suas diversas vertentes.

No problema de balanceamento de uma linha de bancos de automóveis estudado por Donnini (2009), o desbalanceamento ficou evidente, conforme se pode verificar na Figura 1, a qual indica os tempos de processamento em cada um dos sete postos da linha.

As diferenças de tempo entre os postos de trabalho indicam o desbalanceamento. Esse tipo de problema acarreta uma perda de eficiência significativa, e que é resultado da falta de um estudo mais detalhado na implantação/operação da linha de montagem. Muitas vezes o resultado obtido atende às necessidades de produtividade exigidas, mas existe a possibilidade de se produzir mais com a mesma estrutura ou, alternativamente, de se produzir o mesmo com uma estrutura mais enxuta, o que reduziria, em última instância, o custo de produção.



**Figura 1 – Ocupação de Postos de Trabalho em Linha de Produção de Bancos de Automóveis**

Fonte: (DONINNI, 2009)

Considere-se um problema de balanceamento de linha de montagem de veículos conforme o analisado por Marcilio e Skraba (2010). Trata-se de uma linha de montagem de cabines de caminhões semipesados da empresa VOLVO DO BRASIL, a qual está situada na Cidade Industrial de Curitiba-PR. No trabalho desenvolvido foram encontrados vários indícios de desbalanceamento pelos autores. Destacam-se:

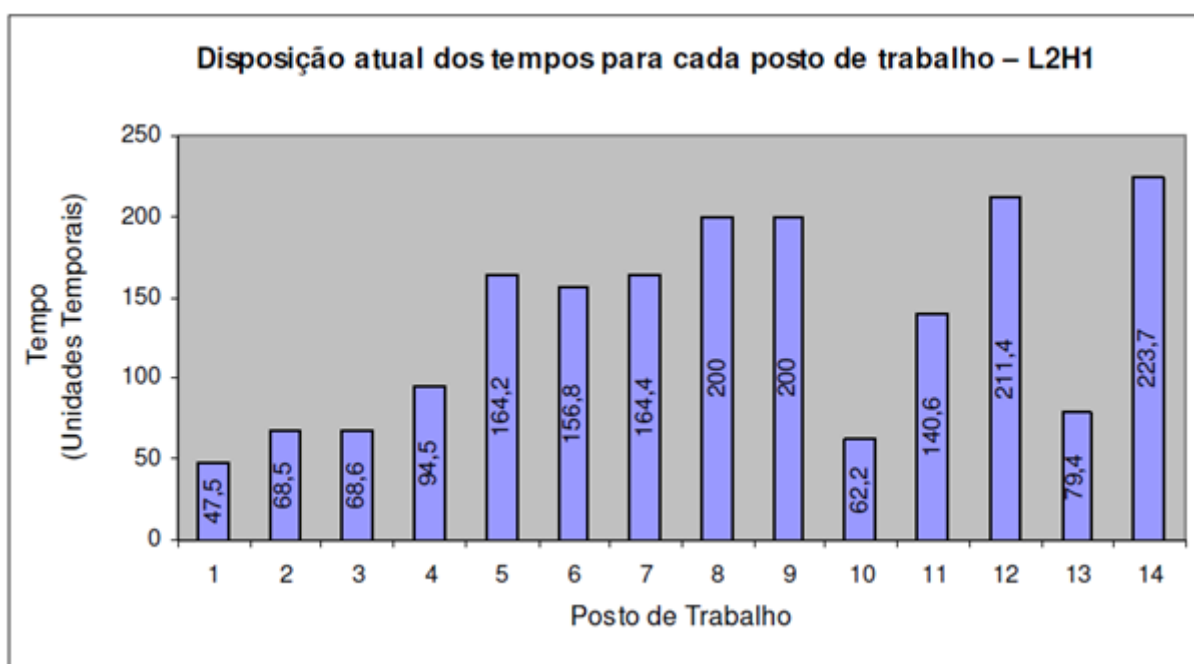
- Colaboradores ociosos na linha;
- Robôs parados esperando peças ou aguardando que o processo anterior fosse finalizado;
- Cabines paradas aguardando para seguir para a próxima operação.

Além disso, a linha estudada pelos autores apresenta as seguintes características:

- 14 Postos de trabalho;
- 9 Operadores;
- 2 Modelos diferentes de veículos produzidos.

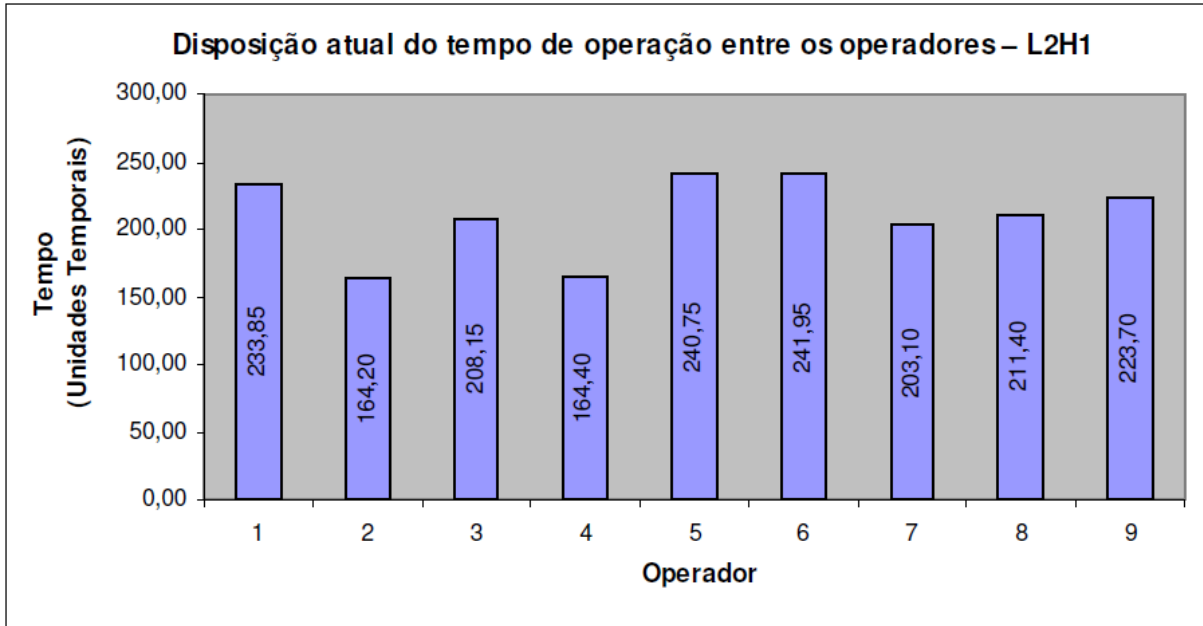
Pode-se notar na Figura 2 que havia um grande desbalanceamento entre os postos de trabalho da linha. Contudo, conforme indica a Figura 3, a linha em estudo

possuía um número de operadores menor que o número de postos de trabalho e, assim, alguns operadores desempenhavam tarefas em diferentes postos de trabalho. A Figura 3 indica a carga de trabalho associada a cada operador da linha. Nesta figura pode-se evidenciar o desbalanceamento entre a carga dos operadores da linha em estudo. De fato, o estudo de Marcilio e Skraba (2010) evidenciou que o gargalo da linha pode ser, inclusive, a carga de trabalho associada a um operador específico da linha. Concluiu-se, então, que havia a necessidade de balanceamento também da carga de trabalho entre os operadores e não somente dos postos de trabalho.



**Figura 2 – Ocupação de Postos de Trabalho em uma Linha de Produção de Veículos Semipesados**

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)



**Figura 3 – Ocupação de Operadores em uma Linha de Produção de Veículos Semipesados**

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

No trabalho de Marcilio e Skraba (2010), para se alcançar uma solução ótima, que maximizasse a produtividade sem a necessidade de investimentos significativos, foi empregada uma abordagem de obtenção de solução baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O objetivo, nesse caso, era sugerir uma nova distribuição de tarefas, operadores e postos que tornasse a linha mais balanceada. Nesse caso algumas considerações e limitações de modelagem foram impostas. Dentre elas destacam-se:

1. Devido ao número de postos de trabalho ser maior que o número de operadores, um mesmo operador poderia trabalhar em mais de um posto;
2. Por consequência da consideração 1, foram observados os tempos de deslocamento entre os postos quando um mesmo operador precisava dividir suas atividades entre diferentes postos;
3. Alguns postos de trabalho eram divididos por mais de um operador, fato que foi simplificado na modelagem, considerando-se que as tarefas de um posto fossem realizadas por apenas um operador;

4. Em consequência da consideração 3, algumas tarefas que demandavam mais de um operador para serem realizadas (por exemplo, operações de soldagem de peças grandes) foram consideradas de forma simplificada, admitindo-se que somente um operador seria capaz de realizá-la;
5. Algumas tarefas foram fixadas a determinados postos devido aos equipamentos já instalados que, por questões econômicas, não poderiam ser movidos;
6. Algumas tarefas fixas a postos de trabalho são realizadas por dispositivos automáticos, sem a necessidade de acompanhamento ininterrupto do operador. Tais tarefas são denominadas Operações Automáticas. Contudo, neste caso, uma abordagem simplificada foi utilizada em Marcilio e Skraba (2010), considerando-se que o tempo de realização da Operação Automática era integralmente associado à carga de trabalho do operador.

De acordo com Marcilio e Skraba (2010), há potencial para se aplicar abordagens de balanceamento de modelo misto mais elaboradas que a apresentada pelos autores, aprimorando o modelo apresentado. Por exemplo, a simplificação realizada, de que apenas um operador deveria estar associado a cada posto de trabalho poderia ser abordada, o que traria um resultado mais próximo ao real, fornecendo, por consequência, uma solução mais aderente à prática operacional.

Assim, conforme anteriormente explorado, alguns casos reais têm maior complexidade operacional e o modelo aplicado por Marcilio e Skraba (2010) em sua pesquisa apresenta limitações de uso. Ou seja, há uma lacuna que pode ser preenchida por alterações no modelo que visem torná-lo mais genérico. Essa é a situação problema que o presente estudo visa resolver: Como solucionar o problema real de balanceamento de linha de montagem de modelo misto apresentado em Marcilio e Skraba (2010), considerando-se:

1. A possibilidade de existir mais de um operador em um posto de trabalho e que algumas tarefas demandam, de fato, mais de um operador para poderem ser realizadas;



2. Algumas operações presentes no posto são automáticas, necessitando apenas serem inicializadas pelos operadores.

As duas considerações práticas mencionadas foram anteriormente simplificadas no trabalho de Marcilio e Skraba (2010).

A oportunidade, portanto, é aumentar a quantidade de aplicações reais que possam ser avaliadas por meio da expansão/modificação do modelo de PLIM apresentado em Marcilio e Skraba (2010).

### **1.3 Objetivos**

Conforme descrito na Seção 1.2, o presente trabalho tem por objetivo geral aprimorar o modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) proposto por Marcilio e Skraba (2010) contemplando duas condições operacionais adicionais:

- i. Possibilidade de existência de múltiplos operadores presentes em um mesmo posto de trabalho para a realização de tarefas específicas, denominadas Tarefas Comuns (mais detalhes na Seção 2.5);
- ii. Possibilidade de existência de Operações Automáticas na linha, as quais não demandam a presença de um colaborador enquanto são realizadas, mas impactam no tempo de ciclo de fabricação do produto (detalhes adicionais na Seção 2.6).

A partir desse modelo expandido propõem-se soluções para o balanceamento de uma linha de montagem real já estudada por Marcilio e Skraba (2010), comparando os resultados obtidos pelos autores citados com os resultados obtidos no presente trabalho.

Como objetivos específicos destacam-se:

1. Aprofundar conhecimentos sobre o tema balanceamento de linhas, evidenciando suas definições, especificações, limitações, variedades, recentes avanços na área e possíveis abordagens a serem seguidas em cada caso;
2. Verificação do funcionamento e aplicabilidade de um modelo computacional direcionado a problemas reais de balanceamento de

linha de montagem, avaliando suas características, deficiências e validade de resultados gerados;

3. Implementação e resolução, através de ferramenta computacional, de modelos matemáticos em Programação Linear Inteira Mista capazes de gerar soluções factíveis aos problemas de balanceamento de linha de montagem em estudo e que permitam a avaliação de condições nas quais múltiplos operadores possam trabalhar em um mesmo posto de trabalho executando Tarefas Comuns;
4. Implementação e resolução, através de ferramenta computacional, de modelos matemáticos em Programação Linear Inteira Mista capazes de gerar soluções factíveis aos problemas de balanceamento de linha de montagem em estudo e que permitam a avaliação de condições nas quais determinadas operações possam ser consideradas automáticas, ou seja, independentes de operadores durante sua execução;
5. Aplicação de dados reais no modelo gerado e comparação entre os resultados obtidos por Marcilio e Skraba (2010) com os alcançados no presente trabalho.

#### **1.4 Justificativa**

De acordo com Smiderle *et al.* (1997) o objetivo dos processos modernos de montagem é proporcionar ao cliente alta qualidade com custos de produção mínimos. Ou seja, a competitividade do mercado industrial é cada vez maior e isso exige que as empresas busquem continuamente um funcionamento mais enxuto e eficiente. Ganhos de eficiência podem ocorrer por meio de reduções de custos e/ou aumentos de produtividade.

É de suma importância, portanto, um procedimento eficiente para planos de linha de montagem que vise proporcionar o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis (SMIDERLE *et al.*, 1997).

Os aspectos de balanceamento de linha costumam ser negligenciados nesse cenário, sendo que as escolhas nesse processo são basicamente pautadas por critérios experimentais (MAGATÃO, 2009). Há, portanto, uma oportunidade de

melhoria, visto que esses critérios experimentais dificilmente correspondem com uma solução ótima.

É possível notar, a partir dessas observações, que um modelo de Programação Linear Inteira Mista que tenha uma grande abrangência de situações reais de balanceamento de linha pode ser de muita utilidade neste contexto industrial.

### **1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho**

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, a qual contempla uma busca do estado da arte nos temas relacionados ao presente projeto. Nesse caso foram definidos os conceitos de sistemas de produção, em especial linhas de produção de modelo misto, e de Pesquisa Operacional, com ênfase nos objetivos centrais do trabalho: estações com Tarefas Comuns e estações com Operações Automáticas.

No Capítulo 3 é avaliado o modelo já existente, desenvolvido e aplicado por Marcilio e Skraba (2010) e, em seguida, são implementadas as possibilidades de se considerar que algumas tarefas devem ser executadas por mais de um operador simultaneamente (Tarefas Comuns) e que algumas tarefas possam ser automáticas (Operações Automáticas). Apresenta-se, também, a formulação completa do modelo proposto no presente trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação do novo modelo proposto no problema endereçado por Marcilio e Skraba (2010). Os efeitos gerados pelas Operações Automáticas e pelas Tarefas Comuns são identificados e as diferenças nos resultados são evidenciadas e explicadas.

O Capítulo 5 traz as conclusões tiradas a partir da análise realizada no Capítulo 4. Além disso, são sugeridos futuros trabalhos para dar continuidade ao que foi desenvolvido no presente trabalho.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Arranjo físico por Produto

Segundo Slack *et al.* (2009) existem apenas quatro formas básicas de se organizar um arranjo físico produtivo:

- Arranjo físico posicional;
- Arranjo físico funcional;
- Arranjo físico celular;
- Arranjo físico por produto.

O arranjo físico posicional, também denominado arranjo físico de posição fixa, é caracterizado pela imobilidade do produto. Nesse tipo de arranjo os equipamentos e as pessoas envolvidas no processo movem-se para gerar a necessária transformação no produto final. Esse tipo de arranjo físico é geralmente adotado porque o produto final é muito grande ou muito delicado para ser movimentado (SLACK *et al.*, 2009).

No modelo de arranjo físico funcional os recursos ou processos similares são localizados juntos um ao outro, ou seja, há uma segmentação de acordo com a função da operação produtiva. Esse tipo de arranjo físico é escolhido quando há alguma exigência estrutural para a instalação de um grupo de operações, como a necessidade exaustores de fumaça, por exemplo, ou quando o nível de utilização de um grupo funcional de operações é tão elevado que praticamente todas as peças requerem sua aplicação. O fluxo de informações no arranjo físico funcional costuma ser bastante complexo, visto que diferentes produtos ou clientes poderão percorrer roteiros diferentes de acordo com suas necessidades específicas de processamento (SLACK *et al.*, 2009).

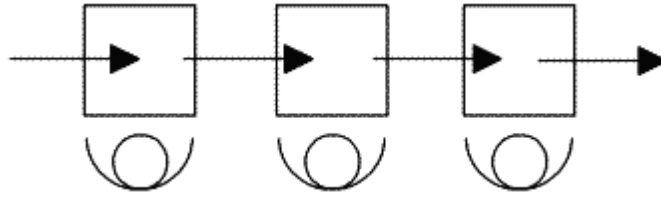
Em um arranjo físico celular recursos transformados, entrando na operação, são pré-selecionados para movimentar-se para uma parte específica da operação, denominada célula, na qual todos os recursos transformadores necessários a atender suas necessidades imediatas de processamento se encontram. Internamente, a célula pode ser organizada por um arranjo físico funcional ou um

arranjo físico por produto. O arranjo físico celular é uma tentativa de organizar e tornar mais simples e claro o padrão de fluxo do arranjo físico funcional (SLACK *et al.*, 2009).

No arranjo físico por produto a localização dos recursos produtivos transformadores é totalmente dependente da melhor conveniência do recurso que está sendo transformado. Cada produto segue um roteiro pré-definido pelo qual a sequência de atividades requerida coincide com a sequência na qual os processos são arranjados fisicamente. Dessa forma, os recursos em transformação seguem um fluxo ao longo de uma “linha” de processos, motivo pelo qual o arranjo físico por produto é muitas vezes chamado de arranjo físico em linha (SLACK *et al.*, 2009). No presente estudo o foco será no arranjo físico por produto, pois os estudos de casos que serão endereçados apresentam esse modelo de arranjo.

O arranjo físico por produto muitas vezes é denominado linha de montagem e é tipicamente aplicado em casos cujo volume de produção é elevado. Nessas situações, via de regra, os postos de trabalho estão dispostos linearmente. É comum que essa disposição seja em linha reta, mas essa definição não é restritiva, sendo possível se obter arranjos físicos em formato de L, S, O ou U (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004). A Figura 4 ilustra um exemplo de disposição física em linha reta em arranjo físico por produto. Há grandes vantagens no arranjo físico por produtos em aplicações com grande volume de unidades produzidas, de acordo com Ritzman e Krajewski (2004):

- Ritmos de processamento mais rápidos;
- Estoques menores;
- Menos tempo improdutivo perdido em conversões e movimentação de material.



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

Fonte: (DONINNI, 2009)

Gaither e Frazier (2002) também citam como vantagens desse tipo de arranjo uma menor necessidade de habilidade, treinamento, supervisão e *setup*, visto que se aplicam usualmente máquinas especializadas que são configuradas uma única vez para executar uma operação específica por um longo período de tempo.

Como desvantagens identificadas por Ritzman e Krajewski (2004) destacam-se:

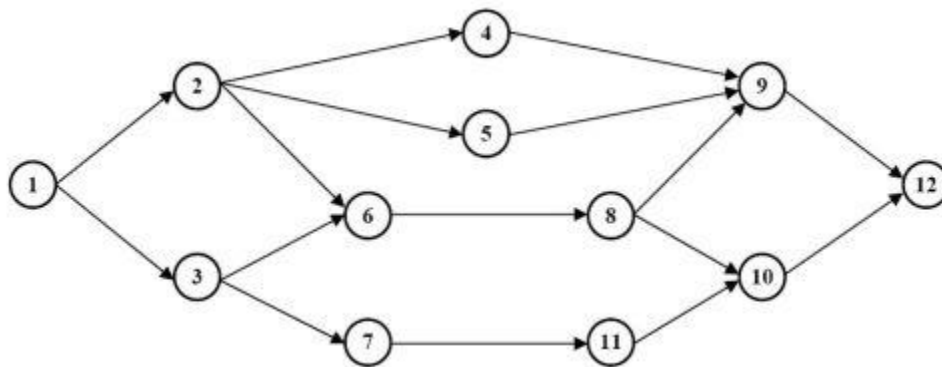
- Alto investimento inicial;
- Pouca flexibilidade da linha;
- Alto custo de modificações da operação;
- Impossibilidade dos postos trabalharem independentemente, limitando o ritmo da linha pelo posto mais lento.

## 2.2 Terminologia da Análise de Linhas de Produção

Faz-se necessário o conhecimento de alguns termos relativos ao processo de balanceamento de linhas de montagem para o entendimento do conteúdo do trabalho:

- **Tarefa:** segundo Boysen *et al.* (2006), é uma unidade indivisível de trabalho, sendo a cada uma destas atribuída um tempo de duração. Também definida por Ritzman e Krajewski (2004) como sendo: “menores unidades de trabalho que podem ser executadas de modo independente”;
- **Duração de uma tarefa:** é o tempo necessário para que um operador habilitado ou uma máquina não assistida executem uma tarefa (GAITHER; FRAZIER, 2002);

- **Precedência entre tarefas:** segundo Gaither e Frazier (2002), é a sequência ou ordem pela qual as tarefas devem ser executadas;
- **Diagrama de precedência:** diagrama construído que permite visualizar a precedência entre as tarefas (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004). As tarefas são simbolizadas por círculos e as setas conduzem de uma tarefa precedente a próxima a ser executada, formando um mapa do funcionamento da linha de produção. Na Figura 5, abaixo, nota-se que existe uma relação de precedência entre as tarefas 3, 7 e 11, por exemplo. Ou seja, para a execução da tarefa 7 a tarefa 3 já deve ter sido executada e, pelo mesmo raciocínio, a execução da tarefa 11 depende da prévia execução da tarefa 7 e conseqüentemente da tarefa 3.



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

Fonte: (MAGATÃO, 2009)

- **Estação ou posto de trabalho:** “localização física onde um conjunto particular de tarefas é executado” (GAITHER e FRAZIER, 2002);
- **Tempo de ciclo:** é definido como o tempo entre as saídas consecutivas de produto ao fim da linha de produção segundo Gaither e Frazier (2002). O posto de trabalho mais lento determinará o tempo de ciclo real da linha, tendo em vista a desvantagem do arranjo físico por produto citada na Seção 2.1: a dependência entre os postos de trabalho;

A Equação (1) exemplifica a obtenção do *takt time*, a taxa de produção demandada pelo cliente ou mercado consumidor, para uma determinada linha de



produção. Ao utilizar a taxa de produção desejada em unidades por hora, o *takt time* é obtido em horas por unidade (adaptado de RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004).

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

onde, “*tt*” representa o *takt time* e “*r*” a taxa de produção desejada.

É possível se obter o número mínimo de estações de trabalho necessárias para fornecer a taxa de produção desejada, através da Equação (2) (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004).

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

onde “*ME*” representa o número mínimo de estações de trabalho necessárias, “ $\sum t$ ” a soma dos tempos das tarefas (notar que *t* pertence ao conjunto total de tarefas) e “*tt*” o tempo de ciclo teórico, obtido a partir da Equação (1).

Para se chegar a um valor implementável (valor real) de estações de trabalho é necessário arredondar o valor do número mínimo de estações de trabalho encontrado com auxílio da Equação (2) para o próximo valor inteiro mais alto. Outro indicador importante é o grau de utilização da linha, representando a porcentagem de tempo que uma linha de produção trabalha, calculado através da Equação (3) (GAITHER; FRAZIER, 2002).

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

onde “*ME*” representa o número mínimo de estações de trabalho encontrado com o auxílio da Equação (2) e “*RE*” o valor real de estações de trabalho adotado na linha de produção.

O cálculo da eficiência da linha é realizado dividindo o somatório dos tempos das tarefas pelo produto da multiplicação do número real de estações de trabalho pelo *takt time*, como indicado na Equação (4) (adaptado de RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004). É possível utilizar o valor do tempo de ciclo real ao invés do *takt time* para calcular a eficiência em relação ao tempo mais lento da linha.

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

A ociosidade de uma linha de produção é calculada multiplicando-se o número de postos existentes pelo *takt time* e subtraindo deste valor a soma dos tempos necessários à execução das tarefas (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004), como indicado na Equação (5). O mesmo valor é encontrado somando-se os tempos ociosos de cada estação de trabalho, representados pela subtração do *takt time* pelo somatório dos tempos das tarefas da estação.

$$Ociosidade = RE.tt - \sum t \quad \text{Equação(5)}$$

Também é possível calcular o tempo ocioso total em relação ao tempo de ciclo real da linha de montagem, bastando incluí-lo na Equação (5), no lugar do *takt time* (adaptado de RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004).

### 2.3 Balanceamento de Linha

O conceito básico de balanceamento de linha pode ser definido como a atribuição de tarefas a postos em uma linha produtiva, objetivando-se reduzir ao máximo possível o número de postos de trabalho necessário para se atingir o índice de produção desejado (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004). Ainda, segundo Gaither e Frazier (2002), pode-se definir balanceamento de linha como “a análise de linhas de produção que divide igualmente o trabalho a ser feito entre estações de trabalho, a fim de que o número de estações de trabalho necessário na linha de produção seja minimizado”.

Essa análise faz-se necessária, de acordo com Ritzman e Krajewski (2004) principalmente em três situações:

- Durante sua instalação;
- Quando é necessário alterar o seu índice de produção horário;
- Quando ocorre modificação do produto ou processo.

Segundo Boysen *et al.* (2006), a configuração ou reconfiguração de uma linha de montagem é essencial para aplicar um sistema de custo eficiente.

Tipicamente realizam-se um grande número de simplificações para se resolver problemas de balanceamento de linhas. Por esse motivo identificou-se esse campo de pesquisas específico com o título de Balanceamento de Linha de Montagem

Simples, do inglês *Simple Assembly Line Balancing*, ou simplesmente SALB, oriunda dos trabalhos de Baybars (1986). A necessidade da avaliação de problemas mais complexos, envolvendo linha com disposição em “U”, linhas multi-modelo e linhas com estações de trabalho paralelas, originou o termo GALB, do inglês, *General Assembly Line Balancing*, traduzido como Balanceamento de Linha de Montagem Generalizado (BOYSEN *et al.*, 2006).

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

Os problemas do tipo SALB podem ser divididos em quatro subtipos de acordo com a sua função objetivo (BOYSEN *et al.*, 2006).

1. SALBP-1;
2. SALBP-2;
3. SALBP-E;
4. SALBP-F.

A Tabela 1 indica a diferença entre as categorizações de SALB, de acordo com Becker e Scholl (2006).

**Tabela 1 – Comparativo entre tipos de SALB**

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

Fonte: (BECKER; SCHOLL, 2006)

Na Tabela 1 verifica-se que, por exemplo, se existir um número de estações de trabalho dado *a priori* e desejarmos minimizar o tempo de ciclo, trata-se de um problema do tipo SALBP-2. O tipo SALBP-1 se refere à situação em que, dado um tempo ciclo, deseja-se minimizar a soma dos tempos ociosos das estações, minimizando-se, também, o número de estações utilizadas. Se tanto o tempo de ciclo quanto o número de estações podem ser alterados, o problema é considerado como SALBP-E. O tipo SALBP-F refere-se ao problema que verifica, dados tempos de ciclo e número de estações, se o problema é factível (BOYSEN *et al.*, 2006).

### 2.3.2 Restrições para Balanceamento de Linha de Montagem Simples

Para que um problema possa ser tratado como um problema SALB é necessário que ele atenda às seguintes restrições (BOYSEN *et al.*, 2006):

- Produção em massa de um produto homogêneo;
- Todas as tarefas são executadas de um modo predeterminado;
- Linha em compasso de acordo com um tempo de ciclo fixo;
- Linha em série, sem elementos paralelos;
- A sequência de processamento está submetida a restrições de precedência;
- Tempos de tarefas determinísticos (de pequena variabilidade);
- Nenhuma restrição de atribuição para as tarefas além das restrições de precedência;
- Uma tarefa não pode ser dividida em duas ou mais estações;
- Todas as estações estão, em termos de equipamento e mão-de-obra, igualmente equipadas.

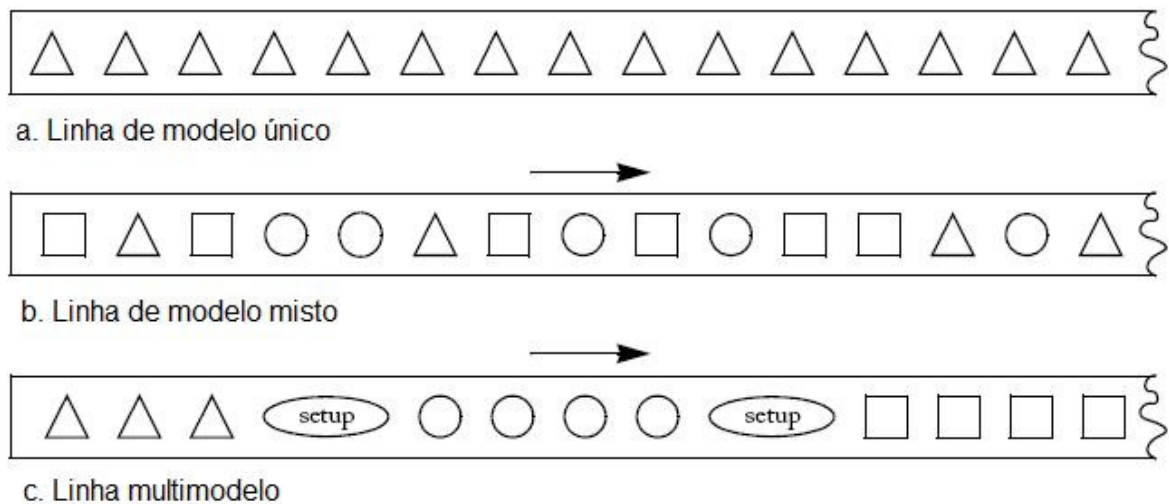
De acordo com Boysen *et al.* (2006), nota-se, na literatura, que várias destas restrições são abandonadas ou modificadas por diversos modelos devido à complexidade das condições da situação real. Isso ocorre, segundo Gerhardt *et al.* (1989 *apud* DAVIS, 2007, p. 268), “para atender à demanda por produtos customizados e de baixo custo, um novo sistema de produção foi concebido por Davis (1989), a customização em massa”. Ou seja, nos sistemas modernos de produção tornou-se comum a produção de diferentes modelos em uma mesma linha de montagem.

Nesse caso pode-se classificar em dois tipos, que se diferenciam da linha de produção simples (BOYSEN *et al.*, 2006):

1. Linha de produção mista: onde vários modelos de um produto básico são fabricados na mesma linha de produção. Nesse caso não há a necessidade da realização de *set-up* das máquinas (ou há um tempo de *set-up* muito pequeno) entre modelos. Caso típico onde há grande similaridade entre os modelos e o produto básico (SMIDERLE *et al.*, 1997).

2. Linha multi-modelo: onde existem diferenças significativas nos produtos produzidos em uma mesma linha. Caracteristicamente, nesses casos, a produção é realizada em lotes para minimizar a perda de produtividade gerada pelos tempos de *set-up* entre os modelos. Nesse tipo de linha surge um novo problema: o dimensionamento dos lotes, o qual deve ser de um tamanho mínimo que compense o tempo de *set-up*, maximizando as quantidades produzidas (SMIDERLE *et al.*, 1997).

Uma comparação entre as formas diferentes de organização de produção de linhas pode ser identificada ao se observar a Figura 6, na qual diferentes formas geométricas representam diferentes modelos de produtos (BECKER; SCHOLL, 2006).



**Figura 6 – Linhas de montagem para modelo único e múltiplos modelos**

Fonte: (BECKER; SCHOLL, 2006)

Os sistemas de montagem podem ser diferenciados em relação ao controle da movimentação entre estações da seguinte forma (BOYSEN *et al.*, 2006):

- Linhas em compasso: onde um valor fixo de tempo de ciclo restringe a quantidade de trabalho das estações; as peças são movimentadas ao mesmo tempo em todas as estações;

- Linhas descompassadas: em que as peças não precisam esperar um tempo predeterminado para serem transferidas ao próximo posto; são movimentadas assim que a operação acaba.

É necessário verificar a variabilidade dos tempos de tarefas, pois, nos casos reais, estes dificilmente serão determinísticos, de acordo com Boysen *et al.* (2003 *apud* TEMPELMEIER, 2006). Pode-se, porém, justificar a caracterização de tempos como determinísticos quando a variação é suficientemente pequena, do contrário, os tempos são considerados estocásticos (quando taxa de trabalho, habilidade e motivação dos humanos ou sensibilidade à falha de processos complexos são consideradas) ou dinâmicos (tempos que variam com o tempo, como, por exemplo, devido ao efeito do aprendizado ou a melhorias no processo produtivo) (BOYSEN *et al.*, 2006).

Tradicionalmente, as linhas de montagem são organizadas com estações em série, arranjadas ao longo de uma linha reta, e não há problemas no caso de alteração no *layout* deste tipo de linha. Existem, contudo, casos em que o balanceamento se torna mais complicado. Dois exemplos são citados em (BOYSEN *et al.*, 2006):

- Linhas em forma de “U”, nas quais, devido à proximidade de algumas estações de trabalho, um operador pode realizar o trabalho em mais de uma estação durante o tempo de ciclo;
- Linhas com alimentação externa, em que é preciso considerar, ao mesmo tempo, o balanceamento destas linhas externas.

Por vezes é preferível, ao invés de aumentar o grau de divisão do trabalho, introduzir alguma espécie de paralelização, como instalar outras linhas completas em paralelo, sendo uma para cada produto ou famílias de produto, ou ainda instalar estações em paralelo onde, em uma mesma linha, algumas estações de trabalho realizam operações idênticas em um determinado ponto da linha (BOYSEN *et al.*, 2006).

É preciso verificar também se existem no processo operações que dependem de equipamentos complexos, geralmente de custo elevado, que não estão

disponíveis a todas as estações de trabalho, um fato que restringe algumas opções durante o balanceamento (BOYSEN *et al.*, 2006).

### **2.3.3 Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto**

Atualmente há uma tendência de customização em massa na manufatura, descrita anteriormente. Assim, tornou-se comum a implantação de linhas de montagem de modelo misto. Ao mesmo tempo em que se busca atingir alta produtividade, no atual cenário industrial, é importante que as linhas de produção tenham flexibilidade e estejam preparadas às mudanças de curto prazo na demanda para diferentes modelos (BUKCHIN *et al.*, 2002).

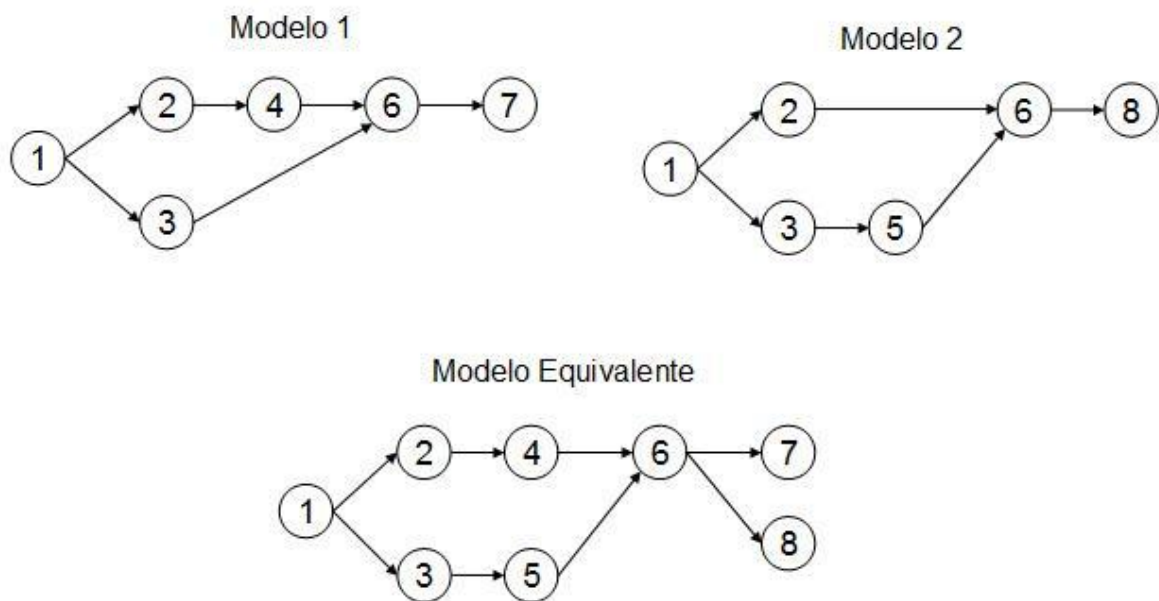
A variação dos modelos pode ser, por exemplo, tamanho, cor, material ou equipamentos utilizados, mas os processos se mantêm similares, ou seja, há uma grande parte comum no processo de fabricação. Os sistemas de produção de modelo misto são bastante utilizados por proporcionarem um fluxo contínuo de materiais, por permitirem a redução de estoques de produtos acabados e por apresentarem grande flexibilidade em relação às mudanças de modelos. Entretanto, linhas produtivas de modelo misto exigem a aplicação de equipamentos de custo elevado, os quais reduzem ou mesmo eliminam os tempos de troca de ferramental para a fabricação de diferentes modelos em uma linha (SCHOLL, 1999).

De acordo com Thomopoulos (1967), em tese, pode-se separar uma linha de produção de modelo misto em diferentes linhas para cada modelo, reduzindo o problema de balanceamento de modelo misto em alguns problemas de balanceamento de linha simples (SALBP). É, no entanto, desejável manter tarefas semelhantes necessárias à fabricação de diferentes modelos em uma mesma estação, visando aproveitar os efeitos de aprendizado do operador e, conforme citado por Scholl (1999), evitar a instalação duplicada de equipamentos e ferramentas de produção.

As restrições para problemas de balanceamento de linhas de montagem de modelo misto são bastante próximas às aquelas apresentadas na Seção 2.3.2, como tempos determinísticos, linha de montagem em série, taxa de produção constante e montagem de cada modelo com tarefas seguindo restrições de precedência (SCHOLL, 1999). Devem-se considerar, adicionalmente, algumas análises que

surgem da montagem conjunta de diferentes modelos. Por exemplo, faz-se necessária a construção de um diagrama de precedência equivalente. Neste diagrama, consideram-se todas as tarefas realizadas em todos os modelos, podendo, no caso de Tarefas Comuns, apresentar diferentes tempos para diferentes modelos e atribuindo-se tempos nulos para operações não utilizadas por um determinado modelo.

A Figura 7 exemplifica a construção de um diagrama de precedência equivalente.



**Figura 7 – Diagrama de Precedência Equivalente**

Fonte: (DONINNI, 2009)

Na Figura 7, os nós com o mesmo número representam a mesma operação, mesmo que com tempos de operação não necessariamente idênticos. As relações de precedência são combinadas, respeitando-se as restrições de todos os modelos.

De acordo com Gerhardt *et al.* (2007) para o balanceamento de linhas de montagem de modelo misto, há duas diferenças básicas no processo de coleta de informações em relação ao balanceamento de linha de modelo único:

1. O levantamento da demanda de cada modelo;
2. A geração do diagrama de precedência equivalente.



Como procedimento para a realização do balanceamento de uma linha de produção de modelo misto, Thomopoulos (1967) propõe a utilização dos tempos de execução necessários em um turno de produção. O autor sugere a obtenção dos tempos a partir da realização de um somatório dos produtos das multiplicações das quantidades de cada modelo produzido pelos tempos de execução de suas respectivas tarefas. A divisão desse valor obtido pelo tempo disponível para a produção, arredondando-se o resultado para o primeiro valor inteiro superior, fornece, de acordo com o autor, o número mínimo de postos para o funcionamento da linha. A divisão do tempo necessário para produção por esse número de postos resulta no tempo de trabalho que cada operador da linha de montagem teria em um turno, considerando-se uma distribuição igual da carga de trabalho entre todos os operadores da linha.

Outra proposição, realizada por Simaria e Vilarinho (2004), seria a utilização dos valores percentuais de demanda de cada modelo, multiplicando-os pelos tempos de tarefa de cada modelo, obtendo-se, assim, tempos de execução equivalentes. Essa solução gera, no entanto, uma dificuldade: a simples distribuição das operações do diagrama de precedência equivalente entre os postos de trabalho pode gerar uma distribuição de trabalho desigual para um determinado modelo.

Uma função objetivo típica de um problema de balanceamento de linhas é a minimização do tempo de ciclo. Contudo, para conferir mais suavidade à variação de trabalho entre as estações da linha a ser balanceada Thomopoulos (1970) propôs uma modificação nesta função típica: considerar-se a minimização da diferença absoluta entre o tempo de ciclo médio de cada modelo produzido (somatório dos tempos de todas as tarefas deste modelo dividido pelo número de estações) e seu tempo em cada uma das estações, respeitando-se as restrições impostas pelo diagrama de precedência equivalente. Isso acarreta um trabalho de ritmo mais constante para os operadores, minimizando-se a ineficiência inerente à fabricação de diferentes modelos em uma mesma linha.

Também proposto por Thomopoulos (1970), o Atraso de Balanceamento é um indicador do desbalanceamento de uma linha de montagem de modelo misto semelhante ao cálculo de eficiência citado para o balanceamento de montagem de modelo simples. Primeiramente calcula-se o Atraso de Balanceamento de cada

modelo, medido em porcentagem, de acordo com a Equação (6), na qual “*Atraso de Balanceamento (%)<sub>m</sub>*” indica uma medida percentual de desbalanceamento para um modelo de produto “*m*”, “*t<sub>total,m</sub>*” representa a multiplicação do tempo de ciclo real de determinado produto “*m*” de um conjunto “*M*” contendo todos os modelos de produtos pelo número de estações e “ $\sum t_{postos,m}$ ” indica a soma dos tempos dos postos de determinado modelo de produto “*m*”. Em seguida multiplica-se o Atraso de Balanceamento de cada modelo por sua respectiva porcentagem de demanda. A soma desses fatores será o Atraso de Balanceamento da linha de montagem de modelo misto como um todo. Quanto menor o valor, mais eficiente é o balanceamento da linha analisada.

$$\text{Atraso de Balanceamento } (\%)_m = \frac{t_{total,m} - \sum t_{postos,m}}{t_{total,m}} \quad \forall m \in M \quad \text{Equação(6)}$$

Um atraso de balanceamento nulo indica um balanceamento perfeito, quando todas as estações da linha de produção apresentam o mesmo tempo de execução (DESSOUKY *et al.*, 1995).

Outro indicador que pode ser utilizado é o Índice de Suavidade, cujo resultado fornece a “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), calculado através da Equação (7). De acordo com a autora, “quanto maior o Índice de Suavidade, maior a variação dos tempos de operação entre as estações”, implicando um balanceamento menos eficaz. Ou seja, quanto menor o Índice de Suavidade, mais equilibrada a carga de trabalho entre as estações.

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

onde “*RE*” representa o número de postos, “*S<sub>max</sub>*” o tempo de execução mais alto entre as estações e “*S<sub>p</sub>*” o tempo de execução da estação “*p*”. O valor do Índice de Suavidade é expresso em unidades de tempo (UT).

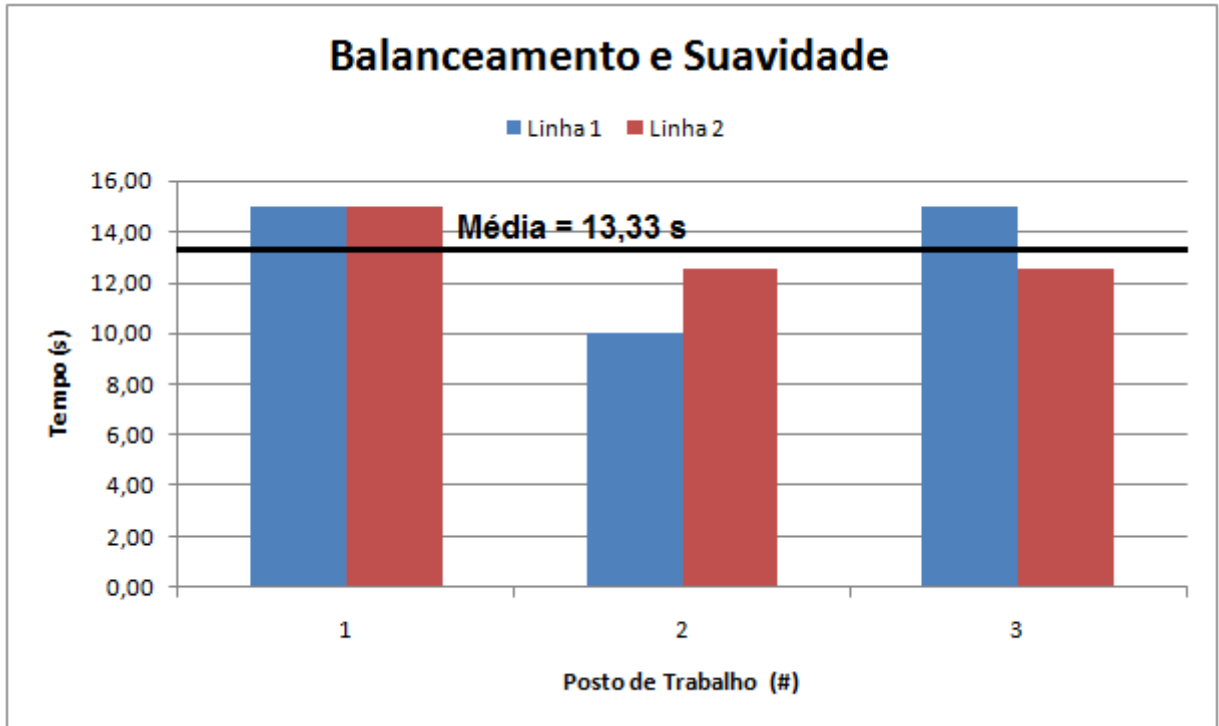
O objetivo do índice de suavidade é avaliar a diferença entre os tempos totais de execução de cada posto e o tempo de execução médio. Por exemplo, a Figura 8 a seguir apresentada ilustra uma comparação hipotética (didática) entre duas linhas

com diferentes índices de suavidade. Nesta figura apresenta-se, na cor azul, uma linha de montagem com três postos cujo atraso de balanceamento é de 11,11% e cujo índice de suavidade é de 5 UT; e, na cor vermelha, uma linha de montagem semelhante, mas que apresenta um índice de suavidade de 3,54 UT, apesar de ter o mesmo atraso de balanceamento. Os cálculos são ilustrados no Quadro 1 a seguir.

As chaves mostram a máxima diferença entre os tempos dos postos e o tempo médio nas duas linhas. Nota-se que o tempo de ciclo (15 UT) e a média entre os tempos dos postos de trabalho (13,33 UT) são os mesmos nas duas linhas. Apesar disso, a maior diferença em relação à média é de 3,33 UT na linha 1 (entre o posto 2 e a média) e de 1,67 UT na linha 2 (entre o posto 1 e a média). Isto é, a máxima diferença entre os tempos dos postos e a média é maior na linha 1 do que na linha 2, gerando um maior desequilíbrio na linha 1 e, em última instância, ainda que o Atraso de Balanceamento seja o mesmo, um maior Índice de Suavidade.

**Quadro 1 – Cálculos de Atraso de Balanceamento e Índice de Suavidade**

	<b>Linha 1</b>	<b>Linha 2</b>
<b>Atraso de balanceamento</b> $\frac{t_{total,m} - \sum t_{postos,m}}{t_{total,m}}$	$\frac{3.15 - (15 + 10 + 15)}{3.15} = 0,11$	$\frac{3.15 - (15 + 12,5 + 12,5)}{3.30} = 0,11$
<b>Índice de Suavidade</b> $\sqrt{\sum_{p=1}^{RE} (s_{max} - s_p)^2}$	$\sqrt{(15 - 10)^2} = 5 UT$	$\sqrt{(15 - 12,5)^2 + (15 - 12,5)^2} = 3,54 UT$



**Figura 8 – Comparação hipotética entre linhas com diferentes índices de suavidade**

#### 2.4 Balanceamento de linhas de montagem com operadores múltiplos

Na fabricação de produtos grandes, como ônibus, caminhões e automóveis, é possível a alocação de múltiplos operadores trabalhando simultaneamente em tarefas diferentes em um mesmo produto em dada estação de trabalho. Desta forma, uma mesma estação pode ser dividida em subestações. Cada operador recebe um dado conjunto de operações que ele deve realizar em posições específicas e deve-se garantir que um operador não interfira no trabalho dos outros operadores com os quais divide a estação (BECKER; SCHOLL, 2009).

Becker e Scholl (2009) endereçam um problema de balanceamento de linha de montagem com estações flexíveis, cuja denominação vem da sigla VWALBP, do inglês *Variable Workplaces Assembly Line Balancing Problem*. Becker e Scholl (2009) visam modelar da forma mais realista possível as linhas de produção de automóveis endereçadas. Algumas características principais são determinadas para que essa modelagem seja realizada:

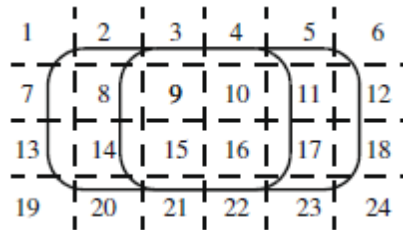
- Tempos das tarefas: determinísticos, sendo que alguns podem ultrapassar o tempo de ciclo (tarefas extra-longas);

- Restrições de alocação: algumas tarefas ou sequências de tarefas podem ser fixas às estações específicas devido a necessidades de infraestrutura. São determinados dois tipos de incompatibilidades: tarefas são ditas de incompatibilidade “S” se elas não podem ser alocadas na mesma estação de trabalho, devido a diferentes condições de montagem exigidas e, de incompatibilidade “W”, quando podem ser alocadas na mesma estação, mas não na mesma posição de trabalho;
- Indivisibilidade das tarefas: tarefas não podem ser divididas entre duas ou mais estações, exceto as tarefas extra-longas, as quais são realizadas ao longo de estações sucessivas, mas sempre na mesma posição de trabalho. Nesse caso, a tarefa é iniciada no início do ciclo e continua sendo realizada, sem interrupções até seu término enquanto o produto é movido pelas estações de trabalho. Tarefas extra-longas exigem a consideração do tempo de retorno do operador que pode ser significativo;
- Configuração de estação e equipamentos: conforme a segunda característica descrita, a infra-estrutura pode restringir a aplicação de algumas tarefas a estações de trabalho específicas. Além disso, cada estação de trabalho pode ser dividida em  $n$  posições de trabalho que funcionam como “subestações paralelas”. O número de posições varia de acordo com o produto e as condições de infra-estrutura da estação de trabalho e podem ser diferentes ao longo da linha de trabalho.

Os pares de tarefas com incompatibilidades dos tipos “S” e “W” são agrupadas em dois conjuntos específicos. As tarefas que devem ser realizadas em uma dada posição de trabalho são agrupadas em um conjunto específico também, e estes conjuntos são então distribuídos pelas estações de trabalho, observando-se o diagrama de precedência e os números máximos de posições de trabalho paralelas em cada estação (BECKER; SCHOLL, 2009).

Como todos os operadores alocados em uma mesma estação devem trabalhar simultaneamente em diferentes tarefas é de fundamental importância que eles não obstruam um ao outro. Isso é possível por meio da subdivisão da estação de trabalho nas supracitadas posições de trabalho (BECKER; SCHOLL, 2009).

A Figura 9 ilustra as diversas posições de trabalho na carroceria de um automóvel. Não se deve confundir, contudo, o conceito de subestações com posições de montagem. Cada subestação é representada por um operador, o qual pode atuar em mais de uma posição de montagem dentro de uma estação de trabalho.



**Figura 9 – Posições de trabalho em um automóvel**

Fonte: (BECKER; SCHOLL, 2009)

A situação ilustrada na Figura 9 trata de um caso clássico na indústria automotiva, onde a dianteira, a traseira, a lateral direita, a lateral esquerda, o interior, o teto e a parte inferior podem ser segmentados como subdivisões de uma estação de trabalho. Nesse caso, trabalhadores podem trabalhar em paralelo em várias subestações e até mesmo mudar de posto de trabalho durante o ciclo de produção. Uma consequência importante dessas características é que o tempo total de trabalho em uma estação não pode ser obtido pela simples soma dos tempos das operações individuais alocadas à estação, exigindo a solução de um problema de sequenciamento dentro de cada estação de trabalho (BOYSEN *et al.*, 2008).

As decisões que devem ser consideradas em linhas de montagem com múltiplos operadores trabalhando em uma mesma estação são duas, segundo Dimitriadis (2006):

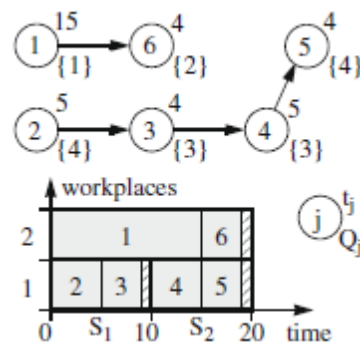
1. Quantos operadores devem ser alocados em cada estação sem exceder uma concentração máxima determinada, evitando que eles gerem problemas na realização das tarefas uns dos outros;
2. Quais grupos de tarefas devem ser alocados para cada operador de uma dada estação.

A concentração máxima deve ser determinada de acordo com alguns fatores importantes que variam para cada caso (DIMITRIADIS, 2006):

- O tamanho e a estrutura do produto produzido na linha;
- Quantidade suficiente de ferramentas para os trabalhadores de forma a minimizar o tempo de espera entre eles;
- O desenho (projeto) da estação de trabalho;
- Um padrão de fluxo de materiais que facilite a comunicação entre os operadores.

Em alguns casos o tempo de uma tarefa pode exceder o tempo de ciclo desejado. Tarefas com essa característica são denominadas “tarefas extra-longas” anteriormente citadas (BECKER; SCHOLL, 2009). Um exemplo desse tipo de tarefa na produção de veículos automotivos é a instalação de *CD Players*, a qual pode ser realizada por um operador que permanece no interior do veículo enquanto o mesmo passa por diversas estações de trabalho nas quais outras operações são realizadas paralelamente. (BOYSEN *et al.*, 2008)

A Figura 10 exemplifica uma tarefa extra-longa, a tarefa 1. Nesse caso o tempo para a realização da tarefa 1 é de 15 segundos e o tempo de ciclo é de 10 segundos, entretanto isso é possível devido à existência de duas subestações paralelas na mesma estação de trabalho. A tarefa 1 é realizada enquanto o produto é transformado nas estações “S1” e “S2” sem interrupções (BECKER; SCHOLL, 2009). Esse exemplo mostra que, de fato, o tempo de ciclo não pode ser obtido pela soma dos tempos das operações nelas alocadas.



**Figura 10 – Exemplo de tarefas extra-longas**

Fonte: (BECKER; SCHOLL, 2009)

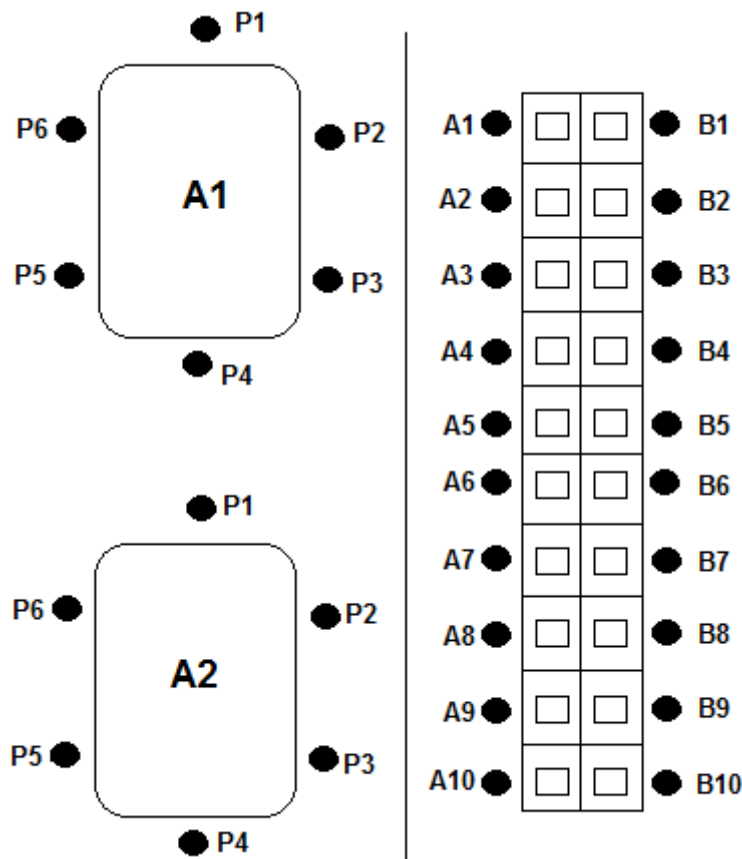
As vantagens da aplicação de linhas de montagem com múltiplos operadores em relação a linhas comuns são muitas. Dimitriadis (2006) destaca os seguintes pontos:

- Redução de comprimento da linha, utilizando menos estações de trabalho, mantendo a eficiência total da linha em termos de tempo ocioso e taxa de produção;
- Redução no tempo de ciclo e na quantidade de produtos em transformação ou semi-acabados;
- Redução no custo de movimentação de ferramentas, equipamentos e do próprio produto;
- Pode haver redução de custo na compra de ferramentas e equipamentos devido às possibilidades de compartilhamento desses entre os operadores de um mesmo posto de trabalho.

Dimitriadis (2006) ressalta a necessidade da diferenciação entre: (i) a utilização de operadores múltiplos em uma mesma estação; de (ii) da instalação de linhas produtivas paralelas (múltiplas). A Figura 11 exemplifica essa diferença:

- À esquerda tem-se uma linha de montagem com operadores múltiplos. Cada estação (A1 e A2) apresenta 6 posições de montagem (P1, P2, P3, até P6), cada posição com 1 operador. Todos trabalham ao mesmo tempo, atuando em tarefas diferentes em diferentes posições na mesma peça;
- À direita mostra-se uma linha de montagem com estações paralelas. Somente um operador atua em cada estação de trabalho (A1, A2, A3, até A10 e B1, B2, B3, até B10). Nas estações análogas (A1 e B1, A2 e B2, etc.) a mesma tarefa é desempenhada ao mesmo tempo por diferentes operadores em diferentes peças.





**Figura 11 – Comparação entre linhas com múltiplos operadores e linhas com estações paralelas**

A instalação de linhas paralelas é tipicamente utilizada quando o tempo de uma ou mais tarefas é maior do que o tempo de ciclo desejado (TUNCEL & TOPALOGLU, 2012). Esse tipo de estratégia apresenta algumas vantagens descritas por Tuncel e Topaloglu (2012, *apud* BUKCHIN; RUBINOVITZ, 2003):

1. Maior taxa de produção devido ao aumento da capacidade máxima;
2. Aumento da eficiência do balanceamento da linha devido aos menores tempos ociosos, visto que as tarefas podem ser alocadas em cada estágio de produção com menores folgas de tempo;
3. Manutenção de maior taxa de utilização dos tempos dos operadores devido aos menores tempos de ociosidade;
4. Aumento da confiabilidade da linha em relação às paradas e falhas, visto que o trabalho pode continuar a ser realizado nas demais linhas paralelas.

A principal desvantagem citada por Tuncel e Topaloglu (2012, *apud* BUKCHIN; RUBINOVITZ, 2003) é o alto custo de capital para a paralelização de linhas, devido à necessidade de investimento multiplicado pela quantidade de linhas paralelas em equipamentos e ferramentas. Devido a isso, busca-se evitar a paralelização de linhas, sempre que possível. Neste ponto, ressalta-se a importância da eficiência no projeto e na operação de linhas simples (não-paralelas) como um fator fundamental para que se evite a paralelização de linhas de montagem.

Battaia e Dolgui (2013) realizam uma revisão geral da literatura existente sobre a aplicação de problemas de balanceamento em linhas de montagem, usinagem e desmontagem. Os autores descrevem as diferentes utilizações: linhas de modelo único e multi-modelo; linhas retas simples, linhas com estações múltiplas, linhas em formato “U”, linhas circulares e linhas assimétricas; tarefas com tempos constantes, com tempos dinâmicos; com tempos incertos, entre outras derivações; estações de trabalho com operadores múltiplos, com equipamentos específicos e com *buffers* associados. Além disso, diferentes tipos de funções objetivo e restrições são explorados por Battaia e Dolgui (2013). Em particular, no presente trabalho será endereçado o problema de estações com operadores múltiplos, com ou sem a aplicação de Tarefas Comuns (ver Seção 2.5), e Operações Automáticas (ver Seção 2.6).

## **2.5 Balanceamento de linhas de montagem com Tarefas Comuns**

Da mesma forma com que se diferenciaram linhas de montagem com operadores múltiplos de linhas com estações paralelas, deve-se diferenciar a aplicação de postos de trabalho com múltiplos operadores, de aplicações nas quais uma única tarefa exige o trabalho conjunto ou cooperativo de mais de um trabalhador (DIMITRIADIS, 2006). Um exemplo da utilização compulsória de múltiplos operadores em uma mesma estação de trabalho é na montagem de cabines de ônibus. Os bancos são peças grandes e pesadas e precisam ser movimentadas e posicionadas por duas pessoas, enquanto outra completa sua fixação com furações, soldagens e outras operações. Essas tarefas que exigem mais de um operador trabalhando simultaneamente são definidas como “Tarefas Comuns” (YAZGAN *et al.*, 2011).

Yazgan *et al.* (2011) endereça um problema de balanceamento de linha de montagem com Tarefas Comuns e com as seguintes características:

- O produto deve ser movimentado da primeira até a última estação e as tarefas necessárias são realizadas simultaneamente pelos operadores em um dado tempo de ciclo;
- Trabalhadores não devem bloquear um ao outro na execução das operações;
- O processo de montagem continua sem interrupção de acordo com o diagrama de precedência entre as tarefas. No entanto, o atraso de uma operação pode afetar a realização de outra. Tempo ocioso entre tarefas pode ser inevitável.

Para a solução do problema algumas decisões devem ser tomadas (YAZGAN *et al.*, 2011):

- Sem exceder o máximo número permissível de operadores em um posto de trabalho, deve-se determinar quantos operadores devem ser alocados em cada posto de trabalho sem que eles obstruam uns aos outros;
- Para as tarefas realizadas por uma única pessoa deve-se determinar quais operadores as realizam;
- De forma similar, para as tarefas realizadas simultaneamente por mais de um operador, Tarefas Comuns, deve-se determinar quais grupos de operadores as realizam;
- Deve-se determinar em quais estações de trabalho as Tarefas Comuns devem ser realizadas.

A aplicação estudada por Yazgan *et al.* (2011) consiste em uma linha de montagem de ônibus de pequeno porte composta por 17 estações de trabalho e 53 tarefas. A Tabela 2 a seguir exemplifica tarefas realizadas em algumas estações de trabalho. O tempo de ciclo é determinado pela estação que tem o tempo de processo mais longo. Esse valor é dado pelo mais longo tempo de processamento de um trabalhador. Também na Tabela 2 são exemplificados os tempos de execução

de cada tarefa, o número de trabalhadores necessário para a realização de cada tarefa e as tarefas precedentes.

**Tabela 2 – Postos e Tarefas em linha de montagem com Tarefas Comuns**

Número estação	Número tarefa	Descrição da tarefa	Tempo execução (min)	Número de operadores necessários	Precedência de tarefas
1	1	Colocação do piso de madeira	144,3	3	-
	2	Colocação de linóleo	71,7	3	1
2	3	Preparação preliminar do veículo	71,9	2	-
	4	Colocação dos equipamentos elétricos principais	45,7	1	-
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
10	24	Montagem do excêntrico	59	2	17, 23
	25	Aplicação de silicone no excêntrico	70,5	2	24
	26	Acabamento da montagem lateral	257,3	4	25, 23, 20
11	27	Montagem da bateria	31,7	1	19, 17, 14
	28	Montagem do puxador de emergência	26,6	1	25, 23
	29	Montagem das lâmpadas de leitura	104,7	2	26, 23, 20
	30	Montagem do torpedo	126,5	2	26, 17, 16, 15, 14, 10
12	31	Montagem das conexões elétricas do torpedo	33,9	1	26, 17, 16, 15, 14, 10
	32	Ferramentas de instalação para a central de controle eletrônico	67,7	2	22, 18, 17
	33	Instalação do sistema de aquecimento	59,1	2	32
	34	Montagem de acabamentos	77,2	2	25, 22, 14
	35	Montagem das cortinas	26,2	1	29, 28, 26
	36	Montagem de botões	16,7	1	32
13	37	Montagem dos suportes do banco do motorista	21,6	1	30, 26
	38	Montagem da logo	27,7	1	26
	39	Montagem das conexões elétricas	42,4	1	31, 29, 26, 30
	40	Montagem da capa	111,4	2	19, 18, 32, 22
	41	Montagem da válvula do freio de mão	9,7	1	30
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
	47	Montagem da fiação lateral	69,6	2	40, 36, 33, 27, 22, 3
16	48	Montagem dos bancos	78,8	2	46, 39, 37, 35, 31, 29, 26
	49	Montagem de pneus e estepe	53,3	2	43, 40
	50	Instalação dos degraus de entrada/saída	11	1	1, 2, 5, 12, 14
17	51	Montagem do painel de controle das portas	94,1	2	39, 1, 2, 5, 14
	52	Controle do ABS	15,5	1	43, 42
	53	Limpeza do interior	4,7	1	52, 51, 50, 38, 48, 45, 49, 47

**Fonte: (Adaptado de YAZGAN et al., 2011)**

A alocação inicial de operadores na linha e os tempos ociosos por posto de trabalho são dados na Tabela 3. O número total de trabalhadores em cada estação foi dado pela soma dos trabalhadores necessários para a realização de cada tarefa a ela relacionada, exceto nas estações 10, 12, 13 e 17, nas quais alguns operadores realizam mais de uma tarefa. Na estação 10, por exemplo, dois operadores realizam

“Montagem do excêntrico” e “Aplicação de silicone no excêntrico”, ou seja, o número total de operadores na estação é dois, e não quatro.

**Tabela 3 – Alocação inicial de operadores**

Número da estação	Número de operadores	Tempo ocioso (min)
1	3	50,7
2	6	200,7
3	6	115,4
4	6	103,1
5	3	21,8
6	8	111,1
7	5	79,2
8	4	49,5
9	4	88,3
10	2	0,5
11	6	74,4
12	7	63,1
13	8	187,1
14	4	60,8
15	3	29,9
16	6	188,3
17	4	134,7
<b>Total</b>	<b>85</b>	<b>1558,6</b>

Fonte: (YAZGAN *et al.*, 2011)

O tempo de ciclo foi calculado em 65 minutos. Considerou-se uma jornada de trabalho de 10 horas diárias por trabalhador com 80 minutos de intervalo. Assim, foi possível verificar que a produtividade da linha é de 72%; e, que o número total de trabalhadores é 85 (YAZGAN *et al.*, 2011).

Para a resolução do problema duas considerações foram realizadas (YAZGAN *et al.*, 2011):

- O número máximo de operadores por estação foi fixado em cinco;
- O tempo ocioso permissível foi fixado em 15 minutos.

A Tabela 4 mostra a nova distribuição proposta pelo modelo de Yazgan *et al.* (2011). Em comparação à Tabela 3, a solução obtida sugere 21 estações de trabalho, mas com menor número de trabalhadores no total, 75, e menor tempo ocioso total, 908,60 minutos. A Tabela 5 compara as características da linha no modelo inicial e no gerado pelo algoritmo proposto. Além dos já citados dados de tempo ocioso total e de número de trabalhadores, inclui-se também a produtividade da linha, a qual cresceu de 72% para 81,36% (YAZGAN *et al.*, 2011).

**Tabela 4 – Alocação de operadores proposta**

Número da estação	Número de operadores	Tempo ocioso (min)
1	3	50,7
2	5	50,9
3	3	66,9
4	4	39,3
5	5	72,1
6	2	44,2
7	1	16,8
8	5	10,8
9	4	42,0
10	2	35,3
11	3	40,9
12	2	34,8
13	2	44,1
14	3	36,6
15	5	67,3
16	5	41,1
17	5	32,2
18	5	48,2
19	5	61,8
20	4	26,1
21	2	46,5
<b>Total</b>	<b>75</b>	<b>908,6</b>

Fonte: (YAZGAN *et al.*, 2011)

**Tabela 5 – Comparação dos resultados das alocações inicial e proposta**

Critério de desempenho	Linha inicial	Solução proposta
Tempo ocioso total	1558,6 minutos	908,6 minutos
Número total de trabalhadores	85	75
Produtividade da linha	72%	81,36%

Fonte: (YAZGAN *et al.*, 2011)

O método utilizado por Yazgan *et al.* (2011) é um procedimento heurístico e não é apresentada demonstração de otimalidade do procedimento. Por isso, no desenvolvimento do artigo, os autores repetiram a avaliação do método proposto para diferentes valores de tempo de ciclo, máximo número de operadores por posto de trabalho e tempo ocioso permissível por operador, buscando evidenciar diferentes condições de operação. O resultado sumarizado na Tabela 5 foi o que gerou mais eficiência na linha. Detalhes adicionais podem ser obtidos no artigo original.

Contudo, ressalta-se no artigo de Yazgan *et al.* (2011) uma sentença em relação à relativa escassez de referências sobre o problema de balanceamento de linhas de montagem com Tarefas Comuns: *“De acordo com nosso limitado conhecimento, o algoritmo proposto no manuscrito é a primeira iniciativa a considerar a proposição de operadores múltiplos que trabalharam simultaneamente*

em uma mesma tarefa (*Tarefa Comum*).” Assim, trabalhos que evidenciem/modelem questões relativas a “Tarefas Comuns” são relevantes ao estado da arte sobre balanceamento de linhas.

## 2.6 Balanceamento de linhas de montagem com Operações Automáticas

Segundo Levitin *et al.* (2006 apud Owen, 1985), o advento da utilização de robôs e outras formas de automatização nas linhas de montagem tem origem na crescente demanda por maior variação de produtos e conseqüente necessidade de se estabelecer linhas de produção mais flexíveis.

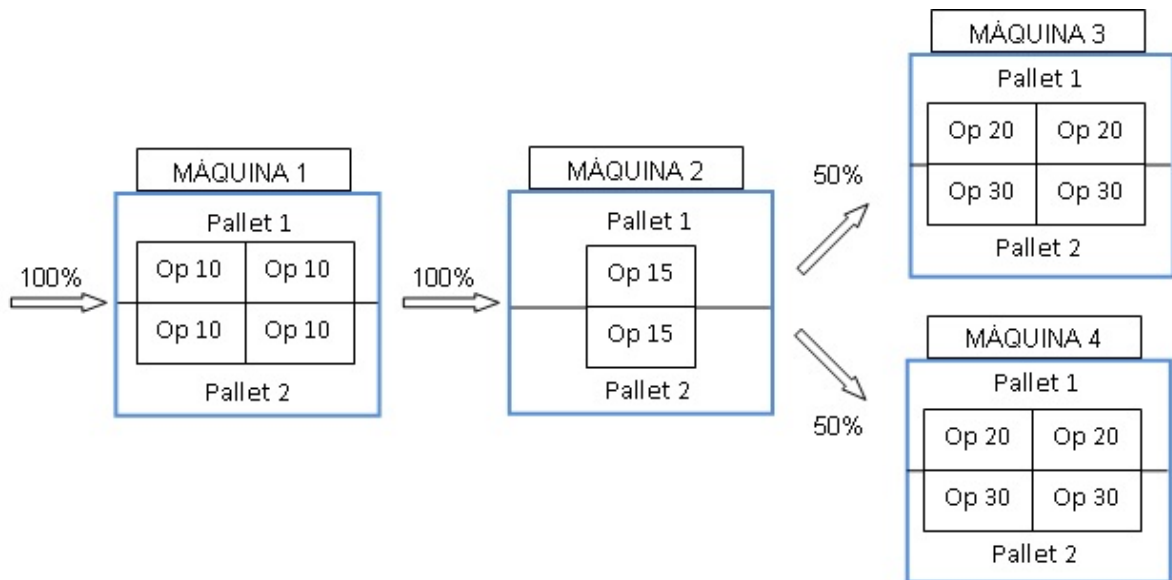
Foi sugerido por Graves e Holmes (1988) um algoritmo para a alocação de tarefas e equipamentos em uma linha de montagem que satisfizesse uma capacidade de produção anual desejada, reduzindo-se custos de *set-up*, ferramental e equipamentos. Não havia no modelo sugerido por eles, no entanto, uma solução que levasse em conta a minimização do tempo ocioso na linha, o que é de extrema importância no balanceamento de linhas de montagem robotizadas, conforme Levitin *et al.* (2006 apud Graves e Holmes, 1988).

Bukchin e Rubinovitz (1991) foram os primeiros a formular o problema de balanceamento de linhas de montagem robóticas, ou RALB, do inglês *Robotic Assembly Line Balancing*. Essa formulação se difere do problema de balanceamento de linhas de montagem que utilizam operadores humanos pelos seguintes aspectos, conforme Levitin *et al.* (2006 apud Bukchin e Rubinovitz, 1991):

- A duração de uma tarefa depende de qual robô é designado para cumpri-la, de acordo com as especializações do modelo de robô utilizado;
- A movimentação, carregamento e descarregamento de materiais, além dos tempos de *set-up* e trocas de ferramenta são desprezados ou inclusos nos tempos das tarefas. Isso é possível, pois são consideradas apenas linhas que produzem um único produto;
- Todos os robôs estão disponíveis sem limitações. O custo de compra dos robôs não é considerado.

Um exemplo de balanceamento de uma linha totalmente automatizada é endereçado por Mibach e Campos (2013), os quais desenvolveram uma análise em Programação Linear Inteira Mista para encontrar uma solução ótima de balanceamento para uma linha de usinagem em uma empresa de autopeças. Trata-se de uma aplicação bastante diferente do que é usualmente encontrado na literatura, com foco em linhas de montagem.

A linha avaliada por Mibach e Campos (2013) consiste de quatro centros de usinagem, os quais apresentam flexibilidade na alocação das operações, e que foram dispostos conforme a Figura 12 abaixo, com 100% das peças sendo usinadas nas Máquinas 1 e 2, e o com o fluxo de saída da Máquina 2 sendo dividido igualmente entre as máquinas 3 e 4.



**Figura 12 – Disposição dos Centros de Usinagem**

Fonte: (MIBACH; CAMPOS, 2013)

Os autores realizaram a coleta de valores práticos dos tempos de processamento das tarefas nas máquinas em que eram usualmente realizadas. Para as tarefas que podiam ser realocadas para outras máquinas, foram estimados os tempos de processamento nestas máquinas por meio de um procedimento de cálculo teórico. A redistribuição destas tarefas ao longo da linha, desde que seguindo o diagrama de precedência e as restrições específicas de cada máquina, possibilitou a indicação de ganhos operacionais significativos, da ordem de 10% (MIBACH E CAMPOS, 2013)



No trabalho desenvolvido por Mibach e Campos (2013) foi abordado, basicamente, um problema do tipo SALBP-2<sup>1</sup>. Segundo os autores as operações a serem balanceadas eram as Operações Automáticas. Não foi considerada a influência da ação humana nos tempos de ciclo. Em um contexto produtivo similar, uma complexidade adicional é a consideração da influência dos operadores (tempos manuais) no balanceamento de linhas que também possuam operações automatizadas. Ou seja, Operações Automáticas e manuais coexistindo na mesma linha de montagem e ambas influenciando diretamente a obtenção do tempo de ciclo.

## 2.7 Modelagem Matemática

Com o aumento da velocidade de processamento e quantidade de memória dos computadores, houve um grande progresso na Pesquisa Operacional. Este progresso é devido também à larga utilização de microcomputadores, que se tornaram unidades isoladas dentro de empresas. Isso faz com que os modelos desenvolvidos pelos profissionais de Pesquisa Operacional sejam mais rápidos e versáteis, além de serem também iterativos, possibilitando a participação do usuário ao longo do processo de cálculo (LISBOA, 2002).

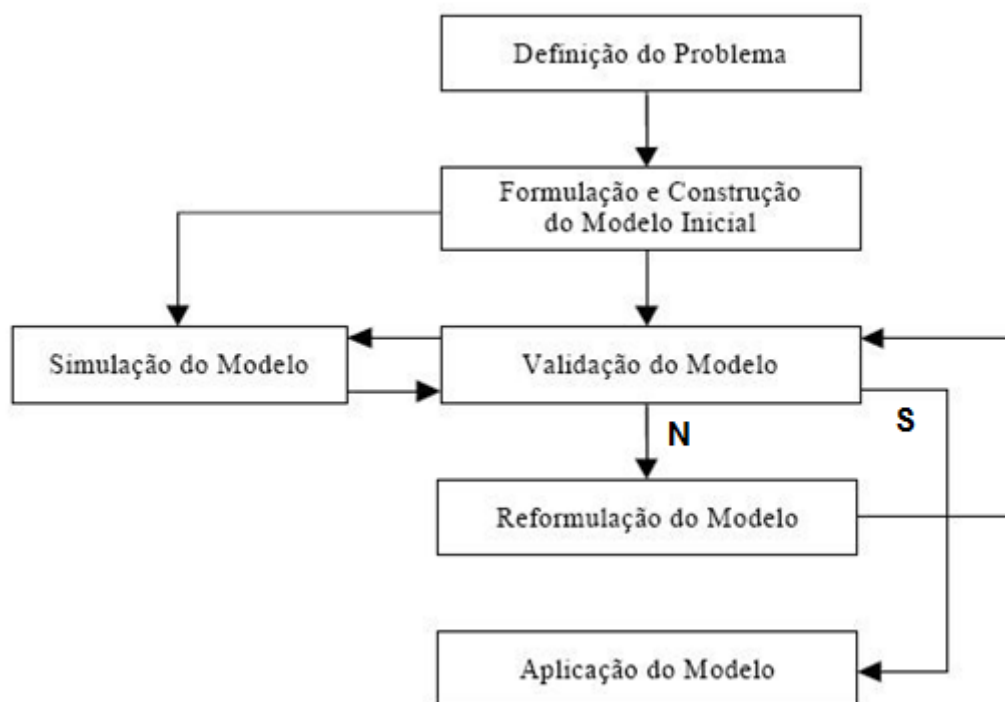
A diminuição de custos de produção e a melhoria em produtos e serviços são objetivos comuns a diversos setores industriais. Contudo, o processo de tomada de decisões operacionais ainda é conduzido pelo emprego de critérios experimentais. A complexidade do planejamento (*planning*) e programação (*scheduling*) da produção é frequentemente contornada, na prática, pela adoção de políticas operacionais conservativas, que não utilizam a capacidade máxima de operação do sistema produtivo (MAGATÃO, 2001).

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

---

<sup>1</sup> Problema no qual o número de estações de trabalho é dado e busca-se minimizar o tempo de ciclo

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, 2001). Uma metodologia que pode ser utilizada para a elaboração de uma abordagem de otimização é ilustrada na Figura 13:



**Figura 13 – Fluxograma básico do processo de modelagem**

Fonte: (Adaptado de GOLDBARG; LUNA, 2000)

A definição do problema, o primeiro passo, é caracterizada por três aspectos principais (MAGATÃO, 2009):

- i. Descrição exata dos objetivos de estudo;
- ii. Identificação das alternativas de decisão existentes;
- iii. Reconhecimento das limitações, restrições e exigências do sistema.

A concepção do modelo é influenciada diretamente pela descrição dos objetivos. O processo final de validação das soluções obtidas faz uso das

alternativas de decisão explicitadas nesta primeira fase do projeto, bem como das limitações, restrições e exigências citados.

A fase seguinte, de formulação e construção do modelo inicial, requer certa experiência do projetista. Como cita Magatão (2009) “o rigor da tradução matemático-simbólica do modelo é obtido através de processos que envolvem o poder de síntese e a experiência”. Nesta fase são definidas as variáveis utilizadas e as restrições empregadas. A escolha de um modelo apropriado contribui para melhora da qualidade da solução.

As fases de simulação da solução, reformulação e validação servem para verificação das soluções obtidas. A utilização de modelos matemáticos para obtenção destas soluções requer a escolha de um algoritmo apropriado, levando-se em conta aspectos de precisão desejada e tempo de processamento necessário, exigindo conhecimento das principais técnicas existentes. O processo de validação do modelo ou verificação da sua representatividade é uma etapa indispensável em qualquer procedimento científico ou industrial (GOLDBARG e LUNA, 2000). Um modelo é válido se, levando-se em conta sua inexatidão em representar o sistema, ele for capaz de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema (MAGATÃO, 2009).

A aplicação do modelo ao final da validação da solução é uma das etapas críticas do estudo, pois altera uma situação existente. Mesmo com uma solução validada sendo aplicada, devido à complexidade da situação real, é possível que ainda sejam necessários ajustes no modelo, através de uma reformulação (MAGATÃO, 2009).

## **2.8 Conclusões preliminares do capítulo**

No Capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica no contexto de balanceamento de linhas produtivas, objeto de estudo do presente trabalho. Foram definidos conceitos de sistemas de produção, em especial linhas de produção de modelo misto e suas derivações.

Notou-se que existe uma grande variedade de formas de se distribuir os operadores ao longo dos postos de trabalho de uma linha: apenas um operador é admitido em cada estação; vários operadores atuam paralelamente em uma mesma

estação e produto, mas realizam diferentes tarefas; uma única tarefa é executada por mais de um operador simultaneamente na mesma peça; e tarefas automáticas que são executadas sem a presença ininterrupta de qualquer operador.

Dois casos em especial foram enfatizados no escopo do capítulo, por se tratarem de problemas práticos presentes nos objetivos centrais do trabalho: estações de trabalho com Tarefas Comuns (Seção 2.5) e estações de trabalho com Operações Automáticas (Seção 2.6). No Capítulo 3 a seguir detalha-se o problema real a ser balanceado e a abordagem matemática criada para este fim.

## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Problema Real a ser Abordado

#### 3.1.1 Introdução

O objeto de estudo do presente projeto será a linha de montagem de cabines de caminhões semipesados da empresa VOLVO DO BRASIL, com base no estudo realizado por Marcilio e Skraba (2010). Essa linha foi escolhida devido à possibilidade de se aplicar as condições especiais de Operações Automáticas e de Tarefas Comuns, não contempladas pelos autores, mas presentes na linha.

O modelo utilizado por Marcilio e Skraba (2010) foi desenvolvido através do *software* GUSEK (*GLPK Under Scite Extended Kit*), GUSEK (2013), o qual é voltado para o desenvolvimento de modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). No presente trabalho o modelo anteriormente proposto foi reformulado, aprimorado e uma nova implementação foi realizada no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*, o qual é um ambiente para a modelagem e otimização de modelos PLIM que possui inúmeras funcionalidades e desempenho computacional de estado da arte (IBM-CPLEX, 2013).

#### 3.1.2 Características da linha estudada

Na linha em questão são produzidos dois modelos diferentes de produto, as cabines L2H1 e L1H1, o que a caracteriza como uma linha de montagem de modelo misto. Para a fabricação desses produtos são realizadas, no total, 150 operações. Para simplificar o estudo e se manter a aderência do modelo às reais condições de operação da linha essas 150 operações foram agrupadas em 70 blocos de execução. Cada bloco é constituído por um número variável de operações que foram 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). No presente trabalho esses blocos serão denominados simplificadaamente como tarefas.

A linha de estudo é dividida em catorze diferentes postos de trabalho. A Tabela 6 abaixo ilustra a alocação original das tarefas nos postos, seus respectivos tempos de execução para cada modelo e o tempo de execução equivalente. Este valor de

tempo equivalente foi calculado conforme a Equação (8), a partir da informação de que a taxa de ocupação da linha é de 85% pelo o modelo L2H1 e 15% pelo modelo L1H1 (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$\text{Tempo equivalente} = \text{tempoL2H1} * 0,85 + \text{tempoL1H1} * 0,15 \quad \text{Equação(8)}$$

**Tabela 6 – Alocação original das tarefas e seus respectivos tempos de operação**

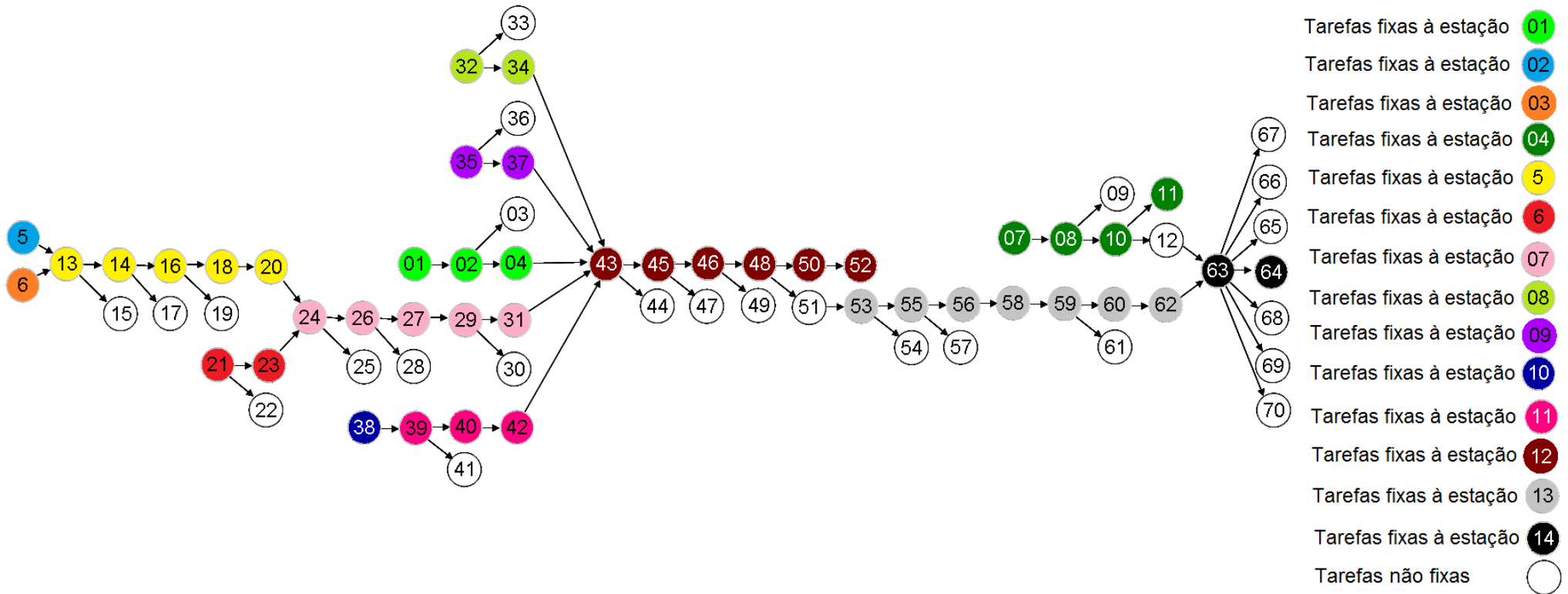
Estação de trabalho	Tarefa	Tempo de operação L2H1 (UT)	Tempo de operação L1H1 (UT)	Tempo de operação equivalente (UT)
<b>Estação 1 – Front Roof</b>	1	27,00	27,00	27,00
	2	7,00	7,00	7,00
	3	11,00	11,00	11,00
	4	2,50	2,50	2,50
<b>Estação 2 – Longarina esquerda</b>	5	68,50	68,50	68,50
<b>Estação 3 – Longarina direita</b>	6	68,60	68,60	68,60
<b>Estação 4 – Teto e Extensão</b>	7	3,50	0,00	2,98
	8	12,00	0,00	10,20
	9	12,00	0,00	10,20
	10	21,00	15,20	20,13
	11	25,00	25,00	25,00
	12	21,00	21,00	21,00
<b>Estação 5 – Assoalhos Esquerdo e Direito</b>	13	37,30	37,30	37,30
	14	24,00	18,00	23,10
	15	26,00	20,00	25,10
	16	21,00	15,50	20,18
	17	10,00	5,00	9,25
	18	16,00	16,00	16,00
	19	5,00	5,00	5,00
	20	24,90	24,90	24,90
<b>Estação 6 – Assoalhos central e frontal</b>	21	127,50	94,80	122,60
	22	21,30	21,30	21,30
	23	8,00	8,00	8,00
<b>Estação 7 – Junção dos assoalhos e Frontais</b>	24	98,80	91,10	97,65
	25	9,00	9,00	9,00
	26	2,60	2,60	2,60
	27	19,00	19,00	19,00
	28	22,00	22,00	22,00
	29	4,20	4,20	4,20
	30	2,80	2,80	2,80
	31	6,00	6,00	6,00
<b>Estação 8 – Lateral Esquerda</b>	32	156,50	139,10	153,89
	33	30,20	24,90	29,41
	34	13,30	13,30	13,30
<b>Estação 9 – Lateral Direita</b>	35	156,50	139,10	153,89
	36	30,20	24,90	29,41
	37	13,30	13,30	13,30
<b>Estação 10 – Pré-painel Traseiro</b>	38	62,20	62,20	62,20
	39	52,40	52,40	52,40
<b>Estação 11 – Painel Traseiro</b>	40	34,00	34,00	34,00
	41	28,00	28,00	28,00
	42	26,20	26,20	26,20
	43	8,80	8,80	8,80

**Tabela 6 – Alocação original das tarefas e seus respectivos tempos de operação (continuação)**

<b>Estação de trabalho</b>	<b>Tarefa</b>	<b>Tempo de operação L2H1 (UT)</b>	<b>Tempo de operação L1H1 (UT)</b>	<b>Tempo de operação equivalente (UT)</b>
<b>Estação 12 – Geometria</b>	44	11,30	11,30	11,30
	45	100,80	100,80	100,80
	46	10,00	10,00	10,00
	47	7,00	7,00	7,00
	48	14,00	14,00	14,00
	49	11,00	11,00	11,00
	50	9,00	9,00	9,00
	51	29,80	29,80	29,80
	52	9,70	9,70	9,70
	<b>Estação 13 – Respot</b>	53	18,00	13,90
54		2,00	2,00	2,00
55		7,50	7,50	7,50
56		18,00	18,00	18,00
57		2,00	2,00	2,00
58		10,50	10,50	10,50
59		1,70	1,70	1,70
60		4,00	4,00	4,00
61		4,00	4,00	4,00
62		11,70	11,70	11,70
<b>Estação 14 – Solda Manual</b>	63	11,20	11,20	11,20
	64	109,00	109,00	109,00
	65	10,00	5,00	9,25
	66	16,00	8,00	14,80
	67	23,00	23,00	23,00
	68	40,50	40,50	40,50
	69	9,20	9,20	9,20
	70	4,80	4,80	4,80

**Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)**

Das 70 tarefas existentes na linha estudada, 44 foram consideradas fixas a alguma estação de trabalho devido a restrições práticas. A Figura 14 a seguir ilustra o diagrama de precedência da linha, destacando as tarefas fixas e as estações às quais elas são alocadas. Devido à semelhança entre os dois modelos de produto fabricados, o diagrama de precedências equivalente é igual aos diagramas de precedência de cada modelo (MARCILIO; SKRABA, 2010).



**Figura 14 – Diagrama de Precedência Original**  
 Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)



Para a realização das tarefas nos catorze postos a linha estudada conta com nove operadores. Tendo em vista que o número de postos de trabalho é maior do que o número de operadores torna-se imprescindível que alguns operadores atuem em mais de um posto de trabalho para que todas as tarefas sejam realizadas (MARCILIO; SKRABA, 2010). A Tabela 7 mostra a alocação original dos operadores em relação aos postos de trabalho para o modelo L2H1 e a Tabela 8 mostra a alocação original dos operadores em relação aos postos de trabalho para o modelo L1H1. A observação da Tabela 7 e da Tabela 8 indica que, por exemplo, a realização das tarefas 7 a 12 é dividida entre os operadores 1 e 3. Na Tabela 7, evidencia-se que as tarefas 7 a 12 são realizadas na estação de trabalho 4. Ou seja, a alocação original das tarefas indica que o posto de trabalho pode ser compartilhado por mais de um operador.

**Tabela 7 – Alocação original dos operadores em relação aos Postos de Trabalho para o Modelo L2H1**

Operador	Postos	Tarefas	Tempo de Operação (UT)	Tempo de deslocamento (UT)	Tempo Total (UT)
1	1, 2, 3 e 4	1 a 6; ½ (7 a 12)	231,90	1,50	233,40
2	5	13 a 20	164,20	0,00	164,20
3	4, 6	½ (7 a 12); 21 a 23	204,10	4,05	208,15
4	7	24 a 31	164,40	0,00	164,40
5	8, 13	32, 33, 34; ½ (53 a 62)	239,70	1,05	240,75
6	9, 13	35, 36, 37; ½ (53 a 62)	239,70	2,25	241,95
7	10, 11	38 a 42	202,80	0,30	203,10
8	12	43 a 52	211,40	0,00	211,40
9	14	63 a 70	223,70	0,00	223,70

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

**Tabela 8 – Alocação original dos operadores em relação aos Postos de Trabalho para o Modelo L1H1**

Operador	Postos	Tarefas	Tempo de Operação (UT)	Tempo de deslocamento (UT)	Tempo Total (UT)
1	1, 2, 3 e 4	1 a 6; ½ (7 a 12)	215,20	1,95	217,15
2	5	13 a 20	141,70	0,00	141,70
3	4, 6	½ (7 a 12); 21 a 23	154,70	4,05	158,75
4	7	24 a 31	156,70	0,00	156,70
5	8, 13	32, 33, 34; ½ (53 a 62)	214,95	1,05	216,00
6	9, 13	35, 36, 37; ½ (53 a 62)	214,95	2,25	217,20
7	10, 11	38 a 42	202,80	0,30	203,10
8	12	43 a 52	211,40	0,00	211,40
9	14	63 a 70	210,70	0,00	210,70

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

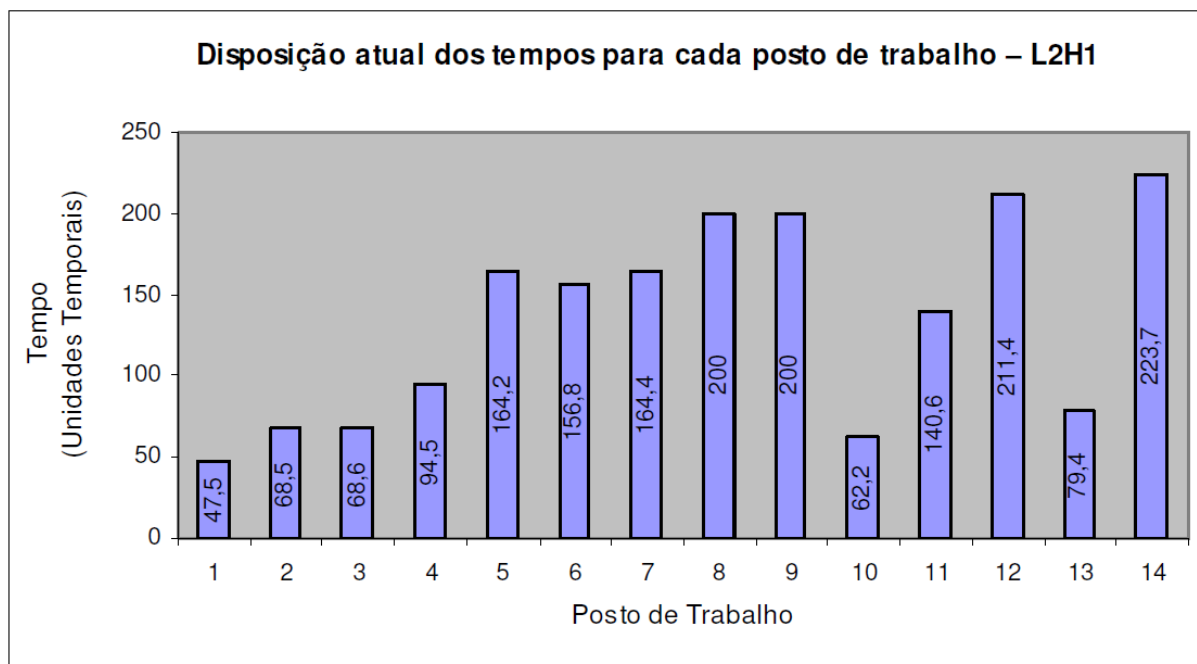
Para aproximar o modelo da realidade foram determinados os tempos médios de deslocamento dos operadores entre as estações. Estes tempos devem ser levados em conta na carga de trabalho do operador quando este atuar em mais do que uma estação (MARCILIO; SKRABA, 2010). A Tabela 9 expõe os tempos de deslocamento considerados entre os postos de trabalho. Ressalta-se que se trata de uma matriz simétrica, isto é, os tempos são iguais nos dois sentidos de deslocamento entre duas estações.

**Tabela 9 – Tempos de deslocamentos entre os postos de trabalho**

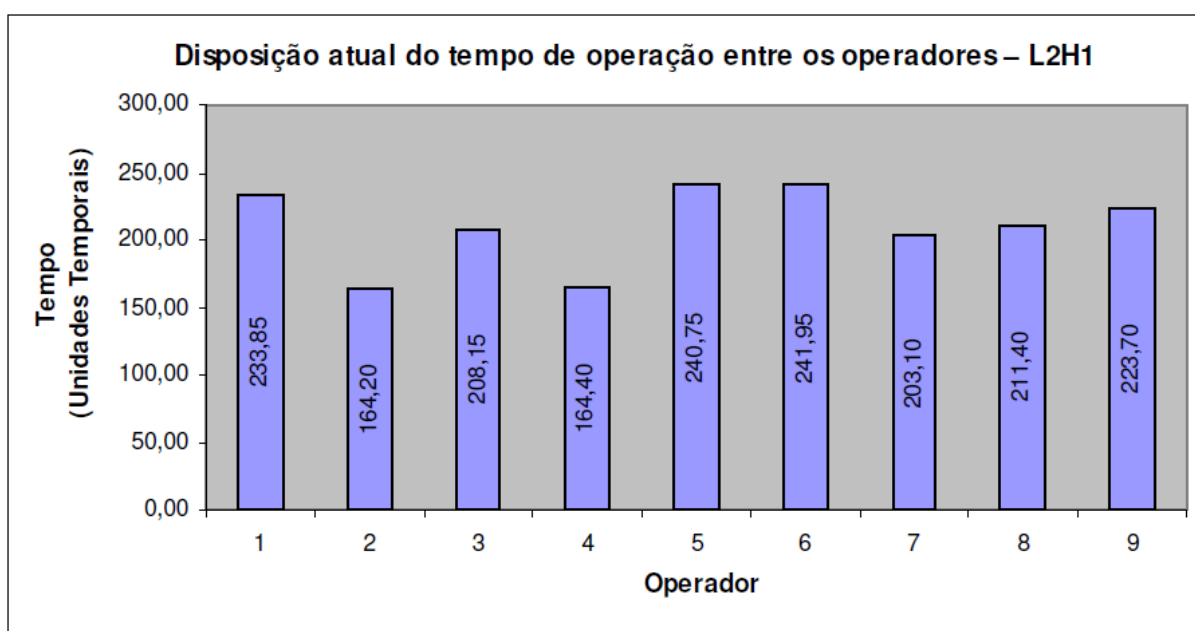
		Posto de Trabalho de Origem													
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
Posto de Trabalho de Destino	P1		0,30	0,30	1,76	2,55	4,80	3,60	1,88	4,58	4,05	3,60	3,15	3,00	3,15
	P2	0,30		0,00	1,65	2,55	4,35	3,30	1,58	4,20	3,75	3,30	2,85	2,70	2,85
	P3	0,30	0,00		1,65	2,55	4,35	3,30	1,58	4,20	3,75	3,30	2,85	2,70	2,85
	P4	1,76	1,65	1,65		2,85	4,05	3,75	1,13	4,65	2,70	2,40	2,25	1,95	1,20
	P5	2,55	2,55	2,55	2,85		4,05	1,13	1,50	1,95	1,95	2,85	1,35	2,10	4,35
	P6	4,80	4,35	4,35	4,05	4,05		3,00	2,70	2,33	1,20	1,05	1,58	1,20	3,90
	P7	3,60	3,30	3,30	3,75	1,13	3,00		2,25	0,75	1,50	1,65	0,45	3,00	4,95
	P8	1,88	1,58	1,58	1,13	1,50	2,70	2,25		3,15	2,03	1,58	1,13	1,05	2,70
	P9	4,58	4,20	4,20	4,65	1,95	2,33	0,75	3,15		1,35	1,65	1,13	2,25	6,00
	P10	4,05	3,75	3,75	2,70	1,95	1,20	1,50	2,03	1,35		0,30	0,75	0,75	4,35
	P11	3,60	3,30	3,30	2,40	2,85	1,05	1,65	1,58	1,65	0,30		0,75	0,75	4,35
	P12	3,15	2,85	2,85	2,25	1,35	1,58	0,45	1,13	1,13	0,75	0,75		0,60	3,75
	P13	3,00	2,70	2,70	1,95	2,10	1,20	3,00	1,05	2,25	0,75	0,75	0,60		3,60
	P14	3,15	2,85	2,85	1,20	4,35	3,90	4,95	2,70	6,00	4,35	4,35	3,75	3,60	

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

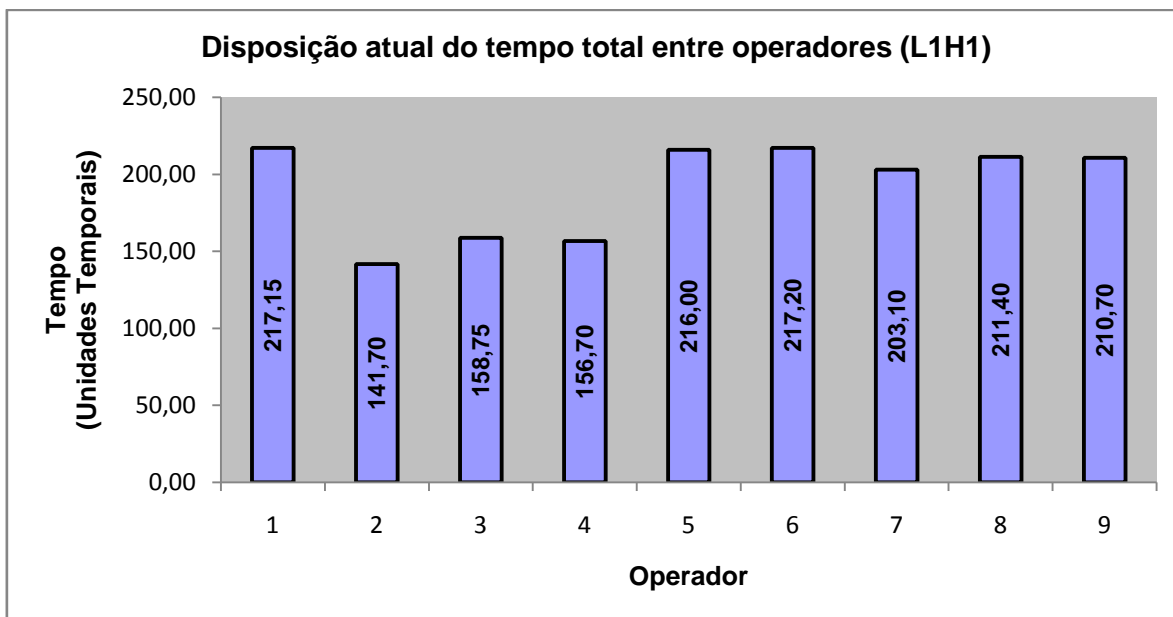
A Figura 15 mostra a Ocupação dos Postos de Trabalho para o Modelo L2H1. A Figura 16 e a Figura 17 mostram a Ocupação dos Operadores para, respectivamente, o Modelo L2H1 e o Modelo L1H1.



**Figura 15 – Ocupação de Postos de Trabalho para Modelo L2H1**  
 Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)



**Figura 16 – Ocupação de Operadores para o Modelo L2H1**  
 Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)



**Figura 17 – Ocupação de operadores para o Modelo L1H1**

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

A Tabela 10 mostra os indicadores de balanceamento referentes ao modelo L2H1 e a Tabela 11 mostra os indicadores referentes ao modelo L1H1. Nestas tabelas são relacionadas as equações utilizadas para obtenção dos indicadores.

**Tabela 10 – Indicadores originais da linha de montagem para o Modelo L2H1**

Indicador	Equação (nº)	Valor	Unidade
Tempo de ciclo teórico ( <i>tt</i> )	Equação (1)	405,6	UT
Número mínimo de postos ( <i>ME</i> )	Equação (2)	5	-
Utilização (%)	Equação (3)	35,7	%
Eficiência (%)	Equação (4)	33,1	%
Ociosidade	Equação (5)	3796,6	UT
Atraso de balanceamento (%)	Equação (6)	66,4	%
Índice de suavidade	Equação (7)	403,11	UT

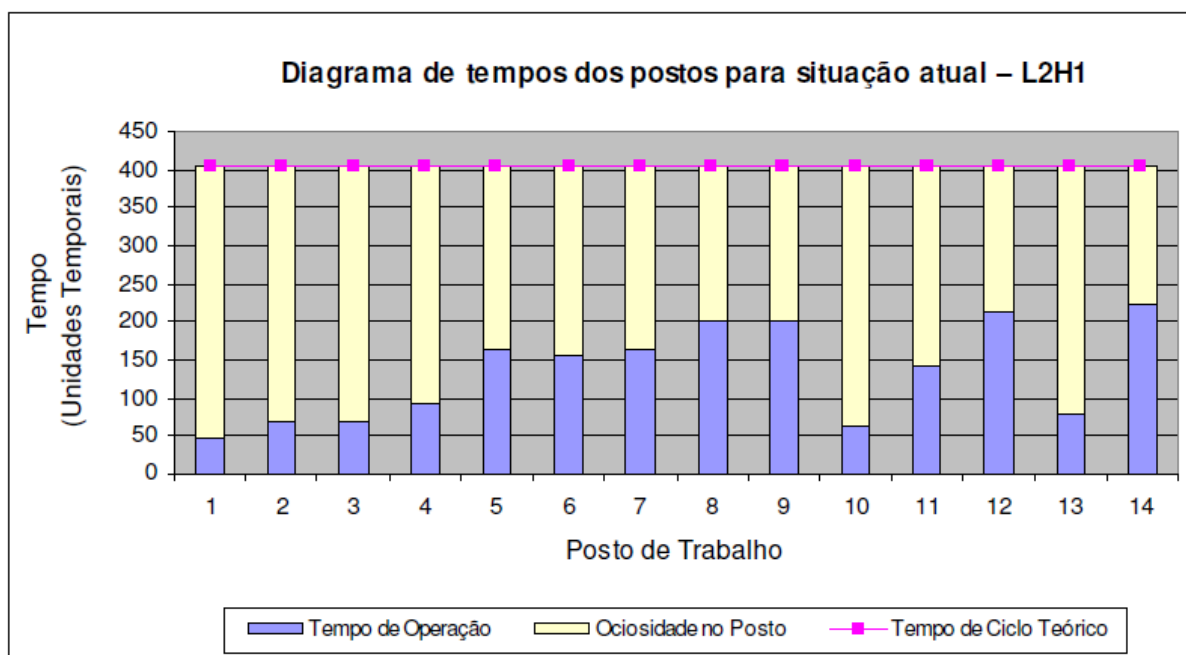
Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

**Tabela 11 – Indicadores originais da linha de montagem para o Modelo L1H1**

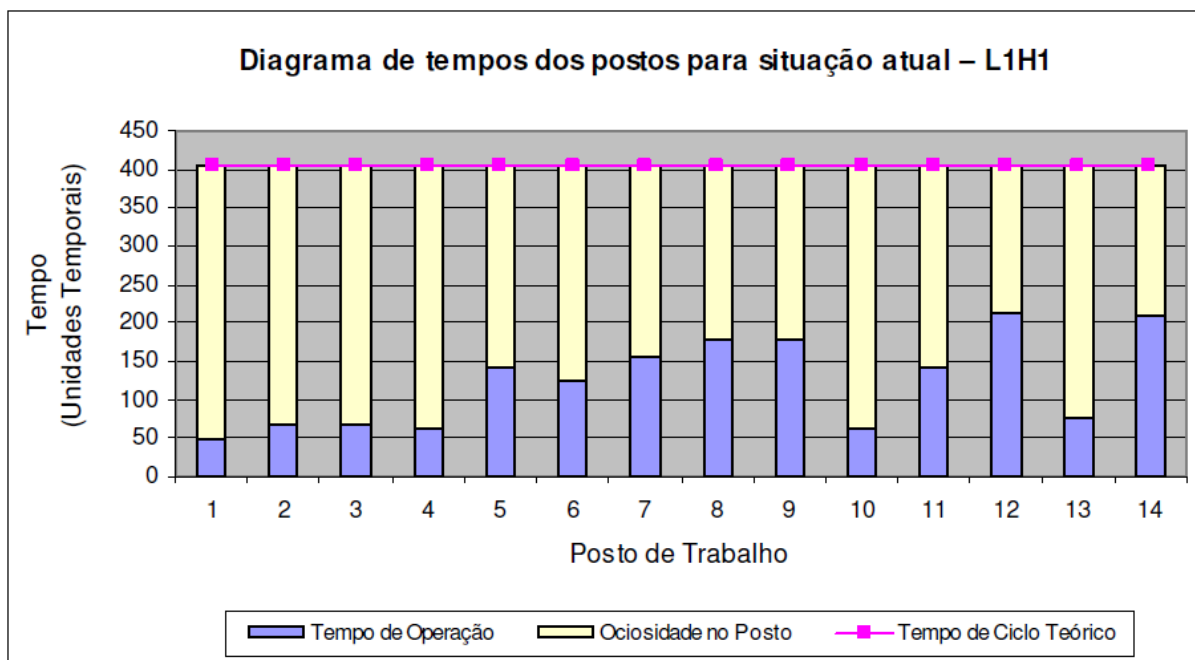
Indicador	Equação (nº)	Valor	Unidade
Tempo de ciclo teórico ( <i>tt</i> )	Equação (1)	405,6	UT
Número mínimo de postos ( <i>ME</i> )	Equação (2)	5	-
Utilização (%)	Equação (3)	33,3	%
Eficiência (%)	Equação (4)	28,3	%
Ociosidade	Equação (5)	4360,9	UT
Atraso de balanceamento (%)	Equação (6)	71,7	%
Índice de suavidade	Equação (7)	292,21	UT

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

O tempo de ciclo teórico (Equação (1)) foi calculado considerando-se uma produção de 0,0025 produtos por unidade de tempo, conforme apresentado por Marcilio e Skraba (2010). O número mínimo de postos (Equação (2)) de trabalho calculado foi de 4,64 postos para o modelo L2H1 e 4,25 postos para o modelo L1H1, arredondado para 5 postos, o valor inteiro imediatamente superior, para ambos os modelos (MARCILIO; SKRABA, 2010). Em ambos os produtos o tempo de ciclo real (223,7 UT) é substancialmente inferior ao tempo de ciclo teórico (405,6 UT), o que ocasionou que os valores de utilização (Equação (3)) e eficiência (Equação (4)) ficassem baixos e os valores de ociosidade (Equação (5)) elevados. Pode-se observar esses valores de ociosidade para o Modelo L2H1 na Figura 18 e para o Modelo L1H1 na Figura 19.



**Figura 18 – Diagrama original de tempos dos postos para o Modelo L2H1**  
 Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)



**Figura 19 – Diagrama original de tempos dos postos para o Modelo L1H1**

Fonte: (MARCILIO; SKRABA, 2010)

### 3.1.3 Modelo matemático original

#### 3.1.3.1 Premissas de modelagem

Como exposto na Seção 3.1.1 o modelo matemático utilizado por Marcilio e Skraba (2010) foi desenvolvido e implementado através do *software* GUSEK (GUSEK, 2013). As premissas de modelagem utilizadas pelos autores 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 que é imposta, via de regra, 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 cores específicas conforme o posto de trabalho aos quais elas estão vinculadas;

- 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. Essa premissa será revista no modelo proposto para acomodar a condição de Tarefas Comuns;
- 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. Essa premissa será revista no presente trabalho para acomodar a condição de Tarefas Comuns;
- 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.

### **3.1.3.2 Notações Matemáticas**

Para a implementação dos modelos foram consideradas as seguintes definições: conjuntos, índices, variáveis e parâmetros. Um conjunto contém elementos do modelo, como tarefas, postos de trabalho e operadores, ordenados pelos seus respectivos índices. Índices indicam a posição dos elementos dentro de

um conjunto. Na abordagem de modelagem adotada, variam de um até o número de elementos do conjunto. As variáveis do modelo podem assumir valores distintos para cada solução obtida, delineando características do resultado do modelo, como, por exemplo, o tempo de ciclo. Parâmetros são os dados admitidos como invariáveis no modelo, por exemplo, o número total de tarefas (MARCILIO; SKRABA, 2010).

Os conjuntos utilizados no modelo estão descritos no Quadro 2 abaixo, os índices estão descritos no Quadro 3, as variáveis estão descritas no Quadro 4 e os parâmetros estão descritos no Quadro 5.

**Quadro 2 – Conjuntos aplicados ao modelo matemático original**

Conjunto	Descrição
$T$	Conjunto de tarefas. Composto pelas tarefas “ $t$ ” de 1 a “ $nt$ ”.
$P$	Conjunto dos postos de trabalho. Composto pelos postos “ $p$ ” de 1 a “ $np$ ”.
$OP$	Conjunto dos operadores. Composto pelos operadores “ $o$ ” de 1 a “ $no$ ”.
$PREC$	Conjunto das restrições de precedência entre as tarefas

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

**Quadro 3 – Índices aplicados ao modelo matemático original**

Índice	Descrição
$t$	Índice associado ao conjunto de tarefas (e.g. para a Tarefa 25, $t = 25$ ).
$p, px$	Índices associados ao conjunto de postos (e.g. para posto 3, $p = 3$ ou $px = 3$ ).
$o$	Índice associado ao conjunto de operadores (e.g. para o operador 3, $o = 3$ ).
$i, j$	Índices associados ao conjunto de precedências.

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

**Quadro 4 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático original**

Variável	Descrição
$TP(t,p)$	Variável binária, função dos índices “ $t$ ” e “ $p$ ”. Determina se a tarefa $t$ é ou não realizada no posto $p$ , da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>TP(t,p)=1</math>, a tarefa “<math>t</math>” é realizada no posto “<math>p</math>”;</li> <li>• Se <math>TP(t,p)=0</math>, a tarefa “<math>t</math>” não é realizada no posto “<math>p</math>”.</li> </ul>
$TC$	Variável associada ao tempo de ciclo real (em UT), do posto ou operador com maior tempo de operação.
$Tempo\_OP(o)$	Variável associada ao tempo de operação (em UT) do operador “ $o$ ”.
$TOP(t,o)$	Variável binária, função dos índices “ $t$ ” e “ $o$ ”. Determina se a tarefa “ $t$ ” é ou não realizada pelo operador “ $o$ ”, da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>TOP(t,o)=1</math>, a tarefa “<math>t</math>” é realizada pelo operador “<math>o</math>”;</li> <li>• Se <math>TOP(t,o)=0</math>, a tarefa “<math>t</math>” não é realizada pelo operador “<math>o</math>”.</li> </ul>
$TOPP(t,o,p)$	Variável que assume valores binários, função dos índices “ $t$ ”, “ $o$ ” e “ $p$ ”. Determina se a tarefa “ $t$ ” é ou não realizada pelo operador “ $o$ ” no posto “ $p$ ”, da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>TOPP(t,o,p)=1</math>, a tarefa “<math>t</math>” é realizada pelo operador “<math>o</math>” no posto “<math>p</math>”;</li> <li>• Se <math>TOPP(t,o,p)=0</math>, a tarefa “<math>t</math>” não é realizada pelo operador “<math>o</math>” no posto “<math>p</math>”.</li> </ul>
$OPP(o,p)$	Variável que indica o número de tarefas que um operador “ $o$ ” realiza em um posto “ $p$ ”. Assume valores inteiros.



**Quadro 4 – Variáveis aplicadas ao modelo matemático original (continuação)**

Variável	Descrição
$OPPbin(o,p)$	Variável binária, função dos índices “ $o$ ” e “ $p$ ”. Determina se o operador “ $o$ ” realiza tarefa(s) no posto “ $p$ ”, da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>OPPbin(o,p)=1</math>, o operador “<math>o</math>” realiza ao menos uma tarefa no posto “<math>p</math>”;</li> <li>• Se <math>OPPbin(o,p)=0</math>, o operador “<math>o</math>” não realiza tarefas no posto “<math>p</math>”.</li> </ul>
$DOPP(o,p,px)$	Variável que assume valores binários, função dos índices “ $o$ ”, “ $p$ ” e “ $px$ ”. Identifica se o operador “ $o$ ” realiza ou não deslocamento do posto “ $p$ ” ao posto “ $px$ ” (“ $p$ ” menor que “ $px$ ”), da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>DOPP(o,p,px)=1</math>, o operador “<math>o</math>” se desloca do posto “<math>p</math>” ao posto “<math>px</math>”;</li> <li>• Se <math>DOPP(o,p,px)=0</math>, o operador “<math>o</math>” não se desloca do posto “<math>p</math>” ao posto “<math>px</math>”.</li> </ul>
$difP(p)$	Variável associada ao módulo da diferença entre o tempo médio de operação em cada posto pelo tempo real de operação no posto (valor dado em UT). É função do índice “ $p$ ”.
$difOP$	Variável associada ao módulo da diferença máxima entre o tempo médio de operação de todos os operadores pelo tempo real de operação dos operadores (valor dado em UT).

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

**Quadro 5 – Parâmetros aplicados ao modelo matemático original**

Parâmetro	Descrição
$nt$	Número total de tarefas no modelo analisado.
$np$	Número total de postos no modelo analisado.
$nop$	Número total de operadores no modelo analisado.
$dt$	Duração correspondente a determinada tarefa. Valor dado em UT.
$tmedio$	Tempo médio de operação dos postos de trabalho (em UT). Valor obtido a partir da consideração de que o tempo de operação total das tarefas está igualmente distribuído nos “ $np$ ” postos de trabalho.
$tmedioOP$	Tempo médio de operação dos operadores (em UT). Valor obtido a partir da consideração de que o tempo de operação total das tarefas está igualmente distribuído entre os “ $nop$ ” operadores.
$M$	Constante auxiliar para formulação $Big-M^2$ . Valor adotado, $M = 1000$ .
$eps$	Constante auxiliar mínima para formulação $Big-M$ . Valor adotado, $eps = 0,1$ .
$TempoMovPPx$	Tempo de movimentação (em UT) do operador entre os postos $p$ e $px$ , conforme Tabela 9.
$tf$	Tempo de pré-carga (tempo fixo) existente no posto de trabalho (em UT), referente à carga de trabalho já alocada para realização de tarefas exteriores à linha estudada.

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

### 3.1.3.3 Modelo de balanceamento do tempo de operação de postos de trabalho e operadores

Conforme Marcilio e Skraba (2010) e de acordo com a Expressão (9), os objetivos desse modelo são:

1. Fator 1: Minimizar o tempo de ciclo real dos postos de trabalho e operadores;

<sup>2</sup> Parâmetro aplicado na formulação de restrições de modelos de Programação Linear Inteira Mista. Alternativamente, o parâmetro  $M$  pode ser utilizado para a definição de uma escala de prioridades entre diferentes fatores da função objetivo.

2. Fator 2: Minimizar as diferenças dos tempos de operação de cada posto de trabalho em relação ao tempo médio de operação de todos os postos;
3. Fator 3: Minimizar a máxima diferença de tempo do operador mais sobrecarregado, ou menos sobrecarregado, em relação ao tempo médio de operação de todos os operadores. Assim, se o fator  $difOP(p) = 0$  pode-se dizer que a carga de trabalho entre operadores está equalizada;
4. Fator 4: Minimizar o número de deslocamentos de operadores entre postos de trabalho.

Nota-se que, conforme experimentos práticos e tomando-se em conta a importância relativa dos quatro fatores observados, ponderações diferenciadas foram adotadas (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$\begin{aligned} minimize (z) = & 1000.TC + \sum_{p \in P} difP(p) + \\ & 100.difOP + 10. \sum_{o \in OP} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{p \in P \\ p < px}} DOPP(o, p, px) \end{aligned} \quad \text{Expressão(9)}$$

A Inequação (10) impõe restrições de precedência entre pares de tarefas, conforme apresentado na Figura 14 (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$\sum_{p \in P} TP(i, p) \leq \sum_{p \in P} p.TP(j, p) \quad \forall i, j \in PREC \quad \text{Inequação(10)}$$

Uma formulação adicional é necessária para estabelecer o módulo da diferença entre o tempo de operação no posto e o tempo médio de operação dos postos. Esta formulação é apresentada na Inequação (11) e na Inequação (12) (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$difP(p) \geq + \sum_{t \in T} [dt(t).TP(t, p)] - tmedio \quad \forall p \in P \quad \text{Inequação(11)}$$

$$difP(p) \geq - \sum_{t \in T} [dt(t).TP(t, p)] + tmedio \quad \forall p \in P \quad \text{Inequação(12)}$$

Segundo Marcilio e Skraba (2010), o uso de duas inequações é necessário para garantir que o valor de  $difP(p)$  seja positivo, ou seja, correspondente ao

módulo da diferença. De forma simplificada, o entendimento desta formulação pode ser dado da seguinte maneira:

1. Se  $\sum_{t \in T} [dt(t).TP(t,p)] > t_{medio}$  , então  $\begin{cases} difP(p) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difP(p) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$

Portanto, a Inequação (11) em conjunto com o fato do valor de  $difP(p)$  estar sendo minimizado na função objetivo, faz com que  $difP(p)$  assumo o valor de  $\sum_{t \in T} [dt(t).TP(t,p)] - t_{medio}$ .

2. Se  $\sum_{t \in T} [dt(t).TP(t,p)] < t_{medio}$  , então  $\begin{cases} difP(p) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difP(p) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$  .

Portanto, a Inequação (12) em conjunto como fato do valor de  $difP(p)$  estar sendo minimizado, faz com que  $difP(p)$  assumo o valor de  $-\sum_{t \in T} [dt(t).TP(t,p)] + t_{medio}$ .

3. Se  $\sum [dt(t).TP(t,p)] = t_{medio}$  , então  $\begin{cases} difP(p) \geq (n^o \text{ positivo}) \\ difP(p) \geq (n^o \text{ negativo}) \end{cases}$  . Como

valor de  $difP(p)$  está sendo minimizado na função de avaliação, então  $difP(p) = 0$ .

O modelo visa também balancear a distribuição do tempo de execução das tarefas entre os operadores e considera tempos de deslocamento de operadores entre postos de trabalho. Assim, a seguir, são apresentadas, da Equação (13) à Inequação (28), as formulações adicionais elaboradas para incorporar estes detalhamentos de modelagem (MARCILIO; SKRABA, 2010).

A Equação (13) estabelece a condição de que uma tarefa deve ser realizada por somente um operador (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$\sum_{p \in P} TP(t,p) = \sum_{o \in OP} TOP(t,o) \quad \forall t \in T \quad \text{Equação(13)}$$

Uma formulação para restringir que uma tarefa deve ser realizada uma única vez por um operador é imposta por meio da Equação (14) (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$\sum_{o \in OP} TOP(t,o) = 1 \quad \forall t \in T \quad \text{Equação(14)}$$

A Inequação (15), Inequação (16) e Inequação (17) 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. De fato, a variável  $TOPP(t, o, p)$  assume o valor de um “E (and)” lógico (MAGATÃO, 2009) entre as variáveis binárias  $TOP(t, o)$  e  $TP(t, p)$  (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$TOPP(t, o, p) \leq TOP(t, o) \quad \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P \quad \text{Inequação(15)}$$

$$TOPP(t, o, p) \leq TP(t, p) \quad \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P \quad \text{Inequação(16)}$$

$$TOPP(t, o, p) \geq TOP(t, o) + TP(t, p) - 1 \quad \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P \quad \text{Inequação(17)}$$

A Equação (18) é utilizada para determinar o número de tarefas associadas a um operador em um posto (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$OPP(o, p) = \sum_{t \in T} TOPP(t, o, p) \quad \forall o \in OP, \forall p \in P \quad \text{Equação(18)}$$

Se o número de tarefas realizadas por um operador em um posto de trabalho é maior do que zero, então o operador está alocado àquele posto de trabalho. A formulação que permite identificar se um operador está ou não alocado a um posto de trabalho é apresentada na Inequação (19) e na Inequação (20). Se o operador estiver alocado a um determinado posto, a variável binária  $OPPbin(o, p)$  assume o valor um, caso contrário,  $OPPbin(o, p)$  assume o valor zero (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$OPP(o, p) \geq (-M - eps) \cdot (1 - OPPbin(o, p)) + eps \quad \forall o \in OP, p \in P \quad \text{Inequação(19)}$$

$$OPP(o, p) \leq M \cdot OPPbin(o, p) \quad \forall o \in OP, p \in P \quad \text{Inequação(20)}$$

A partir da observação da prática operacional, e considerando-se restrições de *layout* da linha em estudo, adotou-se a restrição de que as tarefas alocadas a um posto são realizadas por um único operador (MARCILIO; SKRABA, 2010). Tal restrição será revista para acomodar a condição de Tarefas Comuns. A formulação que descreve esta restrição é apresentada na Inequação (21).

$$\sum_{o \in OP} OPPbin(o, p) \leq 1 \quad \forall p \in P \quad \text{Inequação(21)}$$

No modelo original considera-se que um operador pode realizar tarefas em diferentes postos de trabalho. No entanto, se ele o fizer, deve-se levar em conta que há um tempo de deslocamento do operador entre os postos. Este tempo de deslocamento é acrescido ao tempo total associado ao operador (MARCILIO; SKRABA, 2010), de acordo com a Inequação (25) exposta abaixo.

A formulação que identifica entre quais postos um operador se desloca é descrita na Inequação (22), Inequação (23) e Inequação (24). Esta formulação toma por base um “E (and)” lógico entre as variáveis binárias  $OPPbin(o,p)$  e  $OPPbin(o,px)$ , com  $p < px$  (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$DOPP(o,p,px) \leq OPPbin(o,p) \quad \forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px \quad \text{Inequação(22)}$$

$$DOPP(o,p,px) \leq OPPbin(o,px) \quad \forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px \quad \text{Inequação(23)}$$

$$DOPP(o,p,px) \leq OPPbin(o,p) + OPPbin(o,px) - 1 \quad \text{Inequação(24)}$$

$$\forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px$$

Para determinar o tempo de ocupação de cada operador é utilizada a formulação descrita na Equação (25) (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$tempo_{OP(o)} = \sum_{t \in T} dt(t).TOP(t,o) + \sum_{\substack{p, px \in P \\ p < px}} DOPP(o,p,px).TempMovPPx(p,px) \quad \forall o \in OP \quad \text{Equação(25)}$$

No modelo original, considerou-se que o tempo de operação do operador também pode impor um gargalo produtivo. Assim, é necessária uma formulação que influencie o tempo de ciclo real a partir da carga de trabalho do operador. Esta formulação está mostrada na Inequação (26) (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$tempo_{OP(o)} \leq TC \quad \forall o \in OP \quad \text{Inequação(26)}$$

Para equilibrar o tempo de operação entre os operadores, definiu-se minimizar o máximo módulo da diferença dos tempos associados a cada operador, em relação ao tempo médio de todos os operadores. Assim, a variável  $difOP(o)$  carrega o máximo desvio em relação à média dos tempos dos operadores. Para determinar o

módulo desta diferença utilizou-se a formulação exposta nas Inequações (27) e (28) (MARCILIO; SKRABA, 2010).

$$difOP(o) \geq +(tempo\_OP(o)) - tmedioOP \quad \forall o \in OP \quad \text{Inequação(27)}$$

$$difOP(o) \geq -(tempo\_OP(o)) + tmedioOP \quad \forall o \in OP \quad \text{Inequação(28)}$$

Marcilio e Skraba (2010) descrevem também um modelo utilizando um robô adjacente à linha como um operador adicional alocado de forma fixa em uma estação adicional. Esse modelo não foi considerado no desenvolvimento do presente trabalho por configurar um operador automático, que não se adequaria aos objetivos propostos no projeto. Optou-se por avaliar as influências geradas pela consideração de que algumas tarefas específicas são automáticas, ou seja, não oneram a carga de trabalho dos operadores, mas podem estar localizadas em qualquer uma das estações originais da linha de montagem estudada.

## 3.2 O Modelo Matemático Proposto

### 3.2.1 Introdução

O modelo utilizado por Marcilio e Skraba (2010) foi reescrito no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (ILOG-CPLEX, 2013). Essa nova versão levou em conta generalizações anteriormente não previstas no modelo de Marcilio e Skraba (2010). Essas generalizações foram:

- A elaboração de conjuntos esparsos para a formação do domínio das variáveis do modelo matemático proposto. Isto permitiu a solução de problemas de balanceamento para linhas com diferentes características de forma computacionalmente mais eficaz;
- Integração com o *software Microsoft Excel*, gerando tabelas e gráficos de resultados automaticamente;
- A possibilidade de agrupamento de postos de trabalhos (*clusters*<sup>3</sup>) com a aplicação de *buffers* intermediários.

---

<sup>3</sup> Agrupamento de postos de trabalho consecutivos em uma linha. Pode ser aplicado quando existe uma grande diferença nos tempos de execução em diferentes postos e não é possível equalizar essa diferença pelo balanceamento da linha como um todo. Exige a utilização de *buffers* intermediários. Em Donnini *et al.* (2010) um estudo acerca deste problema é realizado.

Ressalta-se, no entanto, que a avaliação da formação dos *clusters* e do tamanho dos *buffers* não faz parte do escopo do presente trabalho. Testes destes aspectos são mantidos como um trabalho futuro. Um exemplo de aplicação do conceito de *clusterização* pode ser encontrado em Donnini *et al.* (2010).

A partir desse modelo formulado no ambiente IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*, foram propostas alterações para que o modelo fosse também capaz de endereçar as duas condições especiais propostas nos objetivos do presente trabalho (Seção 1.3):

1. Operações Automáticas;
2. Tarefas Comuns.

### **3.2.2 Operações Automáticas**

#### **3.2.2.1 Definição**

Uma Operação Automática pode ser caracterizada como uma tarefa executada por um equipamento automático, como uma máquina ou um robô, por exemplo, não sendo realizada, portanto, por nenhum operador.

No presente projeto, o foco do estudo será em Operações Automáticas que exigem a presença momentânea de um operador no posto na qual elas estão situadas para tomar alguma decisão ou ação que dê início à operação, como a seleção do modelo que está sendo fabricado, por exemplo. Isto é, não são tratados casos nos quais esse início de operação é totalmente automático.

Ressalta-se que o tempo de execução da Operação Automática não onera a carga de trabalho do operador ao qual ela está associada, o que pode gerar oportunidades de melhoria no balanceamento da linha de montagem estudada.

### **3.2.3 Tarefas Comuns**

#### **3.2.3.1 Definição**

Tarefas Comuns são caracterizadas por exigirem ou se beneficiarem da execução conjunta de dois ou mais operadores.

A exigência da alocação conjunta de múltiplos operadores para a realização de uma tarefa pode ter alguns motivos. Dentre eles destacam-se:

- O tamanho de uma peça, componente ou equipamento inviabiliza o seu manuseio por somente uma pessoa, como na fixação e alinhamento do capô de um automóvel;
- Características especiais da operação, como a necessidade de se posicionar uma peça enquanto outro operador fará uma fixação, por exemplo.

Conforme afirmado acima, algumas operações podem se beneficiar da alocação de mais de um operador conjuntamente, apesar de não exigirem essa condição. Isso pode ocorrer por diferentes razões, dentre as quais destacam-se:

- Situações nas quais o componente ou equipamento pode ser manuseado por somente um operador, mas o manuseio conjunto reduzirá seu tempo de execução. Um exemplo para esse caso seria a realização de soldas ponto manuais com pinças de grandes dimensões. A utilização de balancins viabiliza a realização da operação por um único operador, mas a presença de um segundo operador pode aumentar a velocidade no deslocamento e posicionamento do equipamento para a execução dos pontos de solda.
- Casos nos quais um operador pode realizar uma parte auxiliar da tarefa enquanto outro a executa de fato. Por exemplo, em uma operação de parafusamento na qual um operador faz o roscamento manual inicial dos parafusos e o outro operador realiza em seguida o aperto final com uma parafusadeira elétrica ou pneumática.

Na nova versão proposta para o modelo o usuário pode impor múltiplos operadores em Tarefas Comuns que exijam tal condição e pode, também, testar esta condição em tarefas que possam se beneficiar da alocação de mais de um operador. No capítulo de resultados (Seção 4.5), estas condições mencionadas são detalhadas.

### **3.2.4 Notações Matemáticas**

Assim como realizado por Marcilio e Skraba (2010) e descrito na Seção 3.1.3.2, para a implementação dos modelos foram consideradas as definições de conjuntos, índices, variáveis e parâmetros.



Os conjuntos utilizados nos modelos estão descritos no Quadro 6 abaixo, os índices estão descritos no Quadro 7, as variáveis estão descritas no Quadro 8 e os parâmetros estão descritos no Quadro 9.

**Quadro 6 – 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 <i>clusters</i>
$MC(m,c)$	Conjunto auxiliar de modelos e <i>clusters</i>
$CS(c,s)$	Conjunto de estações que compõe cada <i>cluster</i>
$MCS(m,c,s)$	Conjunto de estações que compõe cada <i>cluster</i> para cada modelo
$W\_S(w,s)$	Operadores que podem ser alocados em cada posto de trabalho. Limitado por $WSFIX(w,s)$ .
$W\_S\_S(w,sp,ss)$	Conjunto dos possíveis deslocamentos de operadores entre postos de trabalho. Limitado por $W\_S(w,s)$ e $WSFIX(w,s)$ .
$T\_W(t,w)$	Tarefas que podem ser realizadas por cada operador. Limitado por $WSFIX(w,s)$ , $TSFIX(t,s)$ 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 7 – Índices aplicados ao modelo matemático proposto**

<b>Índice</b>	<b>Descrição</b>
$t$	Tarefa
$m$	Modelo
$c$	<i>Cluster</i>
$si$	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 8 – 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.

**Quadro 9 – 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.
$CSS(c,si,sf)$	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 auxiliar para formulação <i>Big-M</i> . 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.
$CnT(t,s,nw)$	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.

### 3.2.5 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 (29) abaixo.

*minimize*( $z$ ) =

$$\begin{aligned}
 & (M * M) * CT + \\
 & (1) * \sum_{s \in Stations} DifS(s) + \\
 & M * MaxDifW + \qquad \qquad \qquad \text{Expressão(29)} \\
 & \left(\frac{M}{10}\right) * \sum_{(w,sp,ss) \in W\_S\_S} WSSb(w, sp, ss) + \\
 & (10 * M) * \sum_{(m,c) \in MC} DifC(m, c)
 \end{aligned}$$

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

### 3.2.6 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 (30) exposta abaixo.

$$\sum_{(t,s) \in T\_S} TS(t,s) = 1 \quad \forall t \in Tasks \quad \text{Equação(30)}$$

É de fundamental importância que as relações de precedência entre as tarefas apresentadas na Figura 14 sejam cumpridas. A Inequação (31) 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  $PREC$ .

$$\sum_{(tp,s) \in T\_S} s * TS(tp,s) \leq \sum_{(ts,s) \in T\_S} s * TS(ts,s) \quad \forall (tp,ts) \in PREC \quad \text{Inequação(31)}$$

A Inequação (32) 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.

$$\sum_{(t,s) \in T\_S} (avDT(t) * TS(t,s)) + FT(s) \leq TC \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(32)}$$

As Inequações (33) e (34) visam determinar as diferenças entre as cargas de trabalho alocadas a cada posto de trabalho e carga média de todos os postos da linha.

$$DifS(s) \geq \sum_{(t,s) \in T\_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) - avS \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(33)}$$

$$DifS(s) \leq - \sum_{(t,s) \in T\_S} (avDT(t) * TS(t,s) + FT(s)) + avS \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(34)}$$

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 (33), e os casos em que a carga do posto é inferior à média, situação considerada pela Inequação (34). 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 (33) 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 (34) 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 (35) 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.

$$\sum_{(t,s) \in T_S} TS(t,s) = \sum_{(t,w) \in T_W} \frac{TW(t,w)}{nw} \quad \forall (t,nw) \in T_{nW} \quad \text{Equação(35)}$$

A Inequação (36) define que cada tarefa seja realizada apenas uma vez por  $nw$  operadores.

$$\sum_{(t,w) \in T_W} TW(t,w) \leq nw \quad \forall (t,nw) \in T_{nW} \quad \text{Inequação(36)}$$

As Inequações (37), (38) e (39) 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  $TS(t, s)$ .

$$TWS(t, w, s) \leq TW(t, w) \quad \forall (t, w, s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(37)}$$

$$TWS(t, w, s) \leq TS(t, s) \quad \forall (t, w, s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(38)}$$

$$TWS(t, w, s) \geq TW(t, w) + TS(t, s) - 1 \quad \forall (t, w, s) \in T\_W\_S \quad \text{Inequação(39)}$$

As Inequações (40) e (41) 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.

$$\sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t, w, s) \geq TW(t, w) \quad \forall (t, w) \in T\_W \quad \text{Inequação(40)}$$

$$\sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t, w, s) \geq TS(t, s) \quad \forall (t, s) \in T\_S \quad \text{Inequação(41)}$$

A Equação (42) caracteriza o número de tarefas associadas a um operador em um posto de trabalho ao somar todas as tarefas a ele atribuídas.

$$WS(w, s) = \sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t, w, s) \quad \forall (w, s) \in W\_S \quad \text{Equação(42)}$$

As Inequações (43) e (44) 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.

$$WS(w, s) \geq (-Mc - eps) * (1 - WSb(w, s)) + eps \quad \forall (w, s) \in W\_S \quad \text{Inequação(43)}$$

$$WS(w, s) \leq Mc * WSb(w, s) \quad \forall (w, s) \in W\_S \quad \text{Inequação(44)}$$

A Inequação (45) garante que o número de operadores que podem ser alocados em cada estação seja menor ou igual a  $nw$ .

$$\sum_{(w,s) \in W\_S} WSb(w, s) \leq nw \quad \forall (nw, s) \in S\_nW \quad \text{Inequação(45)}$$

As Inequações (46), (47) e (48) determinam restrições de alocação dos operadores em relação aos postos de trabalho de forma análoga ao realizado nas Inequações (33), (34) e (35).

$$WSSb(w, s, ss) \leq WSb(w, s) \quad \forall (w, s, ss) \in W\_S\_S \quad \text{Inequação(46)}$$

$$WSSb(w, s, ss) \leq WSb(w, ss) \quad \forall (w, s, ss) \in W\_S\_S \quad \text{Inequação(47)}$$

$$WSSb(w, s, ss) \geq WSb(w, s) + WSb(w, ss) - 1 \quad \forall (w, s, ss) \in W\_S\_S \quad \text{Inequação(48)}$$

O tempo de ocupação de cada operador é dado pela Equação (49), 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.

$WTime(w) =$

$$\begin{aligned} & \sum_{(t,w) \in T\_W} avDT(t) * TW(t, w) + \\ & \sum_{(w,sp,ss) \in W\_S\_S} WSSb(w, sp, ss) * movtime + \\ & \sum_{(w,s) \in W\_S} FT(s) * WSb(w, s) + \sum_{(w,s) \in WSFIX} FT(s) - \\ & \sum_{(t,w) \in AT\_W} avDT(t) * TW(t, w) \end{aligned} \quad \text{Equação(49)}$$

O fator (d) é derivado diretamente da consideração de Operações Automáticas. Como definido na Seção 3.2.2, 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.

Assim como utilizado no modelo original, considerou-se que o tempo de ciclo pode ser determinado pelo operador com a maior carga de trabalho, conforme mostra a Inequação (50) abaixo.

$$WTime(w) \leq CT \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(50)}$$

A máxima diferença de carga de trabalho de um operador em relação à carga de trabalho média ( $avW$ ) é descrita pelas Inequações (51) e (52) abaixo.

$$MaxDifW \geq WTime(w) - avW \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(51)}$$

$$MaxDifW \geq -(WTime(w)) + avW \quad \forall w \in Workers \quad \text{Inequação(52)}$$

De forma análoga ao caso da comparação das cargas dos postos de trabalho com a carga média dos postos realizada nas Inequações (33) e (34), 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 (51), quanto os casos em que a carga do operador é inferior à média, situação considerada pela Inequação (52). 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 (51) em conjunto com o fato do valor de  $MaxDifW(w)$  estar sendo minimizado na função objetivo, faz com que  $MaxDifW(w)$  assumo 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 (52) em conjunto como fato do valor de  $MaxDifW(w)$  estar sendo minimizado, faz com que  $MaxDifW(w)$  assumo 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 (53).

$$Dur(m, s) = \sum_{(t,s) \in T_S} (DTm(m, t) * TS(t, s) + FT(s)) \quad \forall (m, s) \in MS \quad \text{Equação(53)}$$

O tempo de ciclo de cada modelo “*m*” é obtido através da Inequação (54) abaixo.

$$\sum_{m \in Models} (OR(m) * Dur(m, s)) + FT(s) \leq 1 \quad \forall s \in Stations \quad \text{Inequação(54)}$$

A Inequação (55) 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.

$$Dur(m, s) \leq CTm(m, c) \quad \forall m, c, s \in MCS \quad \text{Inequação(55)}$$

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 (56) em conjunto com a função objetivo, Expressão (29).

$$CTm(m, c) - Dur(m, s) \leq DifC(m, c) \quad \forall m, c, s \in MCS \quad \text{Inequação(56)}$$

### 3.2.7 Comparação do Modelo Original com o Modelo Proposto

O Quadro 10 abaixo compara expressões existentes nos dois modelos. As expressões referentes à divisão em *clusters* foram omitidas porque não eram aplicadas no modelo original. Ressalta-se que no caso da imposição de um único *cluster* na linha este deve envolver da estação inicial até a estação final. Na prática, isto indica que, de fato, não se deseja avaliar a presença de *clusters* e as eventuais diferenças de balanceamento que estes iriam acarretar. Neste caso, a variável  $DifC(m, c)$ , a qual indica a diferença de tempo de ciclo entre *clusters*, não deve estar presente no modelo. A geração de conjuntos esparsos implementada, neste caso,

não cria de forma desnecessária as variáveis de *clusterização* e, na prática, é como se esta característica fosse suprimida do modelo.

**Quadro 10 – Comparação do Modelo Original com o Modelo Proposto**

Descrição no Modelo Original	Expressões no Modelo Original	Expressões no Modelo Proposto
<b>1 - Função Objetivo</b>	$\begin{aligned} \text{minimize } (z) = & \\ & 1000.TC + \\ & \sum_{p \in P} \text{dif}P(p) + \\ & 100.\text{dif}O + \\ & 10. \sum_{o \in OP} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{p \in P \\ p < px}} \text{DOPP}(o, p, px) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{minimize } (z) = & \\ & (M.M).CT + \\ & (1). \sum_{s \in \text{Stations}} \text{Dif}S(s) + \\ & M * \text{MaxDif}W + \\ & \left(\frac{M}{10}\right). \sum_{(w,sp,ss) \in W\_S\_S} \text{WSSb}(w, sp, ss) + \\ & (10.M). \sum_{(m,c) \in MC} \text{Dif}C(m, c) \end{aligned}$
<b>2 – Relações de Precedência</b>	$\sum_{p \in P} TP(i, p) \leq \sum_{p \in P} p.TP(j, p) \quad \forall i, j \in \text{PREC}$	$\begin{aligned} \sum_{(tp,s) \in T_S} s.TS(tp, s) & \leq \\ \sum_{(ts,s) \in T_S} s.TS(ts, s) & \\ \forall (tp, ts) \in \text{PREC} & \end{aligned}$
<b>3 - Cada tarefa deve ser realizada por somente um operador</b>	$\sum_{p \in P} TP(t, p) = \sum_{o \in OP} TOP(t, o) \quad \forall t \in T$	$\sum_{(t,s) \in T\_S} TS(t, s) = \sum_{(t,s) \in T\_W} \frac{TW(t, w)}{nw} \quad \forall (t, nw) \in T\_nW$
<b>4 - Cada tarefa é realizada apenas uma vez</b>	$\sum_{o \in OP} TOP(t, o) = 1 \quad \forall t \in T$	$\begin{aligned} \sum_{(t,w) \in T\_W} TW(t, w) & \leq nw \\ \forall (t, nw) \in T\_nW & \end{aligned}$
<b>5 - Determinação dos os postos em que um operador realiza tarefas</b>	$\begin{aligned} TOPP(t, o, p) & \leq TOP(t, o) \\ \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P \\ \\ TOPP(t, o, p) & \leq TP(t, p) \\ \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P \\ \\ TOPP(t, o, p) & \geq \\ TOP(t, o) + TP(t, p) - 1 & \\ \forall t \in T, \forall o \in OP, \forall p \in P & \end{aligned}$	$\begin{aligned} TWS(t, w, s) & \leq TW(t, w) \\ \forall (t, w, s) \in T\_W\_S \\ \\ TWS(t, w, s) & \leq TS(t, s) \\ \forall (t, w, s) \in T\_W\_S \\ \\ TWS(t, w, s) & \geq \\ TW(t, w) + TS(t, s) - 1 & \\ \forall (t, w, s) \in T\_W\_S & \end{aligned}$
<b>6 - Determinação do número de tarefas associadas a um operador em um posto</b>	$OPP(o, p) = \sum_{t \in T} TOPP(t, o, p) \quad \forall o \in OP, \forall p \in P$	$\begin{aligned} WS(w, s) = & \\ \sum_{(t,w,s) \in T\_W\_S} TWS(t, w, s) & \\ \forall (w, s) \in W\_S & \end{aligned}$
<b>7 - Se um operador atua em um posto, ele é então alocado àquele posto.</b>	$\begin{aligned} OPP(o, p) & \geq \\ (-M - eps). (1 - OPPbin(o, p)) + eps & \\ \forall o \in OP, p \in P & \\ \\ OPP(o, p) & \leq M. OPPbin(o, p) \\ \forall o \in OP, p \in P & \end{aligned}$	$\begin{aligned} WS(w, s) & \geq \\ (-Mc - eps). (1 - WSb(w, s)) & \\ + eps & \\ \forall (w, s) \in W\_S & \\ \\ WS(w, s) & \leq Mc. WSb(w, s) \\ \forall (w, s) \in W\_S & \end{aligned}$
<b>8 - As tarefas alocadas a um posto são realizadas por um único operador</b>	$\sum_{o \in OP} OPPbin(o, p) \leq 1 \quad \forall p \in P$	$\begin{aligned} \sum_{(w,s) \in W_S} WSb(w, s) & \leq nw \\ \forall (nw, s) \in S\_nW & \end{aligned}$

**Quadro 10 – Comparação do Modelo Original com o Modelo Proposto (continuação)**

<p><b>9 - Determinação dos deslocamentos entre postos realizados por cada operador</b></p>	$DOPP(o, p, px) \leq OPPbin(o, p)$ $\forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px$ $DOPP(o, p, px) \leq OPPbin(o, px)$ $\forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px$ $DOPP(o, p, px) \leq OPPbin(o, p) + OPPbin(o, px) - 1$ $\forall o \in OP, p \in P, px \in P \mid p < px$	$WSSb(w, s, ss) \leq WSb(w, s)$ $\forall (w, s, ss) \in W\_S\_S$ $WSSb(w, s, ss) \leq WSb(w, ss)$ $\forall (w, s, ss) \in W\_S\_S$ $WSSb(w, s, ss) \geq WSb(w, s) + WSb(w, ss) - 1$ $\forall (w, s, ss) \in W\_S\_S$
<p><b>10 - Carga de trabalho total de cada operador</b></p>	$tempoOP(o) = \sum_{t \in T} dt(t).TOP(t, o) + \sum_{\substack{p, px \in P \\ p < px}} DOPP(o, p, px).TempMovPPx(p, px)$ $\forall o \in OP$	$WTime(w) = \sum_{(t, w) \in T\_W} avDT(t) * TW(t, w) + \sum_{(w, sp, ss) \in W\_S\_S} WSSb(w, sp, ss).movtime + \sum_{(w, s) \in W\_S} FT(s) * WSb(w, s) + \sum_{(w, s) \in WSFIX} FT(s) - \sum_{(t, w) \in AT\_W} avDT(t) * TW(t, w)$
<p><b>11 - O tempo de ciclo pode ser dado em função do operador com maior carga de trabalho</b></p>	$tempoOP(o) \leq TC$ $\forall o \in OP$	$WTime(w) \leq CT$ $\forall w \in Workers$
<p><b>12 - Máximo módulo da diferença dos tempos associados a cada operador, em relação ao tempo médio de todos os operadores</b></p>	$difOP(o) \geq +(tempoOP(o)) - tmedioOP$ $\forall o \in OP$ $difOP(o) \geq -(tempoOP(o)) + tmedioOP$ $\forall o \in OP$	$MaxDifW \geq WTime(w) - avW$ $\forall w \in Workers$ $MaxDifW \geq WTime(w) - avW$ $\forall w \in Workers$

A primeira diferença a ser apontada entre o modelo original e o proposto é a utilização de índices esparsos na formação dos conjuntos no modelo proposto. Isso pode ser visto, por exemplo, na expressão 1 do Quadro 10, a Função Objetivo. No modelo original cada índice é ligado a um conjunto ( $OP$ ,  $P$ , etc). Já no modelo proposto forma-se um conjunto que reúne, por exemplo somente as relações válidas entre operadores e postos. Isso permite a realização de, em  $WSSb(w, sp, ss)$  um somatório apenas, ao invés do encadeamento de três somatórios utilizado no modelo original. Outro ponto onde essa diferença é percebida é na necessidade de se relacionar os números de postos, caracterizada por  $p < px$ , presente nas

expressões 9 e 10 do modelo original. Isso não é necessário no modelo proposto porque o conjunto para a variável  $WSSb(w, sp, ss)$ , no caso, o conjunto  $W\_S\_S(w, sp, ss)$ , é formado já com essa consideração.

Outro ponto a se ressaltar é a inclusão do parâmetro  $n_w$  (número de operadores que devem ser associados a cada tarefa) e suas derivações. Essa característica advém das Tarefas Comuns. Essa alteração influencia diretamente as expressões 3, 4 e 8. No modelo original limita-se sempre em um operador por tarefa e por posto de trabalho. Já no modelo proposto, devido à possibilidade de existirem Tarefas Comuns, limitam-se essas alocações pelo valor de  $n_w$  de cada tarefa.

Por fim, destaca-se que o *solver* utilizado para o desenvolvimento do modelo proposto, o IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (ILOG-CPLEX, 2013), apresenta, conforme descrito na Seção 3.1.1, um desempenho computacional de estado da arte em relação aos demais *softwares* de otimização existentes no mercado. Isso permite que melhores resultados sejam alcançados com menores tempos computacionais, o que pode ser visto no Capítulo 4 a seguir apresentado.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo busca-se, inicialmente, avaliar os resultados obtidos com o modelo proposto. Esta avaliação é realizada a partir de uma comparação dos resultados obtidos por Marcilio e Skraba (2010) com o resultado obtido para o modelo proposto, observando-se as mesmas condições operacionais. Para isto se considerou a linha sem Operações Automáticas ou Tarefas Comuns, aplicando as mesmas simplificações utilizadas por Marcilio e Skraba (2010).

Posteriormente, torna-se necessário determinar, separadamente, os efeitos das Operações Automáticas e das Tarefas Comuns no balanceamento da linha de montagem. Ressalta-se que nas Seções 4.4 e 4.5 não se objetiva avaliar quais tarefas podem ser consideradas de fato Operações Automáticas ou Tarefas Comuns. Busca-se, *a priori*, entender as influências que essas considerações podem exercer no balanceamento da linha estudada.

Por fim, deve-se determinar quais das tarefas existentes na linha estudada por Marcilio e Skraba (2010) podem ser consideradas Operações Automáticas e quais podem ser classificadas como Tarefas Comuns. Realizou-se uma análise criteriosa r das descrições das operações realizadas na linha, detalhadas em Marcilio e Skraba (2010), de forma a se tornar possível inferir essas condições. Após essas definições torna-se necessário avaliar os efeitos conjuntos que essas considerações de Operações Automáticas e Tarefas Comuns impõem ao balanceamento da linha.

### 4.1 Roteiro dos Estudos

O Quadro 11 a seguir traz um roteiro dos estudos que serão realizados nas seções subsequentes de forma a estabelecer um resumo de suas descrições e objetivos.

**Quadro 11 – Roteiro dos estudos realizados e seus objetivos**

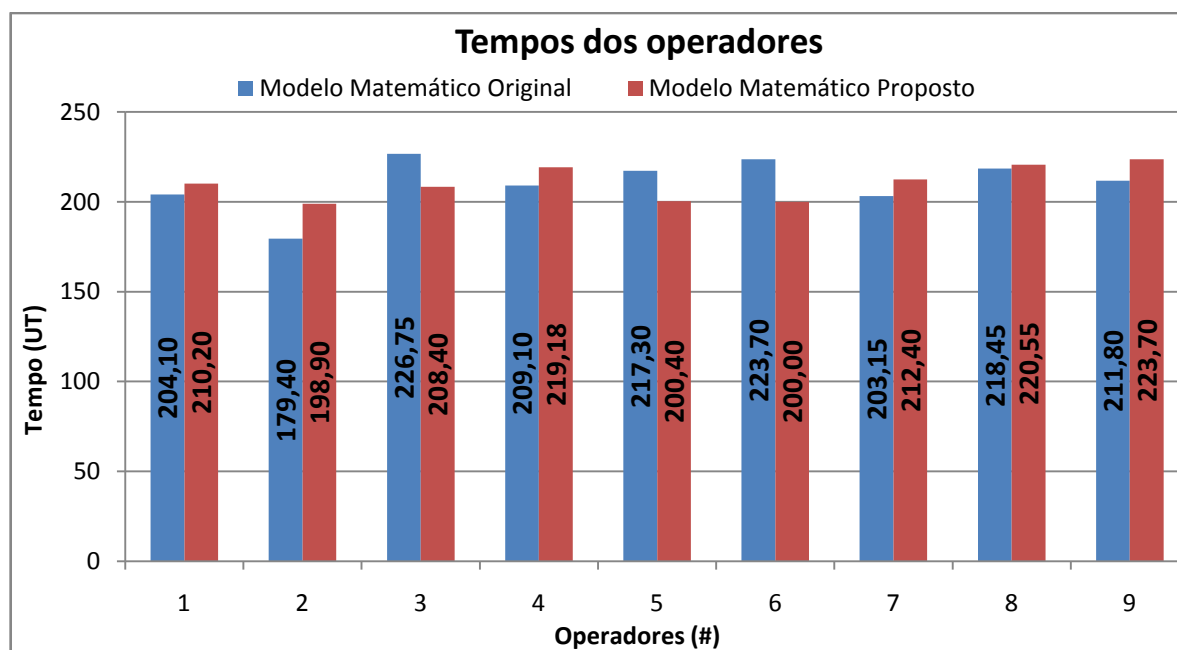
<b>Seção</b>	<b>Descrição</b>	<b>Objetivo</b>
<b>4.2</b>	Avaliação do problema original	Comparar o resultado do modelo proposto com um dos resultados obtidos por Marcilio e Skraba (2010) com o modelo original.
<b>4.3</b>	Definição de um resultado de referência	Definir um resultado no modelo proposto que é utilizado como base de comparação para os demais estudos.
<b>4.4.1</b>	Estudo AT-1: Efeitos da alocação de Operações Automáticas no Posto Gargalo	Avaliar os potenciais efeitos no balanceamento da linha gerados pela existência de uma Operação Automática alocada no Posto Gargalo.
<b>4.4.2</b>	Estudo AT-2: Efeitos de Operações Automáticas com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo	Avaliar os potenciais efeitos gerados no balanceamento da linha quando as duas tarefas com maior tempo de execução, ambas alocadas fora do Posto Gargalo, são consideradas automáticas.
<b>4.4.3</b>	Estudo AT-3: Comparação dos efeitos da alocação de Operações Automáticas dentro e fora do Posto Gargalo	Avaliar as diferenças entre os efeitos gerados no balanceamento da linha por Operações Automáticas que são alocadas dentro e fora do Posto Gargalo.
<b>4.4.4</b>	Estudo AT-4: Operações Automáticas em postos com somente uma tarefa alocada	Avaliar a designação de tarefas aos operadores associados a postos de trabalho que tem apenas Operações Automáticas.
<b>4.5.1</b>	Estudo CnT-1: Efeitos da alocação de Tarefas Comuns no Posto Gargalo	Avaliar os potenciais efeitos no balanceamento da linha gerados pela existência de uma Tarefa Comum alocada no Posto Gargalo.
<b>4.5.2</b>	Estudo CnT-2: Efeitos de Tarefas Comuns com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo	Avaliar os potenciais efeitos gerados no balanceamento da linha quando as duas tarefas com maior tempo de execução, ambas alocadas fora do Posto Gargalo, são consideradas Tarefas Comuns.
<b>4.5.3</b>	Estudo CnT-3: O efeito do número de operadores alocados em uma Tarefa Comum	Avaliar os efeitos no balanceamento da linha gerados pela exigência de mais operadores para a realização de uma mesma Tarefa Comum.
<b>4.5.4</b>	Estudo CnT-4: Avaliação dos efeitos da aplicação de Tarefas Comuns com ganhos no tempo de execução da tarefa	Avaliar os potenciais ganhos no balanceamento da linha que podem ser obtidos pela redução do tempo de execução de uma operação quando esta passa a ser considerada uma Tarefa Comum.
<b>4.6.5</b>	Estudo AT-CnT: Avaliação dos resultados obtidos para o balanceamento da linha de montagem com Operações Automáticas e Tarefas Comuns	A partir das descrições das operações realizadas na linha, inferir quais podem ser consideradas, de fato, Operações Automáticas ou Tarefas Comuns; e avaliar os efeitos gerados no balanceamento da linha quando ambas as condições são presentes simultaneamente na linha.

## 4.2 Avaliação do problema original

Foi avaliada a situação na qual apenas o modelo L2H1 é considerado e a linha conta com 9 operadores e 14 postos de trabalho. Nenhum dos operadores é considerado fixo a algum posto.<sup>4</sup>

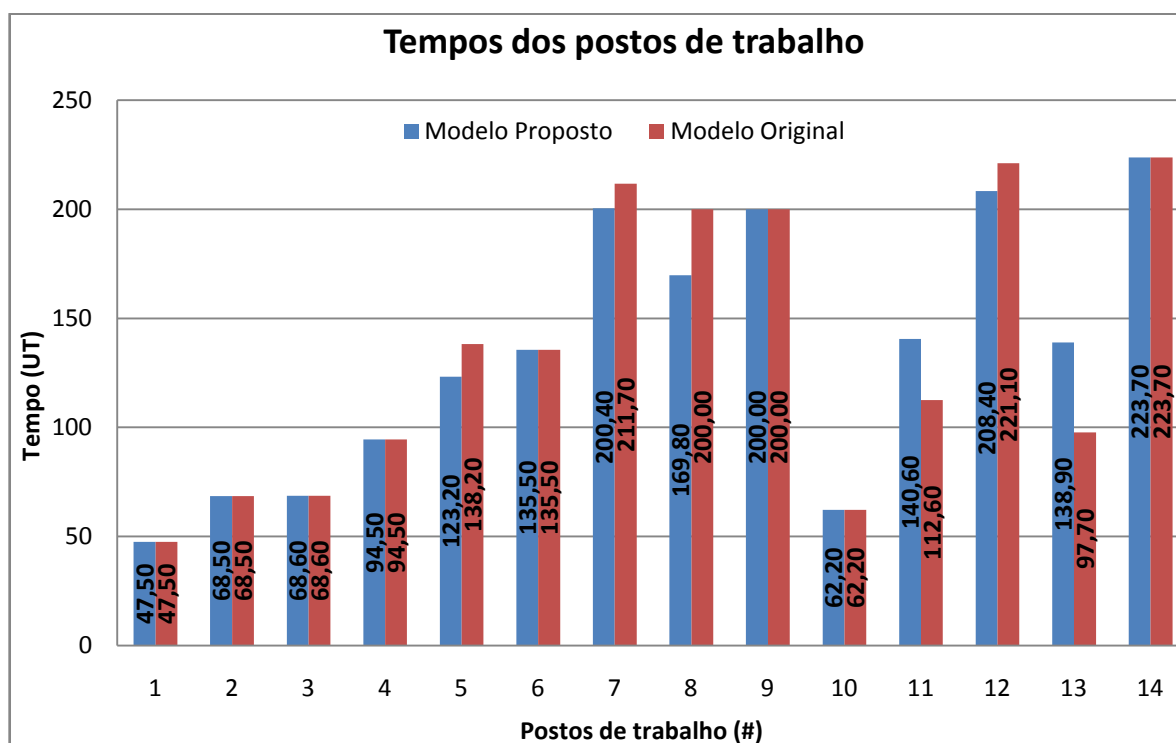
A Figura 20 compara os resultados obtidos pelo Modelo proposto com os obtidos pelo Modelo Original de Marcilio e Skraba (2010) para a distribuição dos tempos dos operadores e a Figura 21 expõe os resultados dos dois modelos para a distribuição dos tempos dos postos de trabalho. Adicionalmente, a Tabela 12 compara os índices obtidos no balanceamento dos operadores e a Tabela 13 os índices obtidos no balanceamento dos postos de trabalho.

Evidencia-se ao longo dos resultados, principalmente na Tabela 12 e na Tabela 13, que o modelo proposto apresenta resultados com menores Tempo de Ciclo, Índices de Suavidade e Atrasos de Balanceamento do que o modelo original. Isto indica resultados de balanceamento, em tese, melhores. Assim, indica-se uma evolução da modelagem proposta em relação à anteriormente apresentada.



**Figura 20 – Comparação dos tempos dos operadores entre o Modelo Proposto e o Modelo Original**

<sup>4</sup> Para mais detalhes ver MARCILIO, I.; SKRABA, M. **Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista**. Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba-PR, 2010. Seção 4.1.4, p. 88.



**Figura 21 – Comparação dos tempos dos postos de trabalho entre o Modelo Proposto e o Modelo Original**

**Tabela 12 – Comparação dos índices obtidos para o balanceamento dos operadores entre o Modelo Proposto e o Modelo Original**

Modelo	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
Original	7,20	63,36	226,75
Proposto	5,94	47,90	223,70

**Tabela 13 – Comparação dos índices obtidos para o balanceamento de postos de trabalho entre o Modelo Proposto e o Modelo Original**

Modelo	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
Original	39,91	408,10	223,70
Proposto	39,91	397,72	223,70

Nota-se que os resultados são próximos, com ligeira melhora no resultado obtido pelo modelo proposto. No balanceamento dos operadores houve redução no Atraso de Balanceamento (de 7,20% para 5,94%), melhora no Índice de Suavidade (de 63,36 UT para 47,90 UT) e redução do Tempo de Ciclo (de 226,75 UT para 223,70 UT). No que tange à distribuição dos tempos dos postos de trabalho manteve-se o mesmo Atraso de Balanceamento (39,91%) e o mesmo Tempo de



Ciclo (223,70 UT), mas houve uma melhora no Índice de Suavidade (de 408,10 UT para 397,72 UT).

Como o tempo de ciclo pode ser determinado tanto pela tarefa com maior tempo de execução quanto pelo operador com maior carga de trabalho pode-se dizer que o Tempo de Ciclo foi, de fato, reduzido de 226,75 UT para 223,70 UT com a utilização do modelo proposto.

O resultado do modelo proposto foi melhor porque o *solver* utilizado, o IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (ILOG-CPLEX, 2013), possibilita uma abordagem de modelagem mais elaborada, conforme exposto na Seção 3.2.7. Essa abordagem resulta em ganhos nos tempos computacionais e, por consequência, permite que se trabalhe com *gaps* de integralidade<sup>5</sup> menores. No modelo aplicado por Marcilio e Skraba (2010) admitia-se um *gap* máximo de 0,1% após aproximadamente 15 minutos de processamento. Já no modelo proposto, para essa resolução, o *gap* máximo foi de 0,01% com tempo de processamento de 11 segundos.

### 4.3 Definição de um resultado de referência

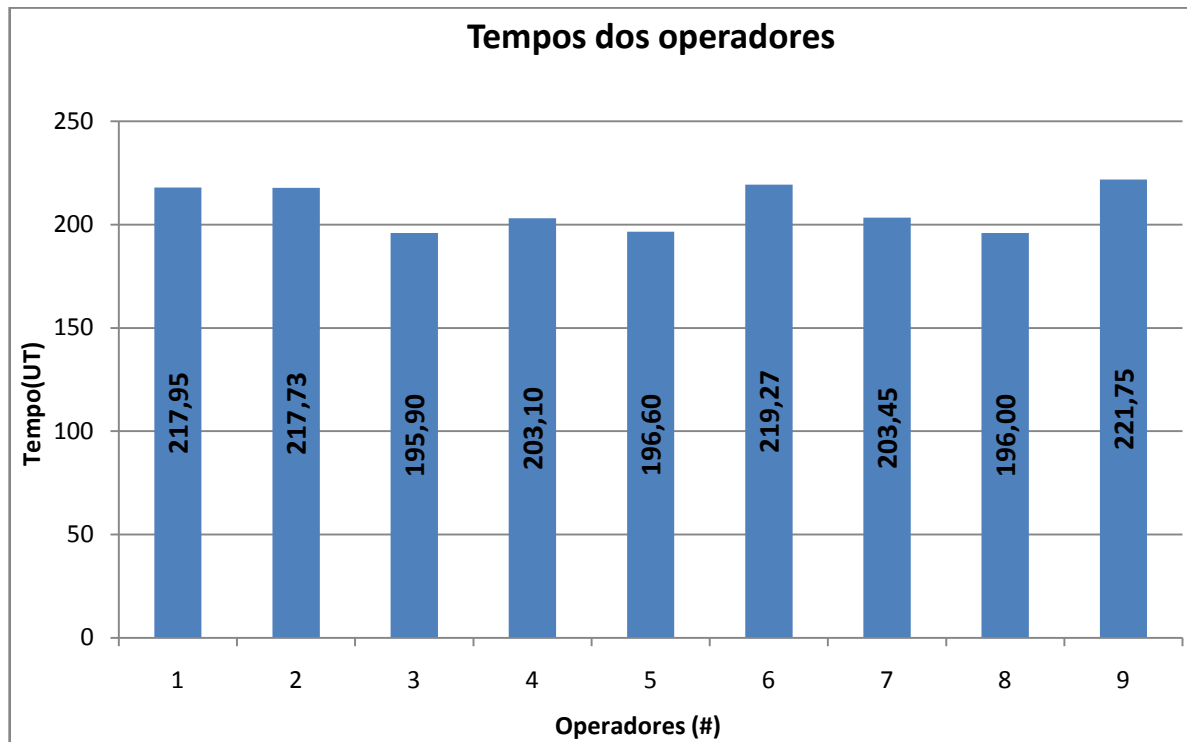
Para avaliar as influências que as considerações de Operações Automáticas e Tarefas Comuns têm, individualmente, no balanceamento da linha estudada, iniciou-se com a definição de um resultado de referência. Essa referência teve como base as características originais da linha de montagem de modelo misto estudada por Marcilio e Skraba (2010), conforme exposto na Seção 3.1. Focou-se nas operações a serem realizadas pelos 9 operadores da linha, sem a utilização do posto robotizado adjacente à linha como um operador adicional alocado de forma fixa em uma estação adicional. Esta inclusão desoneraria a carga de trabalho dos 9 operadores, e o objetivo foi avaliar um cenário mais crítico em termos de carga de trabalho. Os dados presentes no cenário do modelo original foram, então aplicados ao modelo proposto e gerou-se um resultado que foi utilizado como referência para a avaliação dos efeitos causados pelas Operações Automáticas, Seção 4.4. Esse mesmo resultado será utilizado na Seção 4.5 para avaliar as Tarefas Comuns.

---

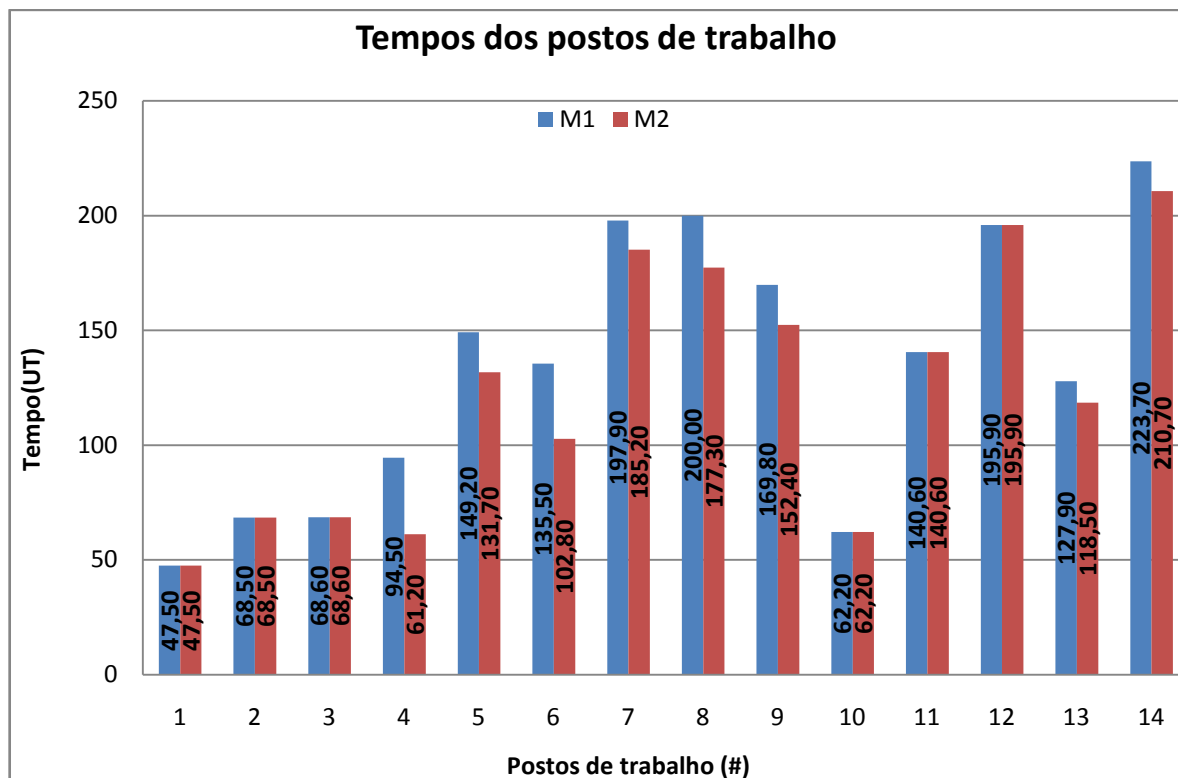
$|(zr - zo)/zo|$ , onde  $zr$  é a solução inicial (relaxada) de programação linear utilizada pelo branch-and-bound e  $zo$  é a solução ótima obtida. Para uma explanação completa, recomenda-se consulta a: WOLSEY, L. A. (1998). *Integer Programming*. John Wiley & Sons, New York.

A Figura 22 abaixo mostra a distribuição dos tempos dos operadores e a Figura 23 mostra a distribuição dos tempos dos postos de trabalho para esse resultado de referência. A Tabela 14 explicita os índices de balanceamento alcançados.

Ressalta-se que o resultado obtido apresenta um *gap* de integralidade máximo de 0,01%, com um tempo de processamento de 6 segundos. A plataforma computacional utilizada ao longo dos experimentos é um computador *Intel® Pentium™ Dual-Core CPU E6500, 2,93Ghz (2CPUs), 2GB RAM, plataforma Windows 7 Ultimate 64 bits*.



**Figura 22 – Tempos dos operadores para o balanceamento de referência sem Operações Automáticas ou Tarefas Comuns**



**Figura 23 – Tempos dos postos de trabalho para o balanceamento de referência sem Operações Automáticas ou Tarefas Comuns**

**Tabela 14 – Índices obtidos para o balanceamento de referência**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Operadores</b>	6,21	51,81	221,75
<b>Postos</b>	40,16	393,76	221,75

#### 4.4 Avaliação dos efeitos causados pelas Operações Automáticas no balanceamento da linha

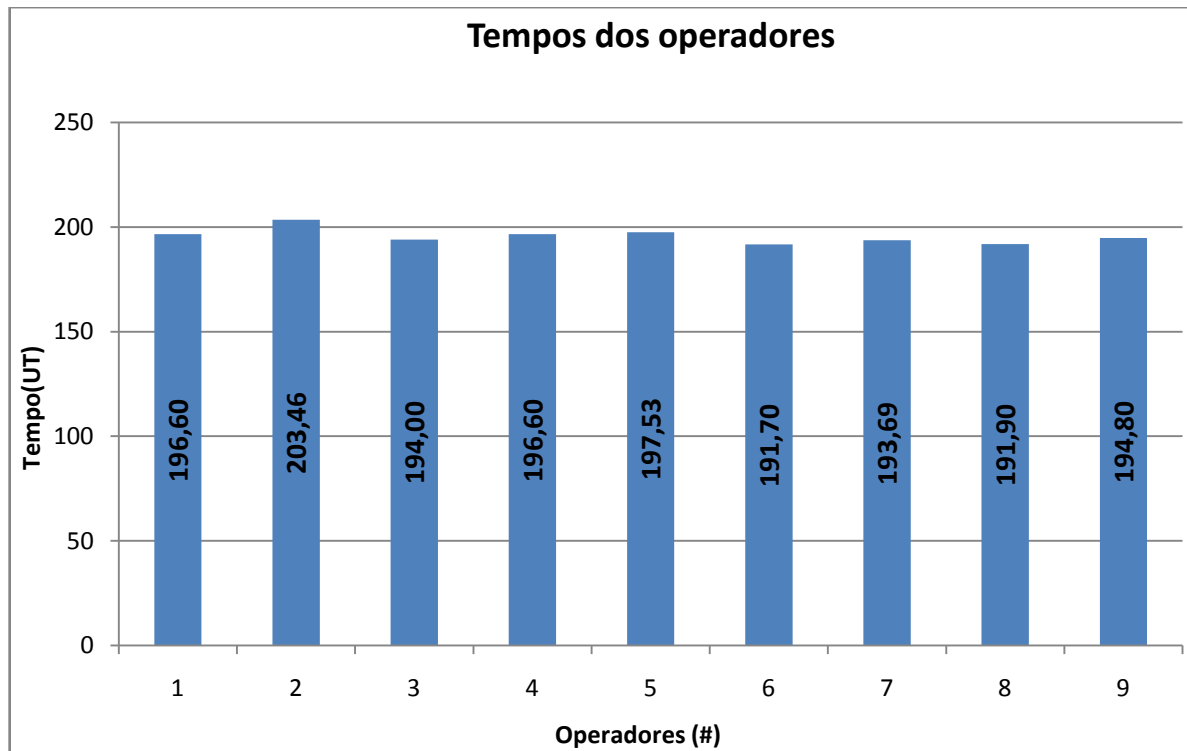
##### 4.4.1 Estudo AT-1: Efeitos da alocação de Operações Automáticas no Posto Gargalo

Neste estudo busca-se determinar quais são os efeitos gerados pela presença de Operações Automáticas no Posto Gargalo da linha. Conforme resultado de referência exposto na Seção 4.3, o gargalo da linha é o posto 14 (tempos de ciclo de 223,7 UT para M1 e 210,7 UT para M2, logo, tempo de ciclo ponderado pelas demandas ou tempo equivalente:  $223,7 * 0,85 + 210,7 * 0,15 = 221,75$  UT).

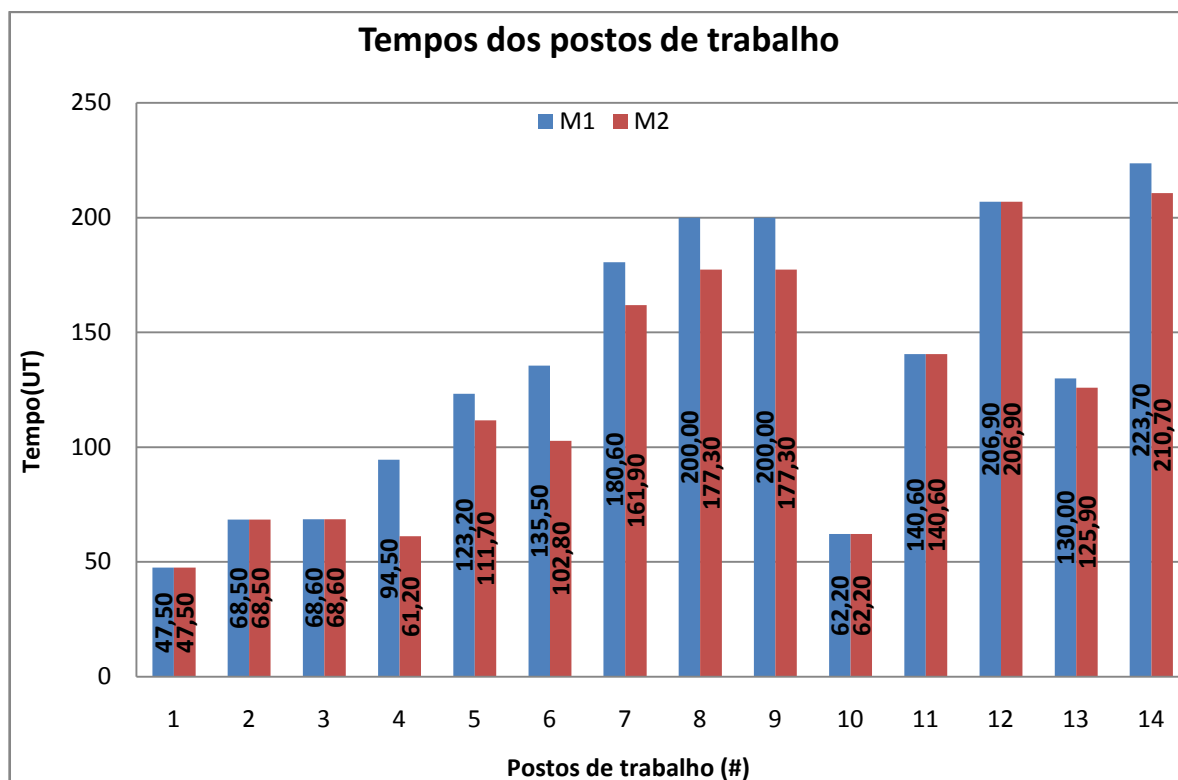
Para se evidenciar as influências que Operações Automáticas exercem quando alocadas no Posto Gargalo escolheu-se considerar uma das tarefas alocadas no

posto 14 como Operação Automática. No caso, a tarefa 64, a qual apresenta o maior tempo de execução (109 UT) dentre as tarefas alocadas neste posto.

O resultado obtido nesta proposição para o balanceamento dos tempos dos operadores é mostrado na Figura 24. A Figura 25 expõe o resultado para o balanceamento dos tempos dos postos de trabalho e a Tabela 15 traz os índices de balanceamento resultantes.



**Figura 24 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-1**



**Figura 25 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-1**

**Tabela 15 – Índices de balanceamento obtidos para o Estudo AT-1**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Operadores</b>	3,87	25,71	203,46
<b>Postos</b>	40,16	396,74	221,75

Houve melhora em todos os índices no balanceamento de operadores e uma pequena piora no Índice de Suavidade no balanceamento dos postos de trabalho. Ressalta-se que, considerando a tarefa 64 automática, há uma influência maior no balanceamento dos operadores do que no balanceamento dos postos.

No balanceamento dos operadores o Atraso de Balanceamento foi reduzido de 6,21% na Referência (Tabela 14) para 3,87%, o valor do Índice de Suavidade apresentou uma diminuição<sup>6</sup> de 51,81 UT na Referência para 25,71 UT e o tempo de ciclo baixou de 221,75 UT na Referência para 203,46 UT. Já para o balanceamento dos postos de trabalho, o Atraso de Balanceamento e o Tempo de Ciclo mantiveram-

<sup>6</sup> Deve-se ter em mente que para o Índice de Suavidade é sempre desejável se obter o menor valor possível.

se os mesmos, 40,16% e 221,75 UT, respectivamente, enquanto o Índice de Suavidade cresceu ligeiramente de 393,76 UT para 396,74 UT.

Nota-se que a carga de trabalho do operador associado ao posto gargalo foi reduzida. Isto não significou, no entanto, uma verdadeira redução no tempo de ciclo, pois o tempo máximo entre os postos de trabalho se manteve o mesmo da Referência (221,75 UT).

Pode-se inferir a partir dos resultados do Estudo AT-1 que a existência de Operações Automáticas no Posto Gargalo reduz a carga de trabalho do operador alocado no posto, mas que o tempo total do posto não é alterado. De fato, quando uma tarefa é automática, seu tempo de execução não é contabilizado no tempo do operador por não depender da ação dele para sua realização, mas ela se mantém onerando o tempo total do posto na qual ela está alocada.

Assim, em síntese, o Estudo de Caso AT-1 indica que se a tarefa 64 for considerada como uma Operação Automática há uma potencial diminuição do tempo de ciclo dos operadores de 221,75 UT (resultado de referência) para 203,46 UT. Contudo, o tempo de ciclo da linha como um todo ainda permanece em 221,75 UT, limitado pela ocupação do posto gargalo (posto 14). O *gap* de integralidade máximo foi de 0,01% e o tempo de processamento foi de 9 segundos.

#### **4.4.2 Estudo AT-2: Efeitos de Operações Automáticas com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo**

Para o segundo estudo de Operações Automáticas considerou-se as tarefas 32 e 35. Estas operações são análogas e tem os mesmos tempos de execução. A tarefa 32 é realizada no Posto 8: “*Lateral Esquerda*” e a tarefa 35 é realizada no Posto 9: “*Lateral Direita*”. Seus tempos de execução são de 156,5 UT para o modelo L2H1 e 139,1 UT para o modelo L1H1.

A Figura 26 traz os resultados obtidos para o balanceamento dos operadores e a Figura 27 mostra a distribuição dos tempos dos postos de trabalho nesse caso. A Tabela 16 traz os índices de balanceamento obtidos.

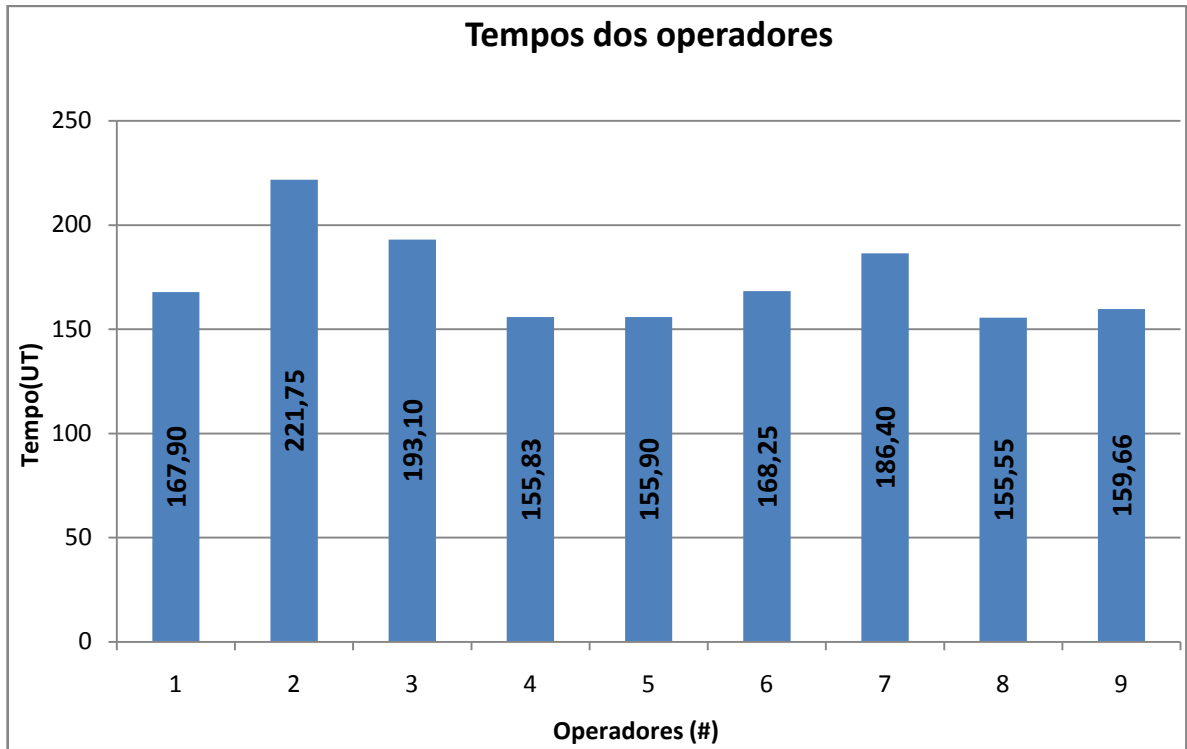


Figura 26 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-2

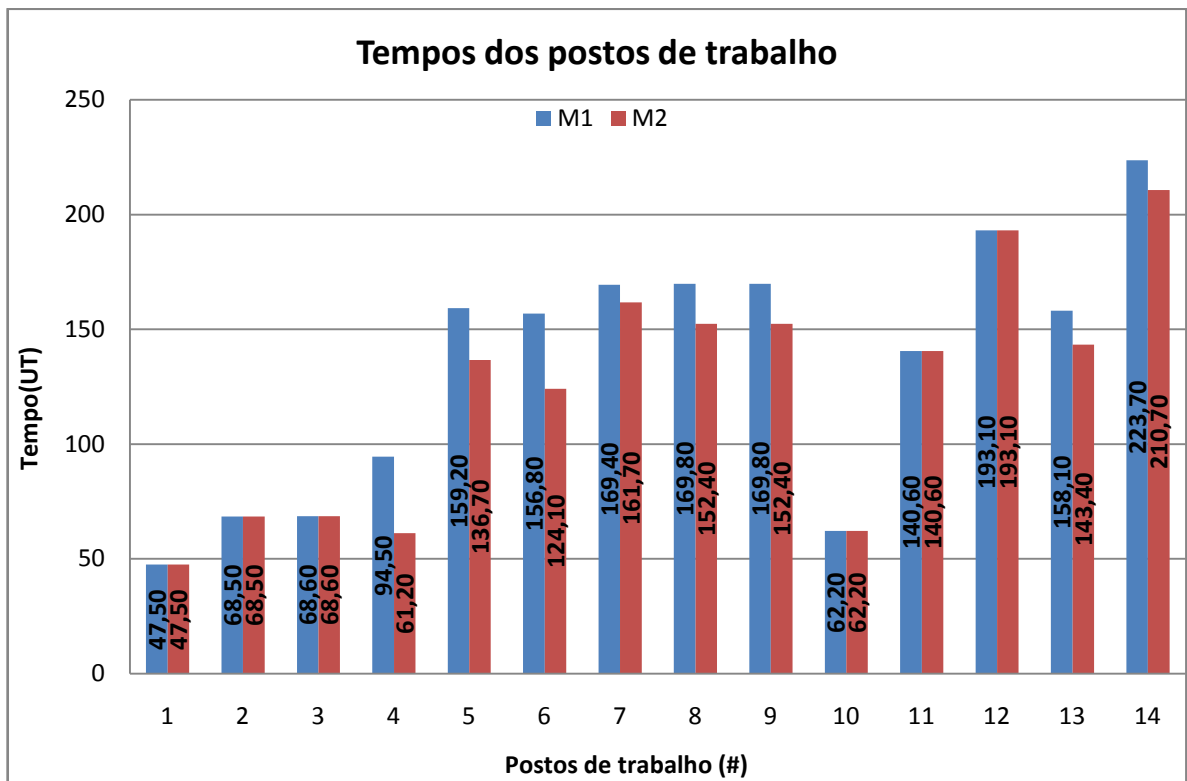


Figura 27 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-2

**Tabela 16 – Índices de balanceamento obtidos para o Estudo AT-2**

	<b>Atraso de Balanceamento (%)</b>	<b>Índice de Suavidade (UT)</b>	<b>Tempo de Ciclo (UT)</b>
<b>Operadores</b>	21,62	157,34	221,75
<b>Postos</b>	40,16	387,65	221,75

Avaliando os resultados obtidos para o Estudo AT-2 percebe-se características diferentes das encontradas no Estudo AT-1. O resultado do balanceamento dos operadores foi pior no Estudo AT-2 do que o obtido no Estudo AT-1 e ainda pior do que o resultado de referência. O Atraso de Balanceamento e o Índice de Suavidade cresceram sensivelmente, de 6,21% para 21,62% e de 51,81 UT para 157,34 UT, respectivamente, apesar do tempo de ciclo se manter o mesmo da referência (221,75 UT), ou seja, maior do que no Estudo AT-1.

Já para o balanceamento dos postos de trabalho houve um ganho, ainda que pequeno, em relação à referência. O Índice de Suavidade foi reduzido de 393,76 UT para 387,65 UT com o Atraso de Balanceamento e o Tempo de Ciclo se mantendo constantes.

Os Estudos AT-1 e AT-2, ainda que apresentem resultados de suavidade inversos entre os postos (aumento em relação à Referência para AT-1 e redução para AT-2), apresentam uma característica comum. Em ambos os estudos, o balanceamento dos postos foi muito menos influenciado pela existência de Operações Automáticas na linha do que o balanceamento dos operadores. Isso ocorre porque as Operações Automáticas reduzem a carga do operador a ela relacionado, mas mantém seu tempo de execução associado ao posto, conforme descrito na Seção 4.4.1 acima.

O máximo *gap* de integralidade para a solução do Estudo AT-2 foi de 0,01% e o tempo de processamento foi de 22 segundos.

Em síntese, o Estudo AT-2, não apresentou ganhos potenciais ao balanceamento da linha. Exceto pela pequena redução no Índice de Suavidade dos postos, todos os demais resultados foram desfavoráveis e o Tempo de Ciclo se manteve o mesmo da Referência.

Analisando o Estudo AT-2 em conjunto com o Estudo AT-1, pode-se sugerir que o tempo de ciclo dos operadores somente é reduzido se houver alguma



Operação Automática no Posto Gargalo. Esse fato é mais explorado no Estudo AT-3 a seguir apresentado.

#### 4.4.3 Estudo AT-3: Comparação dos efeitos da alocação de Operações Automáticas dentro e fora do Posto Gargalo

Para confirmar se, de fato, Operações Automáticas somente geram redução na máxima carga de trabalho dos operadores se ao menos uma estiver alocada no Posto Gargalo, avaliou-se no Estudo AT-3 duas condições opostas:

- (a) Levando-se em conta as cinco tarefas com maior tempo de execução, exceto as que estejam associadas ao posto 14 (Posto Gargalo);
- (b) Considerando-se apenas a tarefa com menor tempo de execução no posto 14.

A Tabela 17 abaixo mostra as tarefas consideradas Operações Automáticas na condição (a).

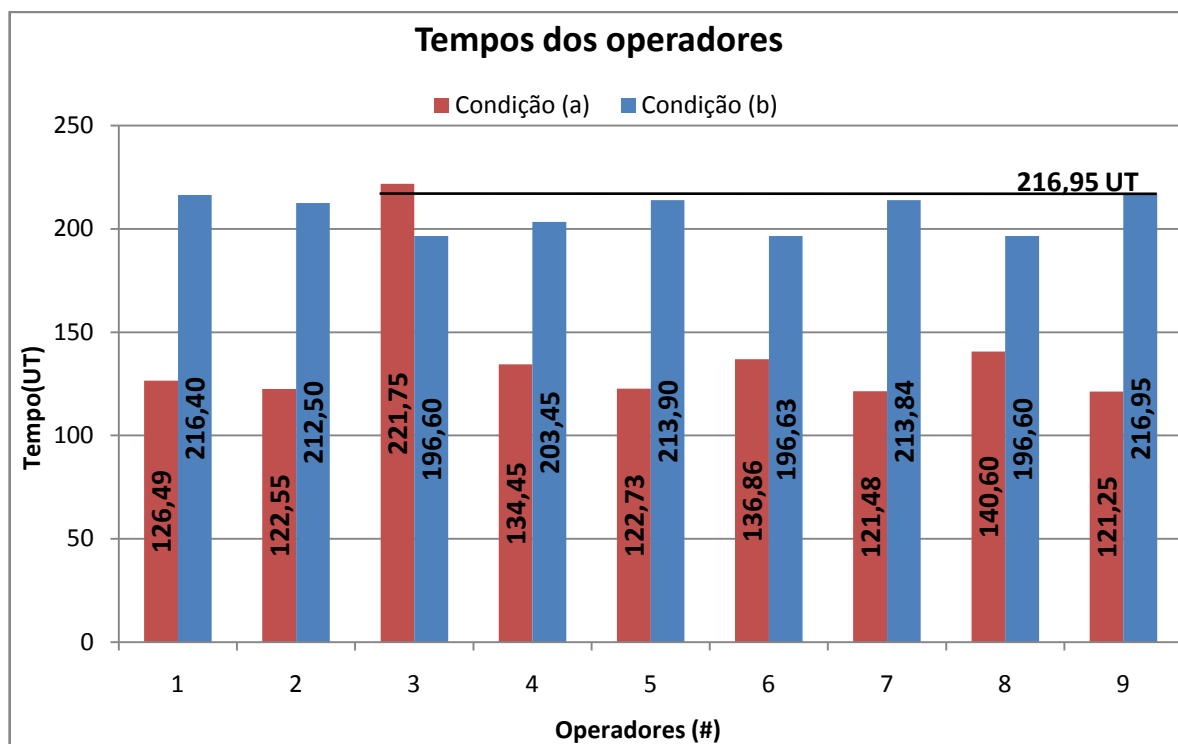
**Tabela 17 – Tempos de execução das cinco tarefas mais longas não associadas ao posto 14**

Estação de trabalho	Tarefa	Tempo de operação L2H1 (UT)	Tempo de operação L1H1 (UT)	Tempo de operação equivalente (UT)
<b>Estação 8 – Lateral Esquerda</b>	32	156,5	139,1	153,89
<b>Estação 9 – Lateral Direita</b>	35	156,5	139,1	153,89
<b>Estação 6 – Assoalhos central e frontal</b>	21	127,5	94,8	122,60
<b>Estação 12 – Geometria</b>	45	100,8	100,8	100,8
<b>Estação 7 – Junção dos assoalhos e Frontais</b>	24	98,8	91,1	97,65

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

Na condição (b) considerou-se automática apenas a tarefa 70, cujo tempo de execução é de 4,8 UT para ambos os modelos produzidos na linha.

A Figura 28 mostra os resultados obtidos para os tempos dos operadores nas condições (a) e (b). Os resultados do balanceamento dos postos de trabalho foram omitidos por não apresentarem mudanças significativas, pois, como indicado nos Estudos AT-1 e AT-2, as Operações Automáticas causam pouco impacto no balanceamento dos postos de trabalho. Para a condição (a) o tempo de processamento foi limitado em 30 segundos e o *gap* de integralidade máximo obtido foi de 0,1%. Para a condição (b) o *gap* foi de 0,01% após 9 segundos de processamento.



**Figura 28 – Comparação dos tempos dos operadores as condições (a) e (b) do Estudo AT-3**

Observando-se a Figura 28 nota-se claramente que 8 dos 9 operadores tiveram uma carga de trabalho menor na condição (a), mas o tempo máximo (tempo de ciclo) é menor na condição (b). Isso fica explícito nos dados expostos na Tabela 18 abaixo.

**Tabela 18 – Comparação dos Índices de balanceamento obtidos para as condições (a) e (b) do Estudo AT-3**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Condição (c)</b>	37,46	265,12	221,75
<b>Condição (d)</b>	4,39	38,25	216,95

Comparando-se a condição (a), com cinco Operações Automáticas totalizando um tempo de execução de 628,83 UT, e a condição (b), com apenas uma Operação Automática com tempo de execução de 4,8 UT, nota-se que aquela não apresentou redução no Tempo de Ciclo, o que ocorreu nesta. Na condição (b) o Tempo de Ciclo obtido foi de 216,95 UT, frente a 221,75 UT na Referência e na condição (a). Esse resultado evidencia que não é possível se obter uma redução no Tempo de Ciclo dos operadores caso não existam Operações Automáticas alocadas no Posto Gargalo da linha.

Além disso, devido à redução maciça nos tempos da maioria dos operadores, os índices de Atraso de Balanceamento e Índice de Suavidade da condição (a), 37,46% e 265,12 UT respectivamente, se tornaram muito maiores do que os valores obtidos na condição (b), 4,39% e 38,25 UT respectivamente (6,21% e 51,81 UT na Referência).

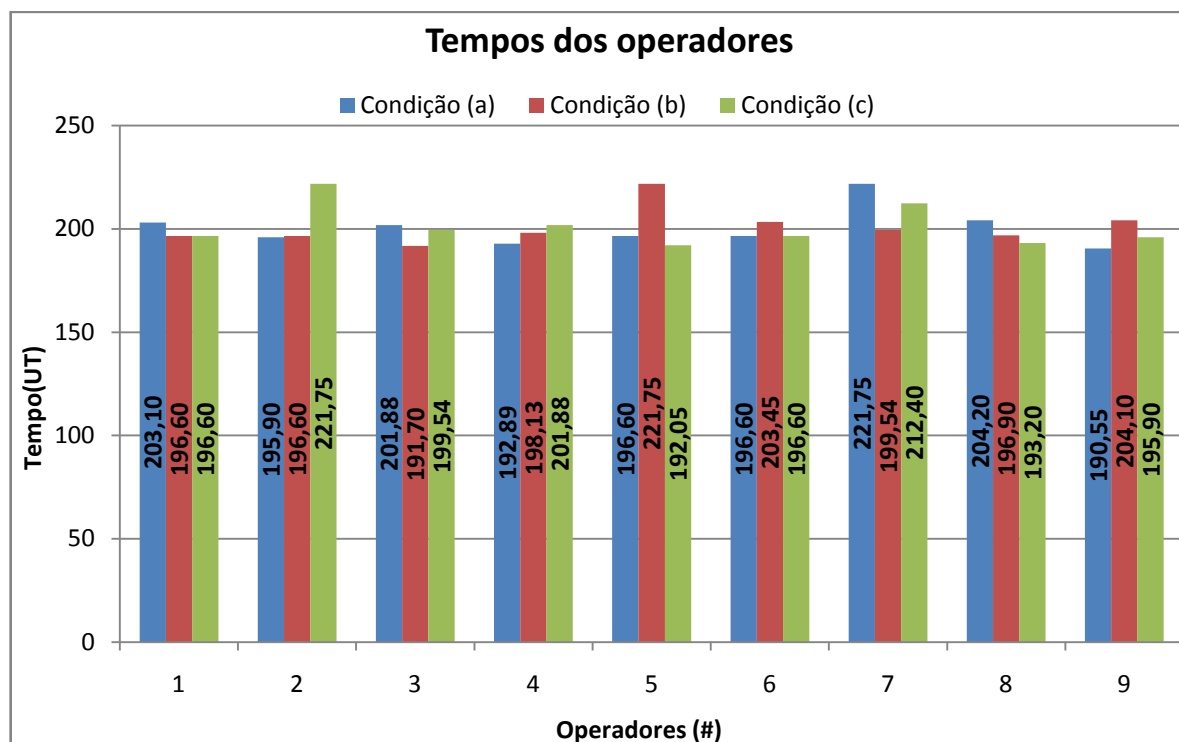
Em resumo, a análise do Estudo AT-3, indica que somente há potencial para redução no tempo de ciclo dos operadores se houver pelo menos uma Operação Automática alocada no Posto Gargalo da Linha. Caso contrário, somente se obtém soluções com maiores desequilíbrios na carga de trabalho dos operadores e que não trazem ganhos de tempo de ciclo.

#### **4.4.4 Estudo AT-4: Operações Automáticas em postos com somente uma tarefa alocada**

Neste estudo objetiva-se visualizar o que ocorre quando a única tarefa alocada em um posto de trabalho é uma Operação Automática. Na linha estudada existem três postos nos quais há somente uma tarefa: os postos 2, 3 e 10. As tarefas alocadas e fixas nesses postos são, respectivamente, as tarefas 5, 6 e 38. Pode-se resumir cada uma dessas condições de teste da seguinte forma:

- (a) A Tarefa 5, fixa ao posto 2, é considerada uma Operação Automática;
- (b) A Tarefa 6, fixa ao posto 3, é considerada uma Operação Automática;
- (c) A Tarefa 38, fixa ao posto 10, é considerada uma Operação Automática.

Os resultados do balanceamento dos operadores para as três condições são mostrados na Figura 29 abaixo. Os índices de balanceamento obtidos estão descritos na Tabela 19. Os tempos de processamento foram de 8 segundos para a condição (a), 9 segundos para a condição (b) e 7 segundos para a condição (c). Nos três casos o máximo *gap* de integralidade foi de 0,01%.



**Figura 29 – Comparação dos tempos dos operadores as condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4**

**Tabela 19 – Comparação dos Índices de balanceamento obtidos para as condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Condição (a)</b>	9,64	69,22	221,75
<b>Condição (b)</b>	9,37	66,97	221,75
<b>Condição (c)</b>	9,31	67,88	221,75

Os resultados apurados são bastante próximos, o que é razoável tendo em vista que as operações 5, 6 e 38 têm tempos de execução parecidos: 68,5 UT, 68,6 UT e 62,2 UT respectivamente. Em todas as condições o Atraso de Balanceamento, 9,64%, 9,37% e 9,31% nas condições (a), (b) e (c) respectivamente, e o Índice de Suavidade, 69,22 UT, 66,97 UT e 67,88 UT para (a), (b) e (c) respectivamente, foram maiores do que na Referência (6,21% e 51,81 UT).

Outra avaliação a ser realizada nesse Estudo é relativa à alocação dos operadores associados ao posto no qual está fixa a Operação. É natural que este operador realize tarefas em outros postos, pois ele não executa, de fato, as tarefas que são automáticas e, portanto, sua carga de trabalho relativa a esse posto é apenas consequência do seu deslocamento até o posto. Esse deslocamento é

necessário para que a operação seja iniciada corretamente, como na seleção do modelo de cabine que está sendo produzida por meio de uma chave seletora, por exemplo. Em situações deste tipo, na linha de estudo, se considera que o tempo da ação do operador é desprezível e considera-se apenas o tempo do seu deslocamento até o posto.

A Tabela 20 abaixo indica, para as condições (a), (b) e (c), a alocação dos operadores nos postos de trabalho e as tarefas às quais eles estão associados em cada posto.

**Tabela 20 – Alocação das tarefas entre os operadores associados ao posto com Operação Automática nas condições (a), (b) e (c) do Estudo AT-4**

	<b>Operador associado ao posto com Operação Automática</b>	<b>Postos associados ao operador</b>	<b>Tarefas designadas ao operador em cada posto</b>
<b>Condição (a)</b>	4	2	5
		4	7, 8, 9, 10, 11, 12
		13	44, 47, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62
<b>Condição (b)</b>	4	3	6
		5	13, 14, 16, 18, 19, 20
		10	38
<b>Condição (c)</b>	5	7	15, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31
		10	38

Outro ponto considerado ainda no Estudo AT-4 é a simulação de um posto de trabalho totalmente automatizado na linha, retirando a necessidade do deslocamento de um operador até o posto para tomar qualquer ação para que a tarefa seja iniciada. Para avaliar essa situação simulou-se a condição teste (d):

- (d) Um dos 9 operadores (operador 4) é fixo no posto 3, e permanece atrelado à tarefa automática 6, única tarefa a ser realizada no posto. Simula-se, assim, um posto de trabalho totalmente automatizado, por exemplo, um posto robotizado.

O resultado do balanceamento dos 8 operadores restantes para esse caso, condição (d), pode ser visto na Figura 30 e o resultado do balanceamento dos postos de trabalho é mostrado na Figura 31 abaixo. O *gap* de integralidade máximo nesse caso foi delimitado em 3% e o tempo de processamento necessário para se atingir esse resultado foi de aproximadamente 6 minutos.

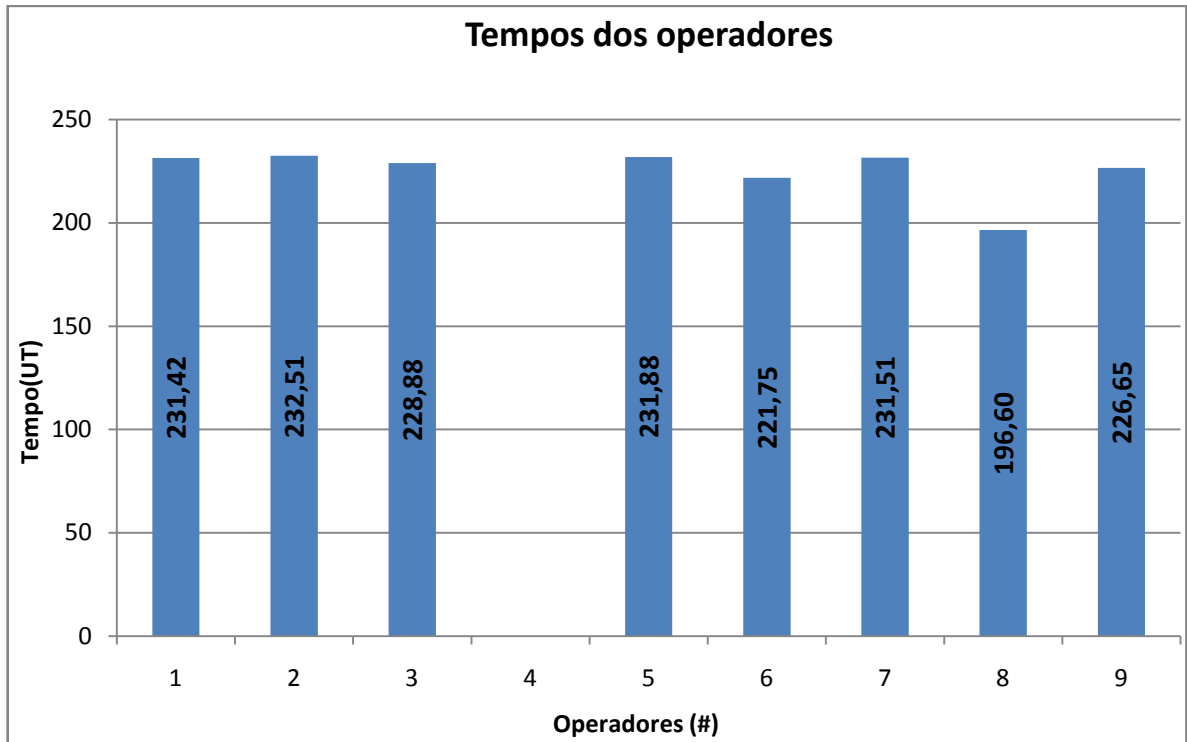


Figura 30 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (d) do Estudo AT-4

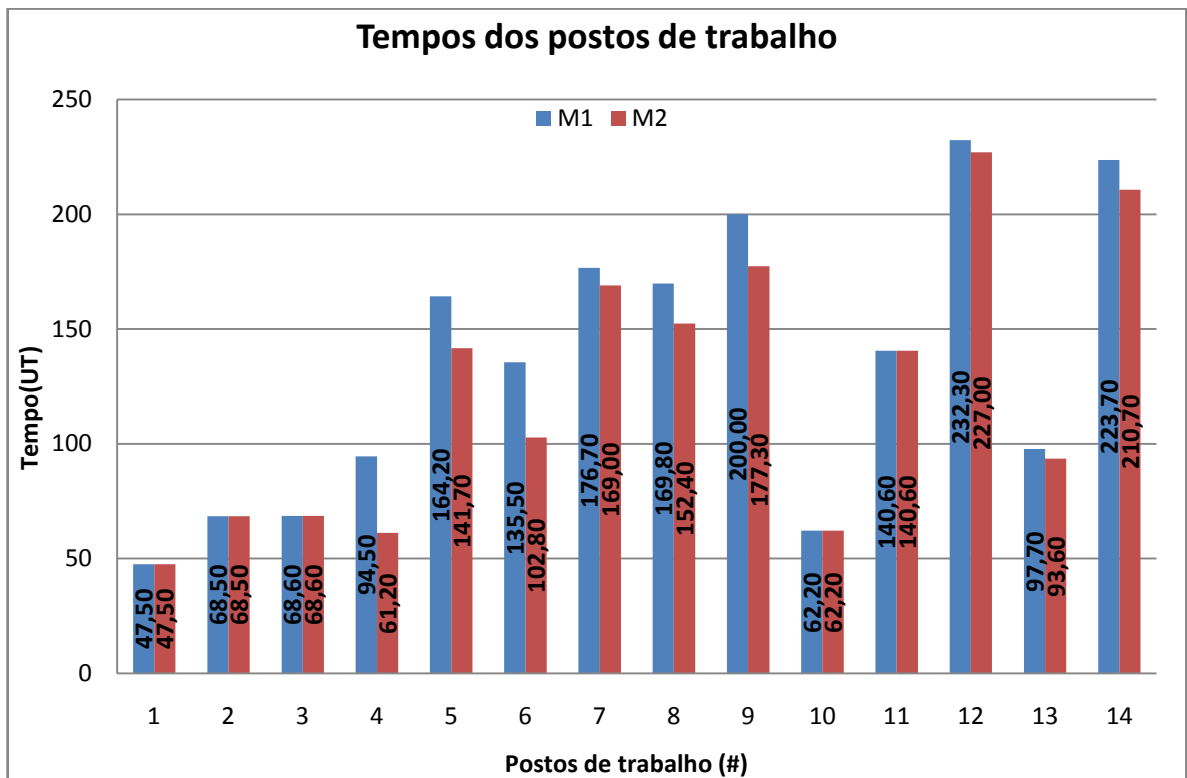


Figura 31 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (d) do Estudo AT-4

Nota-se que o robô, simulado pelo operador fixo ao posto de trabalho, fica com carga de trabalho nula, apesar do tempo de execução da tarefa se manter no tempo total do posto de trabalho (posto 3). Trata-se de uma limitação de representação do modelo, o qual considera apenas tempos de execução manuais atrelados a operadores, pois, como descrito na Seção 3.2.2.1, o foco do presente trabalho é o estudo de casos nos quais as Operações Automáticas dependem da ação de um operador para que sejam iniciadas, ainda que não atuem na execução dessas tarefas.

Em termos conceituais, no intuito de se observar o tempo efetivo do “posto robotizado” no gráfico de tempo dos operadores considerou-se o caso teste (e):

- (e) Desconsiderou-se que a tarefa 6, única tarefa a ser realizada no posto 3, era uma Operação Automática e, de forma semelhante ao que foi feito por Marcilio e Skraba (2010), manteve-se um operador fixo ao posto 4. Em tese, este operador poderia simular a condição de um “operador robô” que realiza a tarefa de forma totalmente automática.

No modelo proposto, a única forma de se avaliar casos como o exposto na condição (d) é manter-se um operador fixo ao posto no qual há somente tarefas realizadas automaticamente, simulando um robô<sup>7</sup>. Esse caso, condição (e), foi simulado e seus resultados, para o balanceamento dos operadores e dos postos de trabalho, respectivamente, são mostrados na Figura 32 e na Figura 33 abaixo. Novamente considerou-se um *gap* de integralidade máximo de 3% e o tempo de processamento ficou na casa dos 6 minutos.

Considerou-se nesse caso que o operador 4 está fixo à estação 3. Como ele executa apenas a tarefa 6, seu tempo total é consideravelmente menor do que os tempos dos demais operadores.

---

<sup>7</sup> Para mais detalhes ver MARCILIO, I.; SKRABA, M. **Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista**. Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba-PR, 2010. Seção 4.1.5, p. 92.

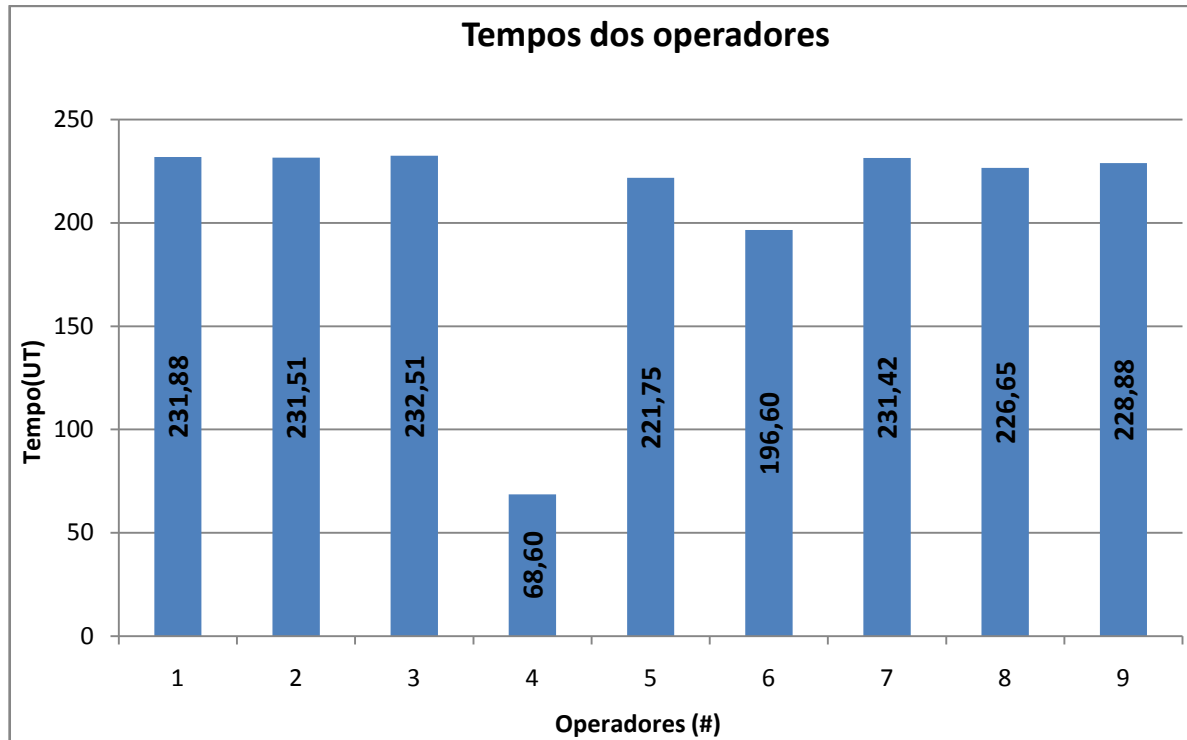


Figura 32 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (e) do Estudo AT-4

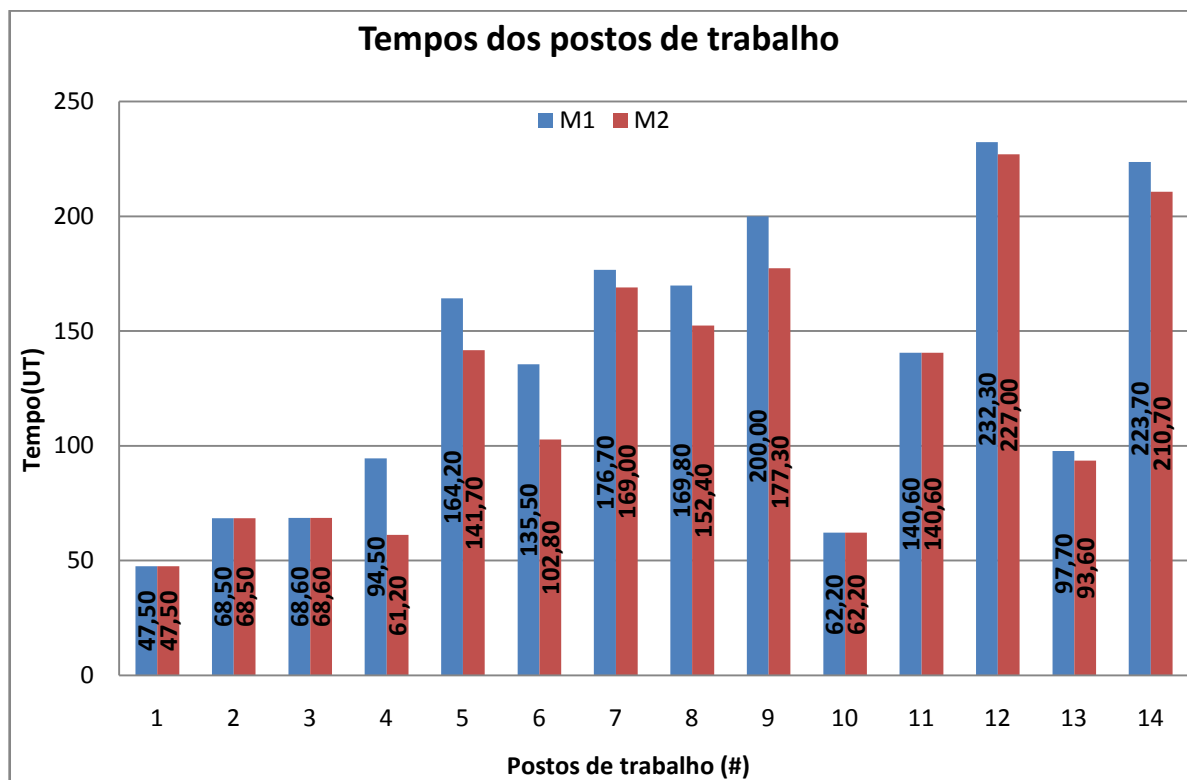
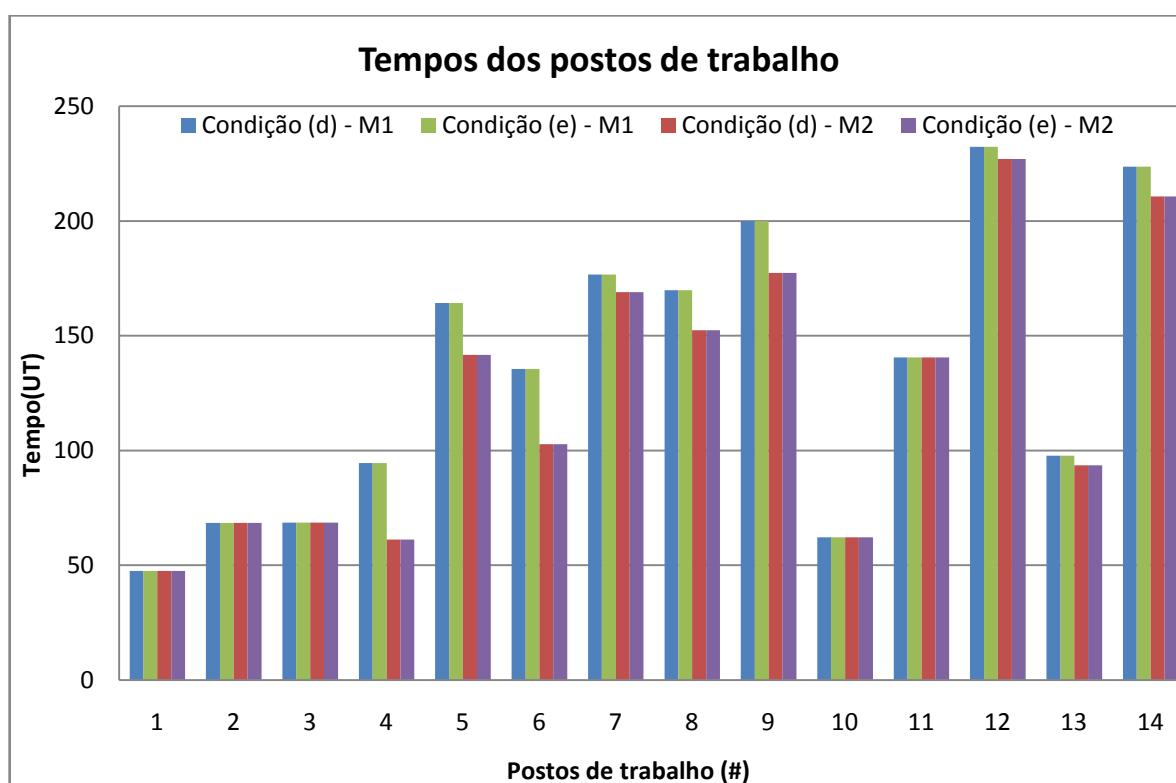


Figura 33 – Tempos dos postos de trabalho para a condição (e) do Estudo AT-4



É importante observar que os tempos dos postos de trabalho na Figura 31 e na Figura 33 são idênticos, o que é evidenciado pela Figura 34 abaixo. Isso indica que o resultado da condição (d) é, em última análise, o mesmo da condição (e). A diferença entre eles é conceitual: enquanto na condição (d) o tempo de execução da tarefa não é somado à carga do operador (robô) por ser uma Operação Automática; na condição (e), ao se desconsiderar a Operação Automática, obtém-se o mesmo resultado, mas o tempo da tarefa é somado à carga de trabalho do robô simulado.



**Figura 34 – Comparação entre os tempos dos postos de trabalho para as condições (d) e (e) do Estudo AT-4**

É importante notar que esses resultados podem ser estendidos também para postos com mais tarefas desde que todas sejam automáticas e fixas ao posto. Pode-se afirmar isso porque um conjunto de operações fixas a um posto pode ser agrupado em um único bloco de tarefas, mantendo-se um resultado igual ao analisado para postos com apenas uma tarefa.

O Estudo AT-4 indica uma característica do modelo proposto já descrita anteriormente na Seção 3.2.2.1. Por exigir a presença de um operador em cada posto de trabalho o modelo proposto fica limitado à representação de Operações

Automáticas que exigem a presença de algum operador para dar início à sua execução.

#### 4.5 Avaliação dos efeitos causados pelas Tarefas Comuns no balanceamento da linha

##### 4.5.1 Estudo CnT-1: Efeitos da alocação de Tarefas Comuns no Posto Gargalo

A primeira avaliação realizada é análoga à realizada na Seção 4.4.1, para Operações Automáticas. Considerou-se, assim, a tarefa 64, a qual é fixa à estação 14, como uma Tarefa Comum que exige o trabalho conjunto de dois operadores para sua realização. A distribuição dos tempos dos operadores obtida nessa simulação pode ser vista na Figura 35, a distribuição dos tempos dos postos de trabalho na Figura 36, e os índices de balanceamento na Tabela 21. Para essa simulação adotou-se um tempo máximo de processamento de 30 segundos. O *gap* de integralidade obtido foi de 2%.

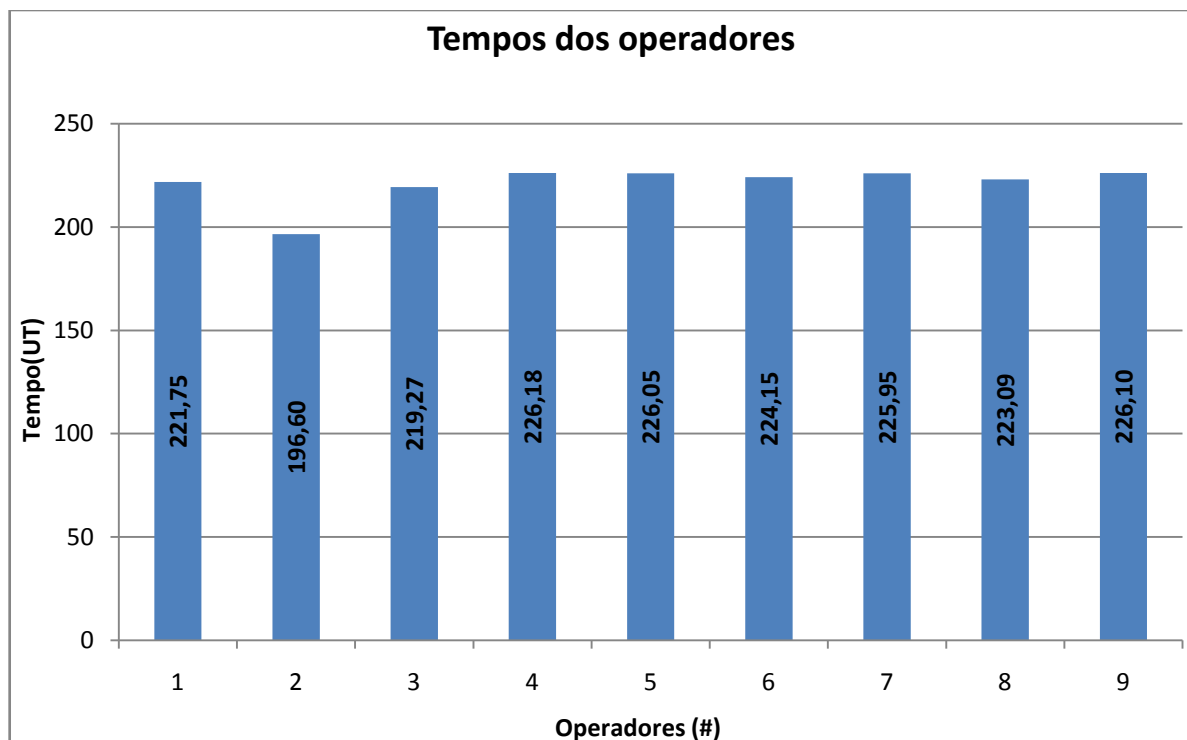
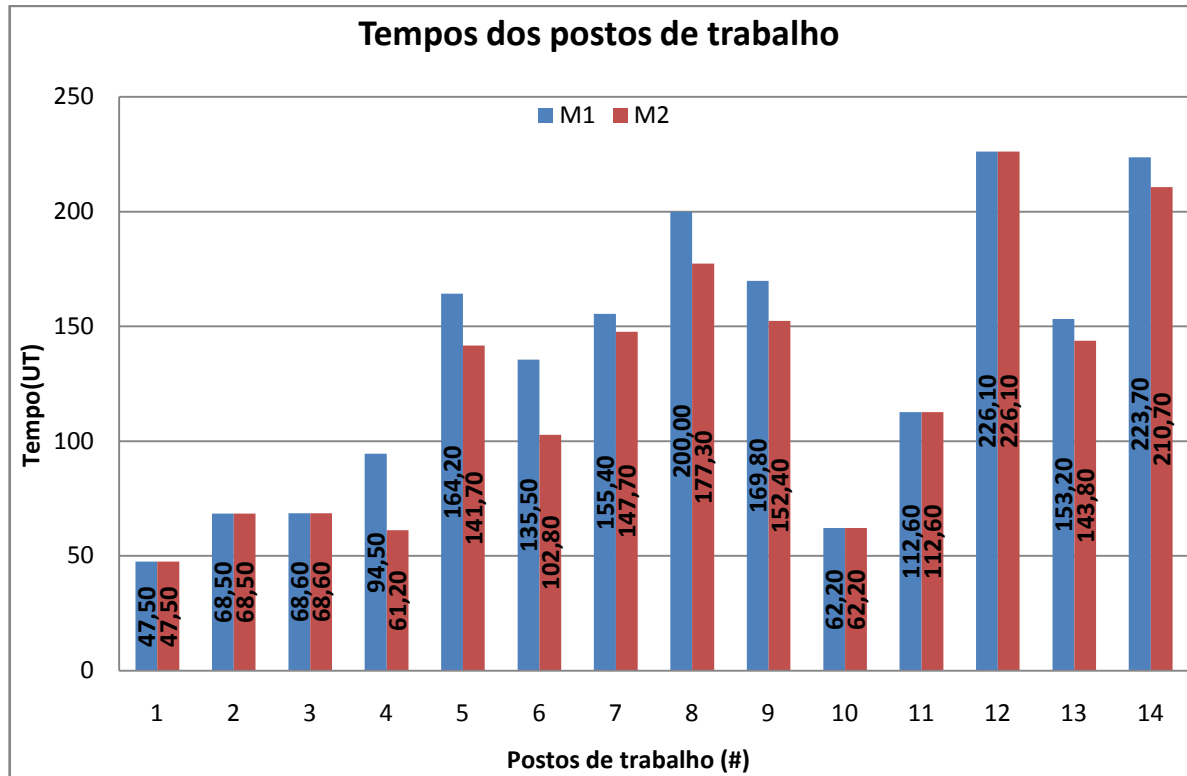


Figura 35 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-1



**Figura 36 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-1**

**Tabela 21 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-1**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Operadores</b>	2,28	30,92	226,18
<b>Postos</b>	41,30	410,77	226,10

O que pode ser notado nesse caso, para o balanceamento dos operadores, é uma tendência à redução no Atraso de Balanceamento e no Índice de Suavidade combinada a um aumento no Tempo de Ciclo. O Atraso de Balanceamento caiu de 6,21% na referência para 2,28%, o Índice de Suavidade foi reduzido de 51,81 UT para 30,92 UT e o Tempo de Ciclo aumentou de 221,75 UT para 226,18 UT.

Para o balanceamento dos postos de trabalho verifica-se um pequeno aumento no Atraso de Balanceamento, de 40,16% para 41,30%, um crescimento no Índice de Suavidade de 393,76 UT para 410,77 UT e um acréscimo no Tempo de Ciclo de 221,75 UT para 226,18 UT.

Um ponto a ser destacado é que o gargalo deixou de ser o posto 14 e passou a ser o posto 12. Conforme nota-se na Tabela 22 abaixo. Com a condição do Estudo

CnT-1 o posto 12 teve uma tarefa a mais alocada e um tempo total de execução 30,2 UT maior.

**Tabela 22 – Comparação entre as tarefas alocadas ao posto 12 na Referência e no Estudo CnT-1**

Referência		Estudo CnT-1	
Tarefa Alocada	Tempo de execução (UT)	Tarefa Alocada	Tempo de execução (UT)
30	2,8	25	9
43	8,8	41	28
45	100,8	43	8,8
46	10	45	100,8
48	14	46	10
49	11	47	7
50	9	48	14
51	29,8	50	9
52	9,7	51	29,8
-	-	52	9,7
<b>Total:</b>	<b>195,9</b>	<b>Total:</b>	<b>226,1</b>
<b>Diferença no tempo total:</b>		<b>30,2 UT</b>	

As tarefas 30 e 49 deixaram de ser realizadas no posto 12 e foram incluídas as tarefas 25, 41 e 47. Considerando-se que a soma dos tempos das tarefas 25 e 47 (16 UT no total) é apenas 2,2 UT maior do que a soma dos tempos das tarefas 30 e 49 (13,8 UT no total), pode-se dizer que a principal causa para o aumento no tempo total do posto foi a inclusão da tarefa 41.

O Estudo CnT-1 indica que uma Tarefa Comum alocada em um posto de trabalho aumenta a carga de trabalho total dos operadores e, como consequência, aumenta também o Tempo de Ciclo dos operadores. Houve, no entanto, uma melhora na distribuição dos tempos dos operadores, o que é evidenciado pela redução no Atraso de Balanceamento e no Índice de Suavidade destes. Contudo, todos os índices de balanceamento dos postos tornaram-se piores com a existência da Tarefa Comum. O Tempo de Ciclo real subiu de 221,75 UT na Referência para 226,18 UT, passando a ser limitado pela carga de um operador e não mais devido ao tempo do posto gargalo.

Deve-se destacar também, como resultado do Estudo CnT-1, que as Tarefas Comuns podem impactar significativamente nos tempos dos postos nos quais não existem Tarefas Comuns, o que pôde ser verificado pela mudança do gargalo do

posto 14 na Referência para o posto 12 com a adoção da Tarefa Comum. Como as Tarefas Comuns demandam trabalho de mais de um operador, a nova divisão de tarefas, com a presença de dois ou mais trabalhadores em uma tarefa específica de um posto, pode impactar a carga dos outros trabalhadores presentes nos demais postos.

No Estudo CnT-1 considerou-se a tarefa 64 como uma Tarefa Comum que manteve o tempo de execução originalmente apresentado em Marcilio e Skraba (2010). Isso foi realizado partindo-se da premissa de que a tarefa 64 poderia ter sido uma tarefa que exigisse a alocação de dois operadores, mas que foi simplificada pelos autores como uma tarefa que demanda um único operador. Nesse sentido é factível que eventuais aumentos de tempo de ciclo ocorram quando essa operação passa a demandar dois operadores uma vez que, em síntese, o mesmo grupo de operadores será mais exigido para a realização das tarefas.

#### **4.5.2 Estudo CnT-2: Efeitos de Tarefas Comuns com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo**

Para a segunda avaliação, assim como foi aplicado para Operações Automáticas na Seção 4.4.2, foram consideradas a tarefa 32, fixa ao posto 8, e a tarefa 35, fixa ao posto 9, as quais tem os maiores tempos de execução na linha. Os resultados para o balanceamento dos operadores e dos postos de trabalho são mostrados, respectivamente, na Figura 37 e na Figura 38. Os índices de balanceamento obtidos estão na Tabela 23 abaixo. Para essa simulação adotou-se um tempo máximo de processamento de 30 segundos. O *gap* de integralidade obtido foi de 2,4%.

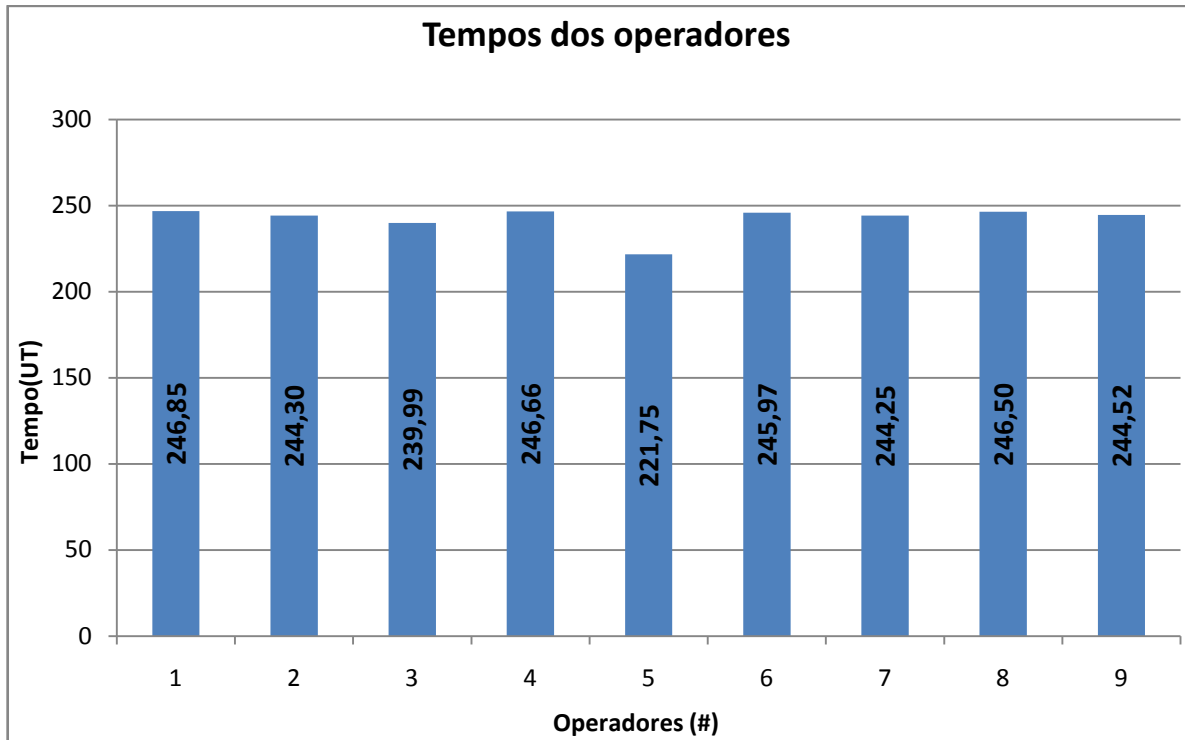


Figura 37 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-2

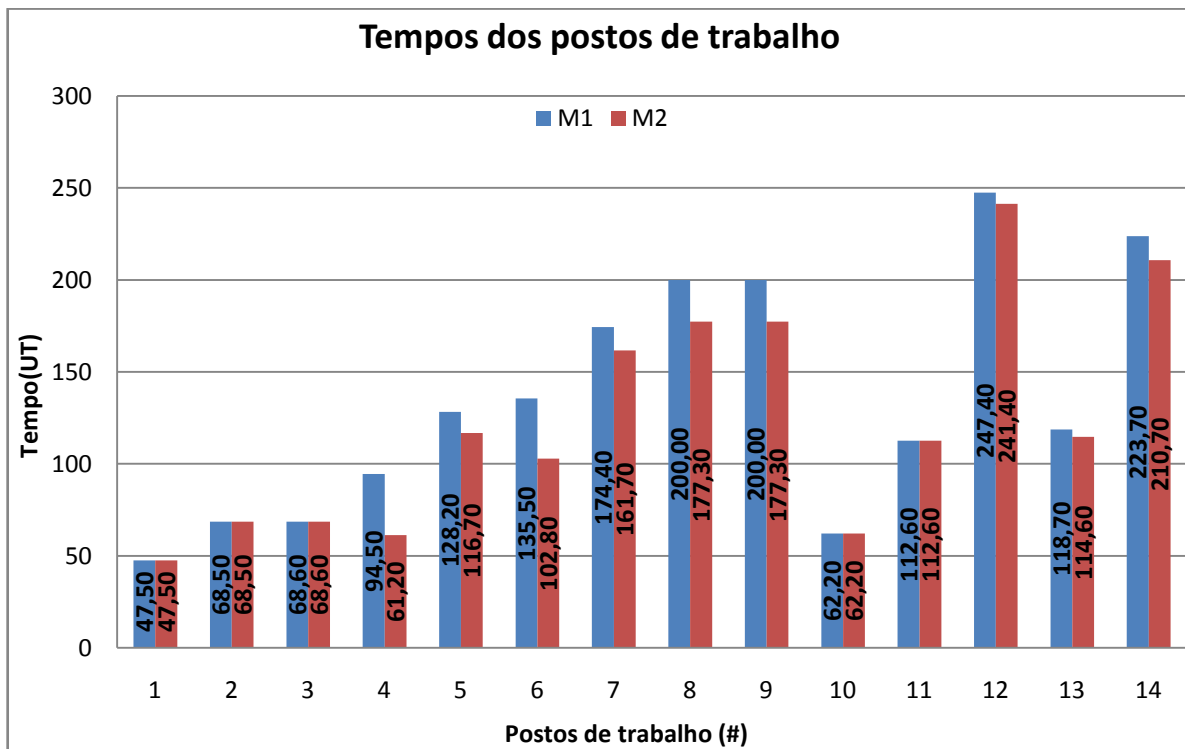


Figura 38 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-2

**Tabela 23 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-2**

	<b>Atraso de Balanceamento (%)</b>	<b>Índice de Suavidade (UT)</b>	<b>Tempo de Ciclo (UT)</b>
<b>Operadores</b>	1,84	26,39	246,85
<b>Postos</b>	46,17	484,93	246,50

Mais uma vez nota-se uma tendência a uma uniformização nas cargas dos operadores, uma piora na distribuição dos tempos dos postos de trabalho e um aumento no Tempo de Ciclo.

Para o balanceamento dos operadores obteve-se um Atraso de Balanceamento de 1,84% (6,21% na referência), um Índice de Suavidade de 26,39 UT (51,81 UT na referência) e um Tempo de Ciclo de 246,85 UT (221,75 UT na referência).

No balanceamento dos postos de trabalho houve aumentos no Atraso de Balanceamento, de 40,16% para 46,17%, no Índice de Suavidade, de 393,76 UT para 484,93 UT, e no Tempo de Ciclo, de 221,75 UT para 246,50 UT. Assim como ocorreu no Estudo CnT-1 o gargalo passou a ser o posto 12. A Tabela 24 abaixo compara as tarefas alocadas ao posto 12 na Referência e no Estudo CnT-2.

**Tabela 24 – Comparação entre as tarefas alocadas ao posto 12 na Referência e no Estudo CnT-2**

<b>Referência</b>		<b>Estudo 2</b>	
<b>Tarefa Alocada</b>	<b>Tempo de execução (UT)</b>	<b>Tarefa Alocada</b>	<b>Tempo de execução (UT)</b>
30	2,80	15	25,10
43	8,80	41	28,00
45	100,80	43	8,80
46	10,00	44	11,30
48	14,00	45	100,80
49	11,00	46	10,00
50	9,00	48	14,00
51	29,80	50	9,00
52	9,70	51	29,80
-	-	52	9,70
<b>Total:</b>	<b>195,9</b>	<b>Total:</b>	<b>246,5</b>
<b>Diferença no tempo total:</b>		<b>50,60 UT</b>	

Assim como ocorreu no Estudo CnT-1, as tarefas 30 e 49 deixaram de ser realizadas no posto 12 e foram incluídas as tarefas 15, 41 e 44. Nesse caso a diferença no tempo total foi mais acentuada: 50,60 UT.

Os resultados para o Estudo CnT-2 reforçam alguns resultados já encontrados em CnT-1: melhora na uniformidade da carga dos operadores, piora na distribuição dos tempos entre os postos e aumento no tempo de ciclo. Assim como ocorreu no Estudo CnT-1 o Tempo de Ciclo passou a ser limitado pelo operador com maior carga de trabalho, ficando desta vez em 246,85 UT, e não mais sendo determinado pelo posto gargalo.

#### **4.5.3 Estudo CnT-3: O efeito do número de operadores alocados em uma Tarefa Comum**

Para realização dessa análise considerou-se a tarefa 45, fixa ao posto 12, como uma Tarefa Comum. Essa tarefa foi escolhida por ter um tempo de execução elevado (100,8 UT para os modelos L2H1 e L1H1) e por estar no posto de trabalho que se mostrou o gargalo nos Estudos 1 e 2.

O teste foi realizado para dois casos, o primeiro, quando a Tarefa Comum exige dois operadores para sua execução; e o segundo, quando a Tarefa Comum exige três operadores para que seja realizada. Essas foram as condições contempladas porque considerou-se que esses são os casos mais prováveis na linha de montagem estudada. Um número excessivo de operadores não é viável por limitações físicas de espaço e operação.

A Figura 39 mostra a comparação dos tempos obtidos para o balanceamento dos operadores e a Figura 40 abaixo traz a comparação dos tempos médios, considerando-se a proporção de produção dos dois modelos de produto na linha, dos postos de trabalho. A Tabela 25 compara os índices de balanceamento obtidos. Para ambos os casos limitou-se o tempo de processamento em 30 segundos, obtendo-se um *gap* de integralidade de 2% para o primeiro e 2,4% para o segundo.



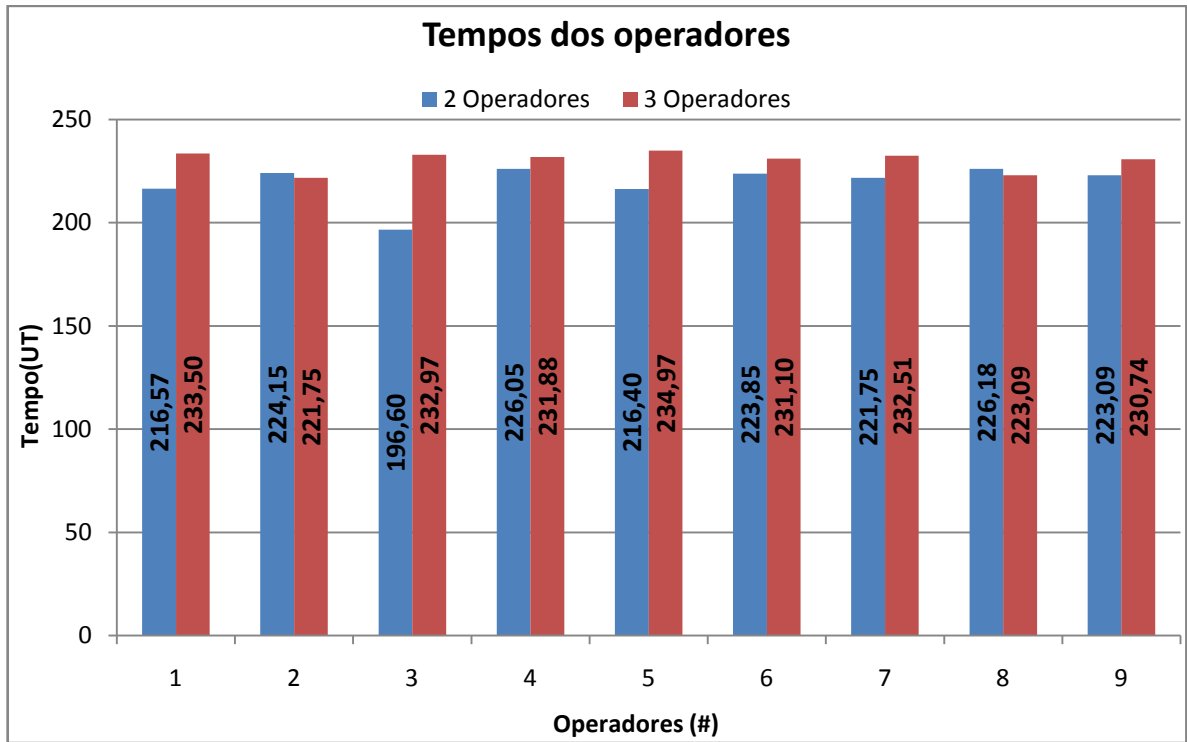


Figura 39 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-3

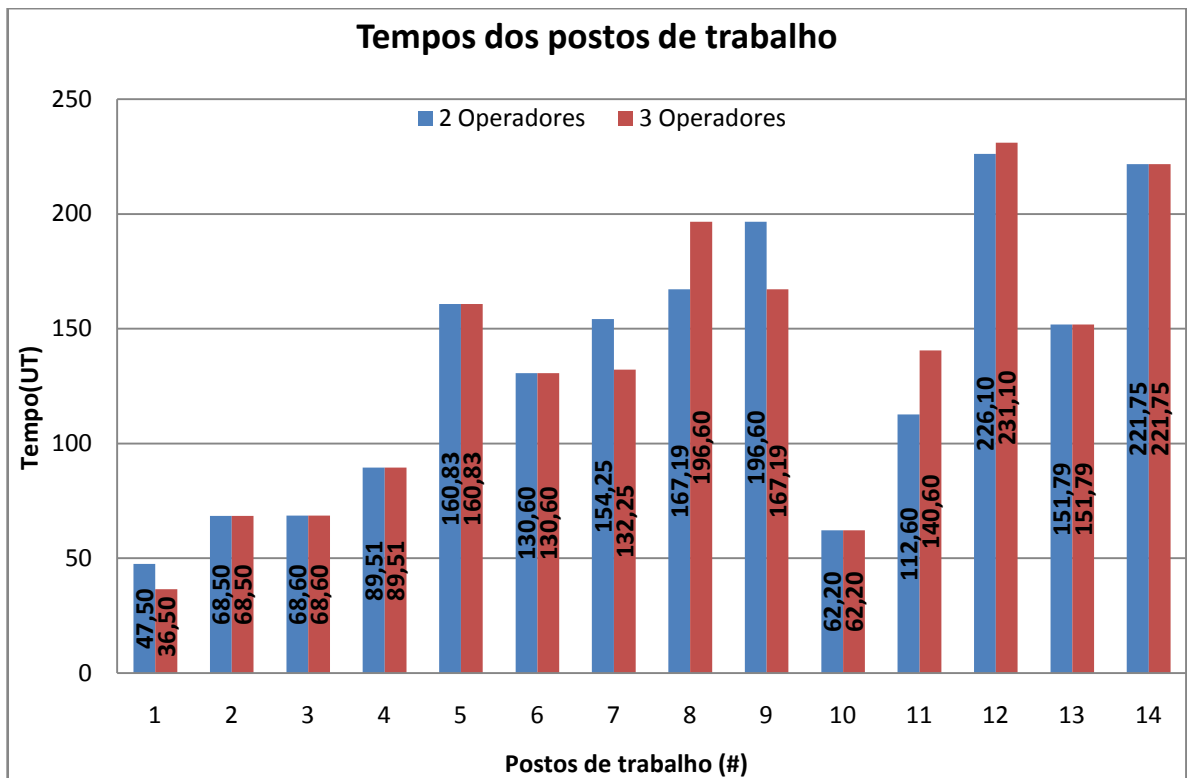


Figura 40 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-3

Tabela 25 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo CnT-3

	Atraso de Balanceamento (%)		Índice de Suavidade (UT)		Tempo de Ciclo (UT)	
	2 Op.	3 Op.	2 Op.	3 Op.	2 Op.	3 Op.
<b>Operadores</b>	2,99	2,00	33,19	19,25	226,18	234,97
<b>Postos</b>	41,30	42,57	410,89	428,89	226,10	231,10

No balanceamento dos tempos dos operadores notam-se reduções no Atraso de Balanceamento, de 2,99% para dois operadores atuando na Tarefa Comum e 2,00% para três operadores na Tarefa Comum (6,21% na Referência), e no Índice de Suavidade, de 33,19 UT para 19,25 UT (51,81 UT na Referência). O Tempo de Ciclo dos operadores, por sua vez, aumentou de 226,18 UT para 234,97 UT (221,75 UT na Referência).

Já no balanceamento dos postos de trabalho o efeito do aumento da quantidade de operadores atuando na Tarefa Comum foi contrário. O Atraso de balanceamento cresceu de 41,30% para 42,57% (40,16% na Referência) e o Índice de Suavidade passou de 410,89 UT para 428,89 UT (393,76 UT na Referência). O Tempo de Ciclo dos postos de trabalho, da mesma forma que ocorreu no balanceamento dos operadores, apresentou aumento quando um operador a mais é requerido para a execução da Tarefa Comum: de 226,10 UT para 231,10 UT (221,75 UT).

Levando-se em conta que o Tempo de Ciclo é determinado pelo maior dos dois tempos, dos operadores e dos postos de trabalho, pode-se afirmar que o resultado obtido com 2 operadores (231,10 UT) realizando a Tarefa Comum foi melhor do que o resultado com 3 operadores (234,97 UT). Ambos, no entanto, apresentaram um tempo de ciclo mais elevado do que a Referência (221,75 UT).

É possível perceber que quando se alocam mais operadores para a realização de uma Tarefa Comum melhora-se a distribuição dos tempos dos operadores e torna-se pior a distribuição dos tempos dos postos de trabalho. O Tempo de Ciclo, no entanto, é sempre prejudicado.

Assim como ocorreu nos Estudos CnT-1 e CnT-2, os Tempos de Ciclo no Estudo CnT-3 passaram a ser definidos pelos tempos dos operadores. Isso ocorre porque a existência de Tarefas Comuns aumenta a carga de trabalho total dos operadores, influenciando diretamente o Tempo de Ciclo deles, enquanto que seu

efeito na distribuição dos tempos dos postos é somente consequência das redistribuições de tarefas nos postos para acomodar os necessários deslocamentos de operadores para o posto no qual está alocada a Tarefa Comum.

Notadamente, no Estudo CnT-3 confirmou-se um padrão encontrado em CnT-1 e CnT-2 na comparação com o resultado de referência: redução do Atraso de Balanceamento e do Índice de Suavidade na distribuição dos tempos dos operadores; aumento dos mesmos índices na distribuição dos tempos dos postos de trabalho; e aumentos correspondentes também no Tempo de Ciclo.

Pode-se avaliar, pelos resultados expostos nos Estudos CnT-1, CnT-2 e CnT-3, que as Tarefas Comuns tornam o balanceamento da linha mais complexo e podem aumentar consideravelmente o tempo de ciclo dos operadores. Contudo, Tarefas Comuns são, muitas vezes, condições operacionais indispensáveis. A adoção de Tarefas Comuns no modelo proposto leva, em última instância, à possibilidade de obtenção de um resultado mais próximo da realidade operacional por reduzir a quantidade de simplificações necessárias na aplicação do modelo original.

Quando o tempo de execução da operação considerada uma Tarefa Comum se mantém o mesmo de quando era considerado apenas um operador na sua execução, a exigência da alocação conjunta de dois operadores aumenta a carga de trabalho total dos operadores e prejudica o balanceamento. Uma avaliação dos resultados quando esse tempo é reduzido pela presença de mais operadores é realizado na Seção 4.5.4.

#### **4.5.4 Estudo CnT-4: Avaliação dos efeitos da aplicação de Tarefas Comuns com ganhos no tempo de execução da tarefa**

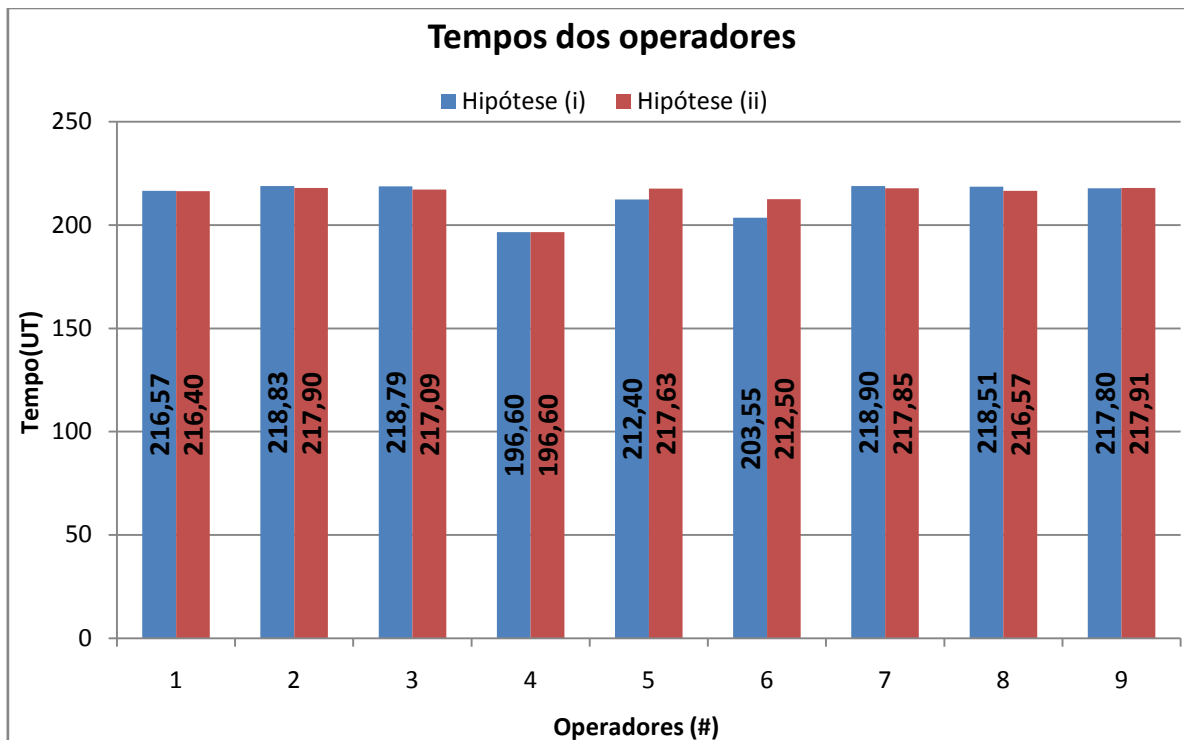
Como contraponto ao exposto no Estudo CnT-3, busca-se no Estudo CnT-4 avaliar uma condição na qual a Tarefa Comum não seja necessária, mas possa sim ser benéfica. Para isto, considera-se a redução do tempo de execução original da tarefa pela presença de mais de um operador para realizá-la. No modelo proposto a única forma de se avaliar essa condição é através da redução manual dos tempos de execução das tarefas especificadas por meio do parâmetro  $DTm(m,t)$ .

Para esse estudo definiu-se a Tarefa 64 novamente como uma Tarefa Comum, mas as seguintes hipóteses foram consideradas:

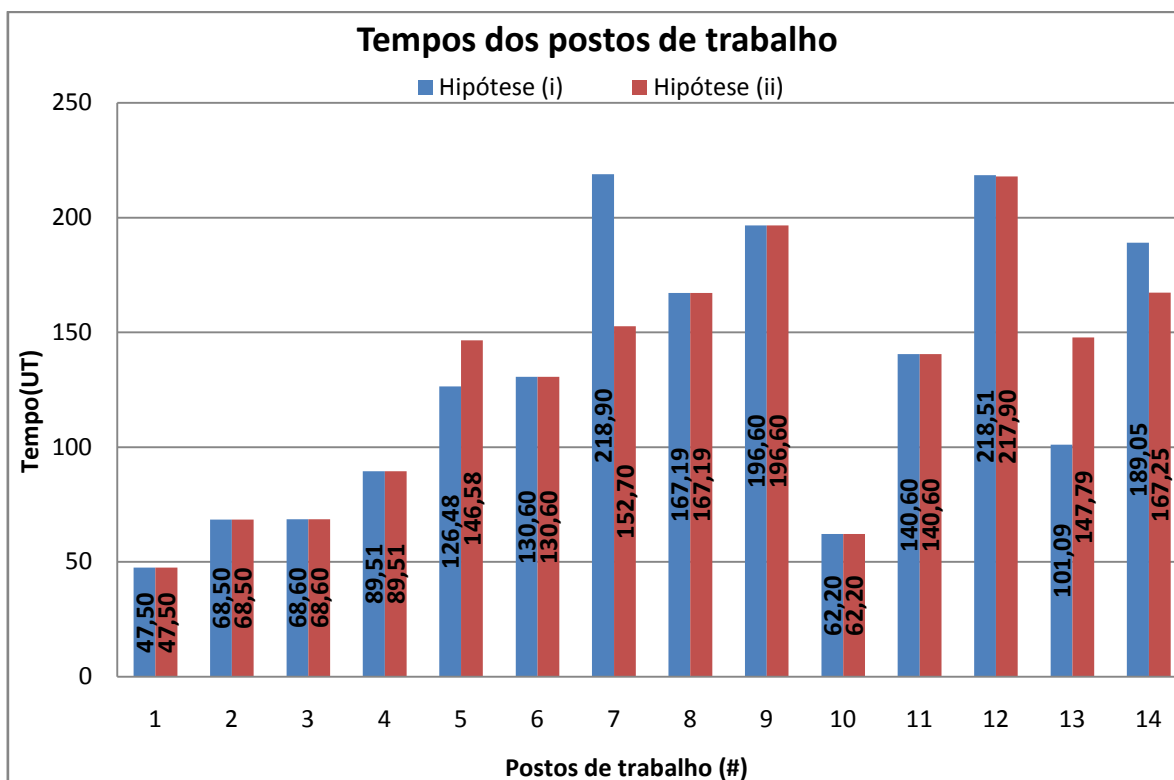
(i).Dois operadores realizam a tarefa, reduzindo seu tempo de execução em 30%, de 109 UT para 76,3 UT.

(ii).Três operadores realizam a tarefa, reduzindo seu tempo de execução em 50%, de 109 UT para 54,5 UT.

A Figura 41 e a Figura 42 abaixo mostram, respectivamente, as distribuições dos tempos dos operadores e dos postos de trabalho para as duas hipóteses. A Tabela 26 traz os índices de balanceamento obtidos para hipótese (i) e a Tabela 27 mostra os índices resultantes da hipótese (ii). Os tempos de execução foram de 16 segundos para a hipótese (i) e 15 segundos a hipótese (ii). Os *gaps* de integralidade em ambos os casos ficaram abaixo de 0,01%.



**Figura 41 – Tempos dos operadores para o Estudo CnT-4**



**Figura 42 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo CnT-4**

**Tabela 26 – Índices obtidos para o balanceamento da hipótese (i)**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Operadores</b>	2,44	27,96	218,90
<b>Postos</b>	40,44	395,33	218,90

**Tabela 27 – Índices obtidos para o balanceamento da hipótese (ii)**

	Atraso de Balanceamento (%)	Índice de Suavidade (UT)	Tempo de Ciclo (UT)
<b>Operadores</b>	1,57	22,09	217,91
<b>Postos</b>	40,88	384,47	217,90

Ambos os casos resultaram em reduções no Tempo de Ciclo, 218,90 UT e 217,91 UT, respectivamente, quando comparados à Referência (221,75 UT). O Índice de Suavidade relativo à distribuição dos tempos dos postos de trabalho na hipótese (ii) foi menor (384,47 UT) do que na Referência (393,76 UT).

As demais variações nos índices encontram-se no mesmo padrão dos demais resultados encontrados nos Estudos CnT-1, CnT-2 e CnT-3, isto é: reduções no Atraso de Balanceamento e no Índice de Suavidade para a distribuição de tempos

dos operadores; e aumento nos mesmos índices para o balanceamento dos postos de trabalho.

Ambas as hipóteses apresentaram, portanto, potencial para melhoria no balanceamento da linha. É importante se notar que soluções como essas podem ser adotadas na prática com pouco ou nenhum investimento, dependendo das condições operacionais e da natureza da operação que será considerada uma Tarefa Comum. O maior investimento que pode ser necessário para a adoção de Tarefas Comuns é a compra de ferramentas e equipamentos adicionais para que seja possível que mais de um operador atue nos postos onde estas tarefas serão alocadas.

Deve-se ter em mente, no entanto, que qualquer comparação entre os resultados obtidos nas duas hipóteses deve ser criteriosa, pois se tratam de suposições. Na aplicação de casos reais os fatores de ganho devem ser cuidadosamente determinados para que o modelo descreva adequadamente a realidade da linha estudada. Diferentes características operacionais podem beneficiar, dificultar ou mesmo impossibilitar a alocação opcional de múltiplos operadores na realização conjunta de uma mesma tarefa.

#### **4.6 Análise do balanceamento de linha de montagem com a presença simultânea de Operações Automáticas e Tarefas Comuns**

Nesta seção busca-se definir quais tarefas da linha de montagem estudada por Marcilio e Skraba (2010) podem ser, de fato, consideradas Operações Automáticas ou Tarefas Comuns. Após essas definições será avaliado o resultado do balanceamento da linha com as novas características, utilizando-se o modelo proposto. Esse resultado será comparado com o resultado de referência mostrado na Seção 4.3.

##### **4.6.1 Definição das Operações Automáticas**

A partir de uma análise detalhada das descrições<sup>8</sup> das operações realizadas na linha estudada por Marcilio e Skraba (2010) inferiu-se que a tarefa listada abaixo no Quadro 12 é a única Operação Automática da linha.

---

<sup>8</sup> Para a visualização da lista completa de descrições das tarefas verificar anexos de A até O.

**Quadro 12 – Relação de Operações Automáticas**

<b>Operação</b>	<b>Posto</b>	<b>Tarefa</b>	<b>Descrição</b>
9	13	62	Selecionar o modelo da cabine para soldar os <i>studs</i> na estação 240.

A operação que foi caracterizada como automática é parte do bloco de tarefas 62, o qual compreende as operações 8 e 9 do Posto 13. Como a operação 8 não pode ser caracterizada como uma Operação Automática deve-se dividir esse bloco em dois. Ressalta-se nesse ponto que as relações de precedência devem ser mantidas.

#### 4.6.2 Definição das Tarefas Comuns

A caracterização das Tarefas Comuns foi realizada de forma semelhante ao que foi feito para Operações Automáticas na Seção 4.6.1. O Quadro 13 abaixo mostra quais foram as operações classificadas como Tarefas Comuns.

**Quadro 13 – Relação de Tarefas Comuns**

<b>Operação</b>	<b>Posto</b>	<b>Tarefa</b>	<b>Descrição</b>
3	7	24	Montar o assoalho direito e esquerdo no dispositivo, e com a ajuda de um colega, em seguida montar o assoalho central sobre os assoalhos direito e esquerdo. L1 e L2.
6	12	45	Em seguida fazer o fechamento da cabine apertando o botão de passo a passo. Obs.: Por dois soldadores.
8	12	45	Com a ajuda de outro soldador, ao mesmo tempo apertar o botão de passo a passo para o fechamento geral da cabine, em seguida prenda as bordas do <i>Front Roof</i> com a lateral esquerda e lateral direita com um alicate de pressão.
15	12	50	Com a ajuda de outro soldador acionar o botão de passo a passo para abrir os <i>slides</i> direito e esquerdo da geometria.

Assim como ocorreu na Seção 4.6.1 parte das operações mostradas no Quadro 13 está inserida em blocos de tarefas mais abrangentes, que contemplam outras operações.

A Tarefa 24, por exemplo, é composta pelas operações de 1 a 14 do posto 7. A Tarefa 45 compreende as operações de 4 a 12 do posto 12. Ou seja, esses dois blocos de tarefas também devem ser segmentados para que as Tarefas Comuns possam ser tratadas separadamente como tais.

#### 4.6.3 Divisão dos blocos de tarefas

Como a tarefa 24 é composta pelas operações 1 a 14 do posto 7 e a Tarefa Comum é a operação de número 3, deve-se dividir a tarefa em três partes, conforme

exposto na Tabela 28 abaixo. Deve-se notar que a soma dos tempos para cada modelo deve ser igual aos tempos de cada tarefa mostrados na Tabela 6.

**Tabela 28 – Divisão da Tarefa 24**

Tarefa	Operações	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
24.1	1 e 2	8,10	8,10
<b>24.2</b>	<b>3</b>	8,00	8,00
24.3	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14	82,70	75,00
	<b>Total:</b>	<b>98,80</b>	<b>91,10</b>

A tarefa 45 é composta pelas operações de 4 a 12 do posto 12, sendo que as operações 6 e 8 são Tarefas Comuns. Deve-se dividir a tarefa 45 em cinco partes, conforme mostrado na Tabela 29 abaixo. Da mesma forma que na tarefa 24, a soma dos tempos das partes deve ser igual ao tempo original da tarefa.

**Tabela 29 – Divisão da Tarefa 45**

Tarefa	Operações	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
45.1	4 e 5	25,50	25,50
<b>45.2</b>	<b>6</b>	3,00	3,00
45.3	7	3,70	3,70
<b>45.4</b>	<b>8</b>	4,50	4,50
45.5	9, 10, 11 e 12	64,10	64,10
	<b>Total:</b>	<b>100,80</b>	<b>100,80</b>

A Tarefa 62 é composta pelas operações 8 e 9 do posto 13, sendo a 9 uma Operação Automática. A tarefa deve ser dividida em duas partes, conforme mostrado na Tabela 30 abaixo. Novamente, os tempos totais da tarefa dividida devem ser iguais aos tempos originais da tarefa.

**Tabela 30 – Divisão da Tarefa 62**

Tarefa	Operações	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
62.1	8	7,50	7,50
<b>62.2</b>	<b>9</b>	4,20	4,20
	<b>Total:</b>	<b>11,20</b>	<b>11,20</b>

#### 4.6.4 Definição de um novo Diagrama de Precedências

Com base no que foi exposto na Seção 4.6.3 deve-se definir um novo Diagrama de Precedências que contemple as tarefas divididas. Para que esse novo



diagrama seja equivalente ao original (Figura 14) as relações de precedência devem ser observadas. A Figura 43 traz o Diagrama de Precedências Proposto.

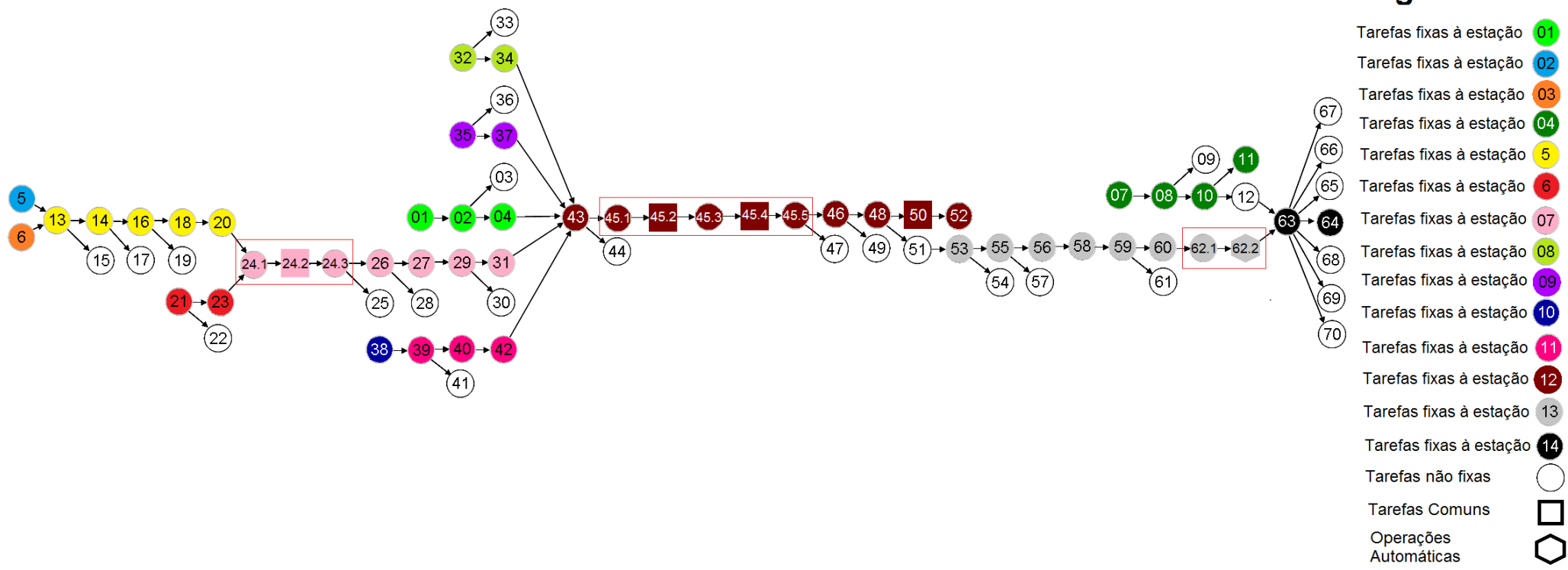


Figura 43 – Diagrama de Precedências Proposto

As tarefas divididas estão destacadas na Figura 43, assim como estão indicadas as Tarefas Comuns e Operações Automáticas consideradas.

#### **4.6.5 Estudo AT-CnT: Avaliação dos resultados obtidos para o balanceamento da linha de montagem com Operações Automáticas e Tarefas Comuns**

Os parâmetros do modelo foram alterados de forma a acomodar as alterações realizadas. Os itens alterados no modelo foram:

- O número de tarefas (parâmetro  $NT$ ), o qual cresceu de 70 para 77;
- Os valores dos tempos das tarefas (parâmetro  $DTm(m,t)$ ) de forma a adequar as divisões das tarefas 24, 45 e 62 e o correspondente aumento na quantidade de tarefas;
- As relações de precedência (parâmetro  $PREC(tp,ts)$ ) de forma a seguir o Diagrama de Precedências proposto, Figura 43;
- O conjunto de tarefas fixas (parâmetro  $TSFIX(t,s)$ ), de forma a garantir que as tarefas divididas se mantivessem adequadamente alocadas;
- O conjunto de alocações factíveis (parâmetro  $FATS(t,s)$ ) para que ficasse adequado ao novo número de tarefas.

As tarefas 24.2, 45.2, 45.4 e 50 foram consideradas Tarefas Comuns com a exigência de dois operadores. A tarefa 62.2 foi considerada uma Operação Automática. Os resultados da simulação estão expostos abaixo na Figura 44, que mostra a distribuição dos tempos dos operadores, e na Figura 45, que traz a distribuição dos tempos dos postos de trabalho. A Tabela 31 apresenta os índices de balanceamento obtidos para essa solução. O tempo de processamento nesse caso foi de 22 segundos e o máximo *gap* de integralidade obtido foi de 0,01%. Esse estudo será denominado Estudo AT-CnT.

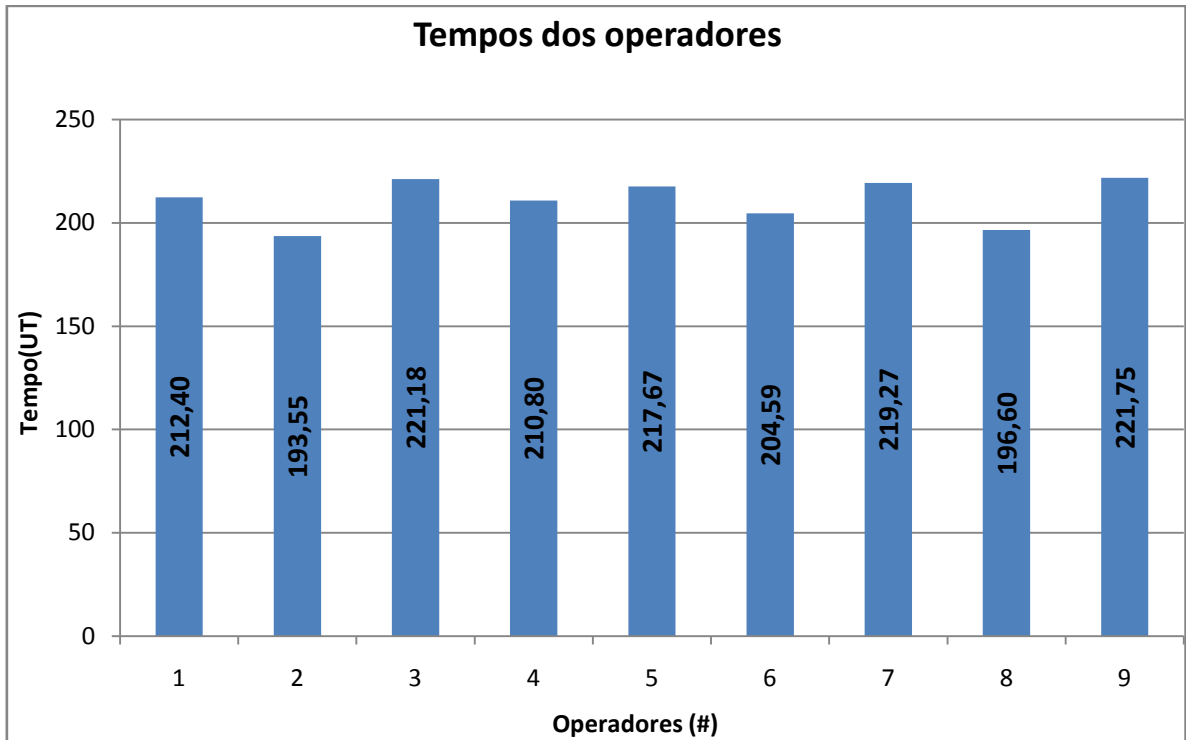


Figura 44 – Tempos dos operadores para o Estudo AT-CnT

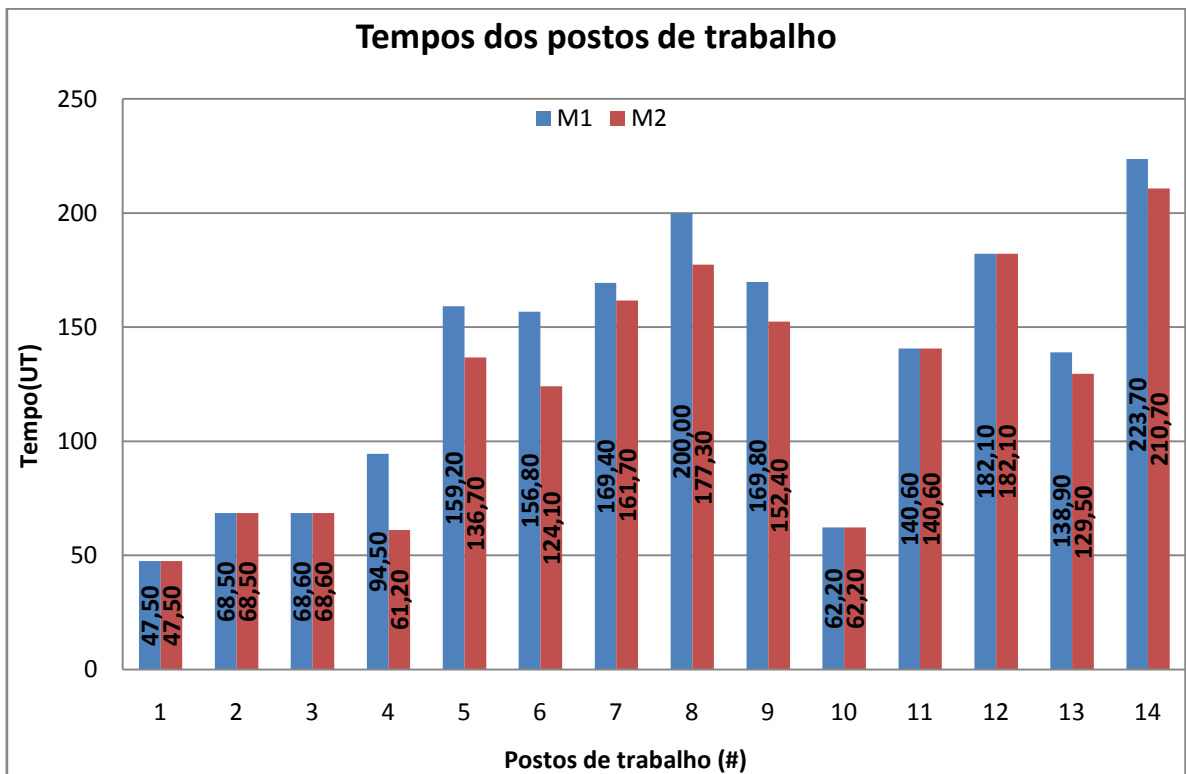


Figura 45 – Tempos dos postos de trabalho para o Estudo AT-CnT

**Tabela 31 – Índices obtidos para o balanceamento do Estudo AT-CnT**

	<b>Atraso de Balanceamento (%)</b>	<b>Índice de Suavidade (UT)</b>	<b>Tempo de Ciclo (UT)</b>
<b>Operadores</b>	4,91	44,19	221,75
<b>Postos</b>	40,16	389,16	221,75

Comparando o resultado do Estudo AT-CnT com a Referência nota-se que o atraso o Atraso de Balanceamento foi reduzido de 6,21% para 4,91% entre os operadores e se manteve o mesmo entre os postos (40,16%), e o Índice de Suavidade caiu de 51,81 UT para 44,19 UT entre os operadores e de 393,76 UT para 389,16 UT entre os postos. O Tempo de Ciclo, no entanto, se manteve o mesmo (221,75 UT).

A manutenção do tempo de ciclo era esperada, pois, como visto na Seção 4.4.2, a existência de Operações Automáticas na linha somente influenciará o Tempo de Ciclo se houverem Operações Automáticas alocadas no Posto Gargalo, o que não ocorre no Estudo AT-CnT.

Houve, de qualquer forma, uma melhora no balanceamento da linha, mas, mais importante do que esse ganho, é que o modelo proposto permite que o resultado gerado seja mais realista, ao reduzir as simplificações realizadas por Marcilio e Skraba (2010).

Contudo, como as alterações foram pequenas, mostra-se que as simplificações de Marcilio e Skraba (2010) são válidas para o caso estudado pelos autores. Pode-se atribuir isso ao fato dos tempos de execução de Operações Automáticas e Tarefas Comuns na linha serem baixos em relação aos tempos das demais tarefas da linha e, como exposto acima, por eles não estarem alocados no posto gargalo.

#### **4.7 Resumo dos Estudos Realizados**

O Quadro 14 abaixo visa sumarizar os estudos realizados e seus resultados.

**Quadro 14 – Resumo dos estudos realizados e seus resultados**

<b>Seção</b>	<b>Denominação</b>	<b>Resumo</b>	<b>Resultados em relação à Referência</b>
Seção 4.3	Referência	Resultado de base para comparação com os demais estudos.	-
Seção 4.4.1	Estudo AT-1	Avaliação dos efeitos da alocação de Operações Automáticas no Posto Gargalo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Pequena piora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Redução da máxima carga entre os operadores;</li> <li>• Manutenção do tempo de ciclo real.</li> </ul>
Seção 4.4.2	Estudo AT-2	Avaliação dos efeitos de Operações Automáticas com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piora na distribuição dos tempos dos operadores;</li> <li>• Pequena melhora na distribuição dos tempos dos postos;</li> <li>• Manutenção da máxima carga entre os operadores;</li> <li>• Manutenção do tempo de ciclo real.</li> </ul>
Seção 4.4.3	Estudo AT-3	Comparação dos efeitos da alocação de Operações Automáticas dentro e fora do Posto Gargalo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piora na distribuição dos tempos dos operadores na condição (a) e melhora na condição (b);</li> <li>• Manutenção da máxima carga de trabalho entre os operadores na condição (a) e redução na condição (b).</li> </ul>
Seção 4.4.4	Estudo AT-4	Avaliação dos efeitos causados por postos compostos apenas por Operações Automáticas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piora na distribuição dos tempos dos operadores;</li> <li>• Manutenção do tempo de ciclo real.</li> </ul>
Seção 4.5.1	Estudo CnT-1	Avaliação dos efeitos da alocação de Tarefas Comuns no Posto Gargalo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Pequena melhora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Aumento da máxima carga entre os operadores;</li> <li>• Aumento do tempo de ciclo real, que passa a ser determinado pelo tempo máximo entre os operadores;</li> <li>• Mudança do gargalo do posto 14 para o posto 12.</li> </ul>
Seção 4.5.2	Estudo CnT-2	Avaliação dos efeitos de Tarefas Comuns com longo tempo de execução fora do Posto Gargalo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Piora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Aumento da máxima carga entre os operadores;</li> <li>• Aumento do tempo de ciclo real, que passa a ser determinado pelo tempo máximo entre os operadores;</li> <li>• Mudança do gargalo do posto 14 para o posto 12.</li> </ul>

**Quadro 13 – Resumo dos estudos realizados e seus resultados (continuação)**

Seção 4.5.3	Estudo CnT-3	Avaliação dos efeitos do número de operadores alocados em uma Tarefa Comum.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Piora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Aumento da máxima carga de trabalho entre os operadores;</li> <li>• Aumento do tempo de ciclo real, que passa a ser determinado pelo tempo máximo entre os operadores;</li> <li>• Mudança do gargalo do posto 14 para o posto 12.</li> </ul>
Seção 4.5.4	Estudo CnT-4	Avaliação dos efeitos em situações hipotéticas nas quais possam haver reduções nos tempos de execução de uma tarefa quando ela é executada por mais de um operador, como uma Tarefa Comum.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Pequena piora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Redução na carga de trabalho máxima entre operadores;</li> <li>• Redução do tempo de ciclo real;</li> <li>• Mudança do gargalo do posto 14 para o posto 7 na hipótese (i) e para o posto 12 na hipótese (ii).</li> </ul>
Seção 4.6.5	Estudo AT-CnT	Avaliação dos resultados obtidos quando se consideram simultaneamente Operações Automáticas e Tarefas Comuns presentes na linha estudada por Marcilio e Skraba (2010).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na distribuição dos tempos entre os operadores;</li> <li>• Pequena piora na distribuição dos tempos entre os postos de trabalho;</li> <li>• Manutenção do tempo de ciclo real.</li> </ul>





## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho levou em consideração um estudo de balanceamento aplicado a uma linha de montagem de cabines para caminhões da VOLVO DO BRASIL, conforme dados de domínio público, retirados de Marcilio e Skraba (2010).

Visou-se neste estudo aprimorar o modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) utilizado por Marcilio e Skraba (2010), agregando duas condições previamente desconsideradas pelos autores por uma questão de simplificação: Operações Automáticas e Tarefas Comuns. Operações Automáticas são aquelas realizadas por equipamentos automáticos, sem exigir a presença de operadores durante a execução da tarefa. Tarefas Comuns são caracterizadas por exigirem ou se beneficiarem do trabalho conjunto de dois ou mais operadores em sua execução. As duas condições são frequentemente encontradas na indústria automotiva, setor ao qual pertence a indústria na qual está situada a linha de montagem que foi o foco do estudo realizado no presente trabalho.

A contemplação dessas duas condições no modelo matemático proposto foi definida como o Objetivo Geral do trabalho. Esse objetivo foi, de fato, alcançado, pois o modelo matemático proposto (Seção 3.2) permite que se considerem Operações Automáticas e Tarefas Comuns. O modelo desenvolvido foi implementado com sucesso através do *software* de otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013) e essa implementação permite a solução de problemas de balanceamento de linhas de montagem de modelo misto que apresentem qualquer uma dessas condições operacionais ou mesmo as duas condições simultaneamente.

No processo de desenvolvimento do trabalho realizou-se uma pesquisa ampla na literatura sobre o problema de balanceamento de linhas de montagem, especialmente em linhas do setor automotivo. Essa pesquisa permitiu um aprofundamento considerável nos conhecimentos do autor sobre o tema e trouxe informações de suma importância para a realização do presente projeto, o que permitiu que o Objetivo Específico 1 fosse alcançado. Destacam-se na pesquisa

realizada três seções que estão diretamente relacionadas às duas condições operacionais que foram foco no presente desenvolvimento:

1. Seção 2.4: Balanceamento de linhas de montagem com operadores múltiplos;
2. Seção 2.5: Balanceamento de linhas de montagem com Tarefas Comuns;
3. Seção 2.6: Balanceamento de linhas de montagem com Operações Automáticas.

Durante a realização dessa pesquisa notou-se que essas três condições são pouco exploradas na literatura apesar de serem, no entanto, de grande aplicação real na indústria automotiva.

O modelo proposto foi avaliado e seus resultados foram comparados com o modelo original de Marcilio e Skraba (2010) na Seção 4.2. Neste caso pode-se observar que os resultados foram semelhantes e, inclusive, um pouco melhores, o que foi possível pela utilização do *solver* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM-CPLEX, 2013), o qual apresenta desempenho computacional bastante superior ao *solver* utilizado por Marcilio e Skraba (2010), e pela elaboração de conjuntos esparsos para a formação do domínio das variáveis do modelo matemático proposto, conforme descrito na Seção 3.2.7. O resultado positivo dessa verificação permitiu que se alcançasse o Objetivo Específico 2.

Com o modelo implementado e gerando soluções factíveis realizaram-se diversos estudos com intuito de se determinar as influências causadas pelas Operações Automáticas e pelas Tarefas Comuns no problema de balanceamento de uma linha de montagem.

O modelo proposto permite solução de problemas de balanceamento de linhas com Tarefas Comuns, como avaliado na Seção 4.5, contemplando, portanto, o Objetivo Específico 3. Pode-se inferir pelos resultados obtidos que as Tarefas Comuns, quando compulsórias, podem gerar grandes dificuldades no balanceamento de uma linha de montagem. Todavia, na prática operacional observa-se que muitas vezes não há como se evitar que essa condição ocorra. Em última instância a adoção das Tarefas Comuns ao modelo, ainda que não traga uma

possibilidade de melhoria nos resultados de balanceamento, aproxima o resultado da realidade operacional ao abranger uma condição comum na indústria automotiva e pouco explorada na literatura.

Uma limitação imposta na solução com Tarefas Comuns, contudo, é que não se pode considerar diretamente fatores de ganhos nos tempos das operações quando estas são consideradas Tarefas Comuns. Isto é, o modelo permite simular casos em que as Tarefas Comuns são compulsórias, e até possibilita a avaliação de hipóteses de balanceamento com ganhos pela alocação de Tarefas Comuns através da alteração direta dos tempos destas operações nos parâmetros do modelo, como realizado na Seção 4.5.4. Não há, entretanto, a opção de se deixar em aberto para que o modelo avalie e encontre a quantidade de operadores que devem ser alocados em cada tarefa para que se obtenha o melhor balanceamento possível da linha.

O modelo proposto contempla também a solução de problemas de balanceamento em linhas com Operações Automáticas, condição avaliada na Seção 4.4, atendendo o Objetivo Específico 4. Notou-se que a aplicação de Operações Automáticas pode trazer um ganho real ao balanceamento da linha desde que ela seja realizada no Posto Gargalo.

Deve-se observar na implementação das Operações Automáticas, no entanto, que há uma limitação, visto que o modelo não contempla postos totalmente automatizados, sendo possível apenas para casos em que o início da operação exija a presença de um operador para tomar alguma ação, ainda que de tempo desprezível. Essa limitação é consistente com o caso estudado, pois a única operação automática presente na linha exigia, de fato, a presença de um operador para selecionar o modelo de cabine que estava sendo produzido no momento.

Por fim realizou-se na Seção 4.6 a aplicação dos dados reais de Marcilio e Skraba (2010) e, por meio de desmembramentos de tarefas necessários para contornar as simplificações adotadas originalmente pelos autores, considerou-se a condição na qual a linha apresenta tanto Operações Automáticas quanto Tarefas Comuns, permitindo que se alcançasse o Objetivo Específico 5. O resultado dessa avaliação indicou uma melhor distribuição dos tempos dos operadores e dos postos na linha, mas não trouxe ganhos de produtividade, pois a Operação Automática

considerada não estava alocada no Posto Gargalo, o que fez com que o tempo de ciclo se mantivesse. Nesse caso notou-se que as simplificações realizadas por Marcilio e Skraba (2010) são razoáveis, pois os tempos das Operações Automáticas e das Tarefas Comuns presentes na linha eram curtos e não estavam localizados no Posto Gargalo.

## **5.2 Sugestões de continuidade:**

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

- Consideração de postos totalmente automatizados, nos quais nenhum operador precisa ser alocado;
- Possibilidade de se avaliar a quantidade ideal de operadores que devem ser alocados a cada uma das Tarefas Comuns da linha e determinação do potencial de ganho de produtividade;
- Estudo da formação dos *clusters* e de suas influências;
- Estudos de caso em outras linhas de montagem com Operações Automáticas e/ou Tarefas Comuns;
- Estudos integrados a aplicações de Manufatura Virtual.

## REFERÊNCIAS

- AMEN, Matthias. **Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A Comparison on solution quality and computing time.** International Journal of Production Economics 69, p. 255-264, 2001.
- BATTAÏA, Olga; DOLGUI, Alexandre. **A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches.** International Journal of Production Economics 142, p. 259-277, 2013.
- BAYBARS, Ilker. **A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem.** Management Science, v. 32, n. 8, 1986.
- BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. **A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing.** European Journal of Operational Research 168, p. 694–715, 2006.
- BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. **Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure.** European Journal of Operational Research 199, p. 359-374, 2009.
- BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin. **A classification of assembly line balancing problems.** European Journal of Operational Research 183, p. 674-693, 2006.
- BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin. **Assembly line balancing: Which model to use when?** International Journal of Production Economics 111, p. 509-528, 2008.
- BUKCHIN, J.; RUBINOVITZ, J. **A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection.** IIE Transactions, 35, 73–85, 2003.
- BUKCHIN, Joseph; DAR-EL, Ezey M.; RUBINOVITZ, Jacob, **Mixed model assembly line design in a make-to-order environment.** Computers & Industrial Engineering 41, p. 405-421, 2002.
- BUKCHIN, J.; RUBINOVITZ, J. **Design and balancing of robotic assembly lines.** Proceedings of the Fourth World Conference on Robotics Research, Pittsburgh, PA, 1991.
- DAVIS, S. M. **“From Future Perfect”: Mass Customization.** Planning Review, New York (EUA), v. 17, n. 2, p. 16-21, 1989.
- 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.

DIMITRIADIS, S. G. **Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation.** Computers and Operations Research, v. 33, p. 2757-2774, 2006.

DONNINI, Nelson. **Estudo de Otimização por Meio de Modelos Matemáticos para uma Linha de Montagem de Bancos de Automóveis.** Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba-PR, 2009.

DONNINI, N.; MAGATÃO, L.; RODRIGUES, L. C. A. **Balanceamento de uma Linha de Montagem de Bancos de Automóveis com Buffer Intermediário usando Programação Linear Inteira Mista.** XLII SBPO, 2010.

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

GERHARDT, Melissa; FOGLIATTO, Flávio S.; P.; CORTIMIGLIA, Marcelo N. **Metodologia para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelo em ambientes de customização em massa.** Gestão e Produção (UFSCar), v. 14, p. 267-279, 2007.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear – Modelos e Algoritmos.** Editora Campus, Rio de Janeiro-RJ, 2000.

GRAVES, S.C., HOLMES, C.R. **Equipment selection and task assignment for multiproduct assembly system design.** The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 1, p. 31–50, 1988.

GUSEK. GLPK Under Scite Extended Kit. Disponível em <<http://gusek.sourceforge.net/gusek.html>>. Acesso em: 30 jul 2013.

IBM-CPLEX. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Disponível em <<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>>. Acesso em: 30 jul 2013.

LEVITIN G.; RUBINOVITZ J.; SCHNITS B. **A genetic algorithm for robotic assembly line balancing.** European Journal of Operational Research, v. 168, p. 811-825, 2006.

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

MAGATÃO, Leandro. **Programação matemática aplicada à otimização das operações de um poliduto.** Dissertação de Mestrado. CEFET-PR / CPGEI. Curitiba-PR, 2001.

MAGATÃO, Leandro. **Pesquisa operacional.** Apostila da Disciplina. Curitiba-PR, 2009.

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

MIBACH, F. A. R.; CAMPOS, L. A. M. **Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba.** Trabalho de Conclusão de Curso. UTFPR / DAMEC. Curitiba-PR, 2013.

OWEN, A. E. **Assembly with Robots.** Kogan Page Ltd., 1985.

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

SCHOLL, Armin. **Balancing and sequencing of assembly lines.** 2ª ed. Physica Verlag Heidelberg, 1999. 318p.

SIMARIA, Ana Sofia; VILARINHO, Pedro M. **A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II.** Computers & Industrial Engineering 47, p. 391-407, 2004.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 3ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009. 728p.

SMIDERLE, C. D.; VITO, S. L.; FRIES, C. E. **A busca da eficiência e a importância do balanceamento de linhas de produção.** Disponível em <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997\\_T5207.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997_T5207.PDF)>. Acesso em: 08 de abril de 2013.

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

THOMOPOULOS, Nick T. **Line balancing-sequencing for mixed-model assembly.** Management Science, v. 14, n. 2, Application Series, p. B59-B75, 1967.

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

TUNCEL, G.; TOPALOGLU, S. **Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company.** Computers & Industrial Engineering, v. 64, p. 602-609, 2012.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programming.** 4ª Ed. Chichester, ENG; New York, US: J. Wiley, 1999. 354p.

YAZGAN, H. R.; BEYPINAR, I.; BORAN, S.; CEREN, O. **A new algorithm and multi-response Taguchi method to solve line balancing problem in an automotive industry.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.57, p. 379-392, 2011.





## ANEXO A – TAREFAS DA ESTAÇÃO 01: *FRONT ROOF*

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	No painel de controle gire o dispositivo até a posição correta que é feita a primeira etapa do processo.	1,20	1,20
2	Coloque o reforço do para sol e o membro frontal do teto e o reforço interno do frontal, abaixe todos os grampos.	5,00	5,00
3	Em seguida execute os pontos conforme a IO <sup>9</sup> . OBS: Os pontos são dados com a <i>GUN</i> <sup>10</sup> pela parte de trás do dispositivo.	6,20	6,20
4	Em seguida abra os grampos e retire o sub-conjunto, colocando-o sobre o <i>TROLLER</i> <sup>11</sup> de apoio a produção.	1,50	1,50
5	Em seguida, dirija-se ao painel de controle e gire o dispositivo até a posição correta que é feita a segunda etapa do processo.	3,30	3,30
6	Pegue o painel frontal do teto e fixe o mesmo no pino guia, em seguida pegue o subconjunto que está no <i>TROLLER</i> e posicione sobre o painel frontal do teto de forma que a furação fique encaixado no pino guia. Alimente o reforço externo do frontal do teto sobre as peças fixadas nos dispositivos e feche todos os grampos.	9,80	9,80
7	Com a <i>GUN</i> , inicie a solda ponto pela parte superior do conjunto, pontecendo da esquerda para a direita e depois a parte inferior da direita para esquerda, conforme a IO.	18,00	18,00
8	Em seguida abra todos os grampos e retire o membro frontal já pronto e coloque no <i>TROLLER</i> de auxílio a produção.	2,50	2,50
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>47,50</b>	<b>47,50</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>9</sup> Instrução Operacional: Documento onde estão descritas as atividades que o operador deve realizar na tarefa referida

<sup>10</sup> Máquina de solda do tipo ponto (solda por resistência).

<sup>11</sup> Dispositivo dedicado a armazenar e transportar peças entre as estações de montagem.

## ANEXO B – TAREFAS DA ESTAÇÃO 02: LONGARINA ESQUERDA

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Fixar com o pino guia a placa com porcas do lado esquerdo no dispositivo.	1,80	1,80
2	Em seguida colocar o reforço externo do lado esquerdo e reforço externo do lado esquerdo no dispositivo, conforme foto na IO.	1,70	1,70
3	Alimentar o dispositivo com a longarina "L2H1" ou "L1H1", encaixando-a no pino guia, de forma que a mesma fique sobre o reforço externo lado direito e reforço externo lado esquerdo e feche o grampo frontal.	2,50	2,50
4	Coloque o reforço pequeno sobre a longarina de forma que se encaixe no pino guia e fechar os grampos, em seguida alimentar as 04 buchas centralizando-as com os pinos guias.	3,50	3,50
5	Com a GUN execute os pontos de solda ponto na placa de porcas.	2,20	2,20
6	Em seguida gire o dispositivo no painel de controle até a posição ideal.	1,00	1,00
7	Efetue a solda MAG <sup>12</sup> nas buchas, em seguida com a GUN, execute os pontos de solda ponto internamente da parte frontal para a traseira, conforme IO.	17,70	17,70
8	Em seguida pegar o reforço frontal lado direito e encaixar na longarina dando leves marteladas para que se encaixe perfeitamente. OBS: Colocar pino guia no primeiro e último furo da peça.	3,70	3,70
9	Executar os pontos da parte frontal para a traseira da longarina conforme IO.	6,50	6,50
10	No painel de controle gire novamente o dispositivo até sua posição normal	0,80	0,80
11	Execute os pontos nos dois lados da longarina, começando da parte traseira lado direito para o frontal e lado esquerdo do frontal para a traseira, conforme IO.	21,00	21,00
12	Alimente a placa de reforço no grampo frontal do dispositivo da longarina. OBS: Verificar a identificação no grampo direito ou esquerdo a ser soldado.	1,00	1,00
13	Execute solda ponto conforme IO.	1,80	1,80
14	Em seguida abra todos os grampos e retire os pinos das buchas, e coloque a longarina esquerda já pronta no TROLLER de auxílio à produção, em seguida dressar <sup>13</sup> a GUN.	3,30	3,30
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>68,50</b>	<b>68,50</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>12</sup> Solda com proteção por gás do tipo *Metal Active Gas* (Gas ativo)

<sup>13</sup> Nome dado à limpeza feita nos eletrodos de solda ponto, a limpeza é feita usinado a ponta do eletrodo para retirar o material gasto e deformado.

## ANEXO C – TAREFAS DA ESTAÇÃO 03: LONGARINA DIREITA

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Fixar com o pino guia a placa com porcas do lado direito no dispositivo.	1,80	0,80
2	Em seguida colocar o reforço externo do lado direito e reforço externo do lado esquerdo no dispositivo, conforme foto na IO.	1,70	1,70
3	Alimentar o dispositivo com a longarina “L2H1” ou “L1H1”, encaixando-a no pino guia de forma que a mesma fique sobre o reforço externo lado direito e reforço externo lado esquerdo e fechar o grampo frontal.	2,50	2,50
4	Coloque o reforço pequeno sobre a longarina de forma que se encaixe no pino guia e fechar os grampos, em seguida alimentar as 3 buchas centralizando-as com os pinos guias.	3,50	3,50
5	Com a <i>GUN</i> execute os pontos de solda ponto na placa de porcas.	2,30	2,30
6	Em seguida gire o dispositivo no painel de controle até a posição ideal.	0,80	0,80
7	Efetue a solda <i>MAG</i> nas buchas, em seguida com a <i>GUN</i> , execute os pontos de solda internamente da parte frontal para a traseira, conforme IO.	18,00	18,00
8	Em seguida pegar o reforço frontal lado direito e encaixar na longarina dando leves marteladas para que se encaixe perfeitamente. OBS: Colocar pino guia no primeiro e último furo da peça	3,50	3,50
9	Executar os pontos da parte frontal para a traseira da longarina conforme IO.	6,70	6,70
10	No painel de controle gire novamente o dispositivo até a sua posição normal.	0,80	0,80
11	Execute os pontos nos dois lados da longarina, começando da parte traseira lado direito para o frontal e lado esquerdo do frontal para a traseira, conforme IO.	20,30	20,30
12	Alimentar a placa de reforço no grampo frontal do dispositivo da longarina. OBS: verificar a identificação no grampo direito ou esquerdo a ser soldado.	1,20	1,20
13	Execute a solda ponto conforme IO.	1,70	1,70
14	Em seguida abra todos os grampos, retire os pinos das buchas, e coloque a longarina direita já pronta no <i>TROLLER</i> de auxílio à produção.	3,80	3,80
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>68,60</b>	<b>68,60</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

## ANEXO D – TAREFAS DA ESTAÇÃO 04: TETO/EXTENSÃO DO TETO

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Alimente o membro do teto no dispositivo giratório fixando-a nos pinos guias e coloca a placa com porcas.	3,50	0,00
2	Com a <i>GUN</i> PI084 <sup>14</sup> executar os pontos de solda conforme a IO.	24,00	0,00
3	Retirar a pré-montagem já soldada e colocar no dispositivo GS091 <sup>15</sup> e colocar a chapa do teto. Feche todos os grampos.	5,80	0,00
4	Em seguida alimente o membro da extensão do teto no dispositivo giratório e coloque a placa com porcas.	4,30	4,30
5	Com a <i>GUN</i> PI084 executar os pontos de solda conforme a IO.	5,70	5,70
6	Retire a pré-montagem já soldada e coloque no dispositivo GS092. Coloque a chapa da extensão do teto e feche todos os grampos.	5,20	5,20
7	Execute os pontos conforme a IO, começando da extensão do teto para o teto. Em seguida abra todos os grampos do dispositivo GS091 e GS092 e retire o teto e extensão do teto já prontos e deixe no BUFFER ao lado. OBS: Dressar a <i>GUN</i>	46,00	46,00
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>94,50</b>	<b>61,20</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>14</sup> Número de manutenção da máquina de solda.

<sup>15</sup> Número de manutenção dado ao dispositivo de montagem e solda das peças

## ANEXO E – TAREFAS DA ESTAÇÃO 05: ASSOALHO DIREITO E ESQUERDO

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Alimentar o dispositivo do lado direito com o suporte da extensão do tanque L1/L2. OBS: Só vai no lado direito.	1,50	1,50
2	Em seguida fechar o dispositivo com o pino guia do lado direito e do lado esquerdo.	2,50	2,50
3	Abastecer o dispositivo com a longarina do lado direito L1/2L2 e longarina do lado esquerdo L1/L2.	5,30	5,30
4	Em seguida colocar o lado do assoalho direito L1/L2 e lado do assoalho esquerdo L1/L2, e fechar os grampos manuais.	4,80	4,80
5	Em seguida colocar o assoalho esquerdo L1/L2 e assoalho direito L1/L2, sobre as longarinas nos dispositivos.	6,80	6,80
6	Coloque a placa lateral direita L1/L2 na parte da frente do dispositivo, e a placa lateral L1/L2 da parte traseira do assoalho, e feche os grampos. Em seguida alimente a placa com porcas, (OBS: Só na L2) e o suporte para o <i>carpet</i> L1/L2 e a placa com furos L1/L2 e feche os grampos do dispositivo do lado direito, conforme IO.	7,70	7,70
7	No dispositivo esquerdo colocar a placa lateral esquerda L1/L2 na parte da frente do dispositivo, e a placa lateral L1/L2 da parte traseira do assoalho, e fecha os grampos. Em seguida coloque a placa com porcas OBS: só na "L2" e o suporte para o <i>carpet</i> L1/L2 e fechar os grampos, e também o suporte para a saída de ar L1/L2, conforme IO. OBS: O suporte da saída de ar só vai no lado esquerdo.	8,70	8,70
8	Execute solda ponto com a <i>GUN</i> PI002 pela parte da frente do assoalho esquerdo "L1/L2" retire a <i>GUN</i> e execute solda ponto no meio do assoalho e em seguida coloca-se o suporte do assento lado esquerdo L1/L2, depois vai para a parte traseira e executa os pontos conforme IO.	50,00	38,00
9	No dispositivo do lado direito executar a solda ponto na parte da frente em seguida retire a <i>GUN</i> e execute solda ponto no meio do assoalho e em seguida coloca-se o suporte do assento lado direito L1/L2, depois vai para a parte traseira e executa os pontos conforme IO.	31,00	20,50
10	Em seguida execute solda ponto com a <i>GUN</i> PI079, pela parte da frente para a traseira do assoalho esquerdo, e da parte traseira para a frente do assoalho direito, e no suporte do assento lado direito e esquerdo conforme a IO	21,00	21,00
11	Em seguida abra todos os grampos dos dispositivos GS080 e GS082, conforme IO.	6,20	6,20
12	Com a <i>GUN</i> PI002 executar os dois pontos que faltam na placa com furos. OBS: Dressar a <i>GUN</i>	18,70	18,70
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>164,20</b>	<b>141,70</b>

**Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)**

## ANEXO F – TAREFAS DA ESTAÇÃO 06: ASSOALHO FRONTAL E CENTRAL

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	No dispositivo "DS506" montar o suporte para o painel lateral, o painel frontal externo, o reforço, a placa com porcas, o suporte para a coluna de direção, o painel de cobertura e a placa de cobertura, e fechar todos os grampos. L1 e L2.	15,30	15,30
2	No dispositivo "DS507", montar o suporte de chapa do pedal, painel frontal interno, placa com porca, o reforço do frontal interno esquerdo e o reforço do frontal interno direito fechando todos os grampos. L1 e L2.	8,80	8,80
3	No dispositivo "DS508" montar o suporte do extintor, a placa com porcas quando for L1, a cobertura quando for GSS-SRC <sup>16</sup> , a chapa da cobertura do motor, GSS-T ou GSS-SRC, dois reforço, a cobertura GSS-T utilizando o dispositivo, a extensão da chapa da chapa da cobertura do motor e o reforço, quando L2, fechando todos os grampos.	16,20	16,20
4	Com a GUN PI029 soldar os pontos no frontal externo inferior e depois superior, frontal interno inferior e depois superior e assoalho central, conforme IO.	80,20	47,50
5	Pegar a GUN PI004, girá-la e com a parte do prolongador menor na parte da frente e inferior do frontal externo, executar os pontos de solda do lado direito do dispositivo conforme IO.	4,8	4,80
6	Abrir todos os grampos do frontal externo e erguer o frontal.	2,20	2,20
7	Com a GUN PI004 soldar os pontos restantes no frontal externo, frontal interno e assoalho central.	21,30	21,30
8	Abrir todos os grampos do frontal interno, frontal externo e assoalho central, e colocar as peças no carrinho. OBS: Dressar a GUN no final de cada peça.	8,00	8,00
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>156,80</b>	<b>124,10</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>16</sup> GSS-SRT/GSS-T: Códigos das variantes de montagem da cabine que especificam se o caminhão terá caixa de câmbio manual ou automática, respectivamente.

## ANEXO G – TAREFAS DA ESTAÇÃO 07: JUNÇÃO DOS ASSOALHOS E FRONTAIS

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Buscar o assoalho central e frontal na estação 120 com o auxílio do carrinho, e verificar o modelo a ser feito GSS-T/GSS SRC.	7,80	7,80
2	Apertar o botão de passo no painel para subir o pino centralizador.	0,30	0,30
3	Montar o assoalho direito e esquerdo no dispositivo, e com a ajuda de um colega, em seguida montar o assoalho central sobre os assoalhos direito e esquerdo. L1 e L2.	8,00	8,00
4	Acionar o botão de passo para fechar o grampo pneumático central.	0,30	0,30
5	Com a GUN PI006 soldar o assoalho central com o assoalho direito e esquerdo na parte superior, L1 e L2.	10,80	6,95
6	E com a GUN PI081 soldar as laterais do assoalho central com o assoalho direito e esquerdo, conforme IO.	13,50	9,65
7	Acionar o botão de passo para abrir o grampo central.	0,50	0,50
8	Montar a lateral do frontal esquerdo, e a lateral do frontal direito. L1 e L2.	3,00	3,00
9	Acionar o botão de passo para fechar os grampos pneumáticos. OBS: Na lateral do frontal esquerdo fixar a plaqueta de identificação.	1,20	1,20
10	Montar o frontal interno e fechar os grampos manuais para fixar o frontal.	6,30	6,30
11	Acionar o botão de passo para fechar os grampos pneumáticos.	0,30	0,30
12	Com a GUN PI081 soldar a união da parte frontal interno com os assoalhos direito e esquerdo. L1 e L2.	12,00	12,00
13	Com a GUN PI083 soldar a união da lateral do frontal esquerdo e direito, com o frontal interno, o assoalho direito, esquerdo e assoalho central. Conforme IO.	34,30	34,30
14	Acionar o botão de passo para abrir os grampos pneumáticos.	0,50	0,50
15	Soldar os espaçadores, 2 de cada lado, com o auxílio do gabarito.	9,00	9,00
16	Montar o frontal externo e fechar os grampos manuais para fixar o frontal.	2,30	2,30
17	Acionar o botão de passo para fechar os grampos pneumáticos.	0,30	0,30
18	Com a GUN PI083 soldar os pontos faltantes na lateral do frontal esquerdo, união do frontal interno com o frontal externo e lateral do frontal direito dressando a GUN no final.	41,00	41,00
19	Acionar o botão de passo para abrir todos os grampos.	0,50	0,50
20	Com a GUN PI006 soldar os pontos frontais superiores, conforme IO.	3,70	3,70
21	Preencher a lista de verificação de variantes e colocá-la dentro do assoalho.	2,80	2,80
22	Usando a talha transportar o conjunto dos assoalhos para a estação 220.	6,00	6,00
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>164,40</b>	<b>156,70</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

## ANEXO H – TAREFAS DA ESTAÇÃO 08: LATERAL ESQUERDA

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Retirar a lateral esq. do dispositivo GS087 com a talha TE248 e inspecioná-la.	4,30	4,30
2	Alimente o dispositivo GS 087 com o painel lateral do teto, feche o grampo correspondente, e aplicar a cola conforme IO. L2H1, L1H1 conforme sequência.	8,00	8,00
3	Transportar a lateral pré-montada do dispositivo GS086 para o GS087, com a talha TE249 e montar o reforço interno e fechar o grampo correspondente.	14,00	14,00
4	No dispositivo GS086, montar a calha da porta, a placa lateral esquerda, L2H1, ou L1H1, conforme sequência, e aplicar a cola conforme a IO.	12,00	12,00
5	Montar na L2H1 ou L1H1 no dispositivo GS086 o quadro da porta, suportes do teto dianteiro e traseiro, reforço interno lateral do teto suporte da fechadura da porta, reforço interno <i>cab-safety</i> . Feche os grampos correspondentes, conforme IO.	9,20	9,20
6	Com a <i>GUN</i> PI095 efetuar os pontos nas peças montadas no dispositivo GS087, montar o reforço interno, reforço <i>A-Pillar</i> e o reforço <i>B-Pillar</i> , e executar os pontos conforme IO.	67,70	59,20
7	Com a <i>GUN</i> PI095 efetuar os pontos nas peças montadas no dispositivo GS086, montar o reforço <i>A-Pillar</i> esquerdo e o reforço Frontal interno <i>cab-safety</i> e executar os pontos conforme IO. OBS: Dressar a <i>GUN</i> .	41,30	32,40
8	Com a <i>GUN</i> PI086 executar os pontos nas peças montadas nos dispositivos "GS087" e "GS086", conforme IO.	30,20	24,90
9	Dressar a <i>GUN</i> PI086 e colocá-la no suporte, em seguida abrir todos os grampos dos dispositivos GS086 e GS087.	13,30	13,30
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>200,00</b>	<b>177,30</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)



## ANEXO I – TAREFAS DA ESTAÇÃO 09: LATERAL DIREITA

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Retirar a lateral direita do dispositivo GS085 com a talha TE246, e inspecioná-la.	4,30	4,30
2	Alimente o dispositivo GS085, com o painel lateral do teto e feche o grampo correspondente e aplique a cola conforme IO. L2, L1, conforme sequência.	8,00	8,00
3	Transportar a lateral pré-montada, do dispositivo GS084, para o GS085, usando a talha TE245, montar o reforço interno e fechar o grampo correspondente.	14,00	14,00
4	No dispositivo GS084, montar a calha da porta, a placa lateral direita L2, ou L1 conforme sequência e aplicar cola conforme IO.	12,00	12,00
5	Montar na L2 e L1 a calha da porta o quadro da porta, suportes do teto dianteiro e traseiro, reforço interno lateral do teto suporte da fechadura da porta, reforço interno <i>cab-safety</i> e feche os grampos correspondentes. Conforme IO.	9,20	9,20
6	Com a <i>GUN</i> PI 084 e efetuar os pontos nas peças montadas no dispositivo GS085, montar o reforço <i>A-Pillar</i> e <i>B-Pillar</i> e executar os pontos conforme IO.	67,70	59,20
7	Com a <i>GUN</i> "PI 084" efetuar os pontos nas peças montadas no dispositivo "GS084", montar o reforço <i>A-Pillar</i> e o reforço frontal interno <i>cab-safety</i> , e executar os pontos conforme IO. OBS: Dressar a <i>GUN</i> .	41,30	32,40
8	Com a <i>GUN</i> PI085 executar os pontos nas peças montadas nos dispositivos GS085 e GS084, conforme IO.	30,20	24,90
9	Dressar a <i>GUN</i> PI085 e colocá-las no suporte, em seguida abrir todos os grampos dos dispositivos GS084 e GS085.	13,30	13,30
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>200,00</b>	<b>177,30</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

## ANEXO J – TAREFAS DA ESTAÇÃO 10: PRÉ-MONTAGEM PAINEL

### TRASEIRO

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Colocar o membro superior esquerdo e o membro superior direito na parte de cima do dispositivo. Em seguida o membro do painel traseiro esquerdo e membro do painel traseiro direito e fechar o grampo da frente.	5,80	5,80
2	Em seguida colocar o reforço vertical esquerdo e o reforço vertical direito e fechar os grampos esquerdo e direito.	2,70	2,70
3	No membro do painel traseiro esquerdo, alimente as peças do reforço do climatizador e no membro do painel traseiro direito alimente o suporte da tomada de ar. OBS: Travar com os alicates os dispositivos.	8,70	8,70
4	Com a <i>GUN</i> PI029 execute os pontos de solda começando do lado esquerdo para o direito conforme IO. E com a <i>GUN</i> PI004 execute os pontos de solda laterais, começando do lado esquerdo para o direito, conforme a IO.	41,50	41,50
5	Abra todos os grampos e coloque a pré-montagem pronta no <i>TROLLER</i> de auxílio à produção.	3,50	3,50
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>62,20</b>	<b>62,20</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

## ANEXO L – TAREFAS DA ESTAÇÃO 11: PAINEL TRASEIRO

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Alimentar a parte inferior do dispositivo lado direito e lado esquerdo com o reforço do membro vertical e feche os grampos.	1,00	1,00
2	Em seguida abastece o membro horizontal inferior e o membro horizontal central.	2,00	2,00
3	Abasteça o suporte do teto lado direito e lado esquerdo e feche os grampos, em seguida colocar o membro horizontal superior.	2,80	2,80
4	Executar os pontos no membro horizontal superior junto com o suporte do teto. Conforme IO.	4,80	4,80
5	Em seguida alimente o membro vertical direito e o membro vertical esquerdo e feche os grampos.	5,00	5,00
6	Executar os pontos de solda com a <i>GUN</i> partindo do reforço do membro vertical lado direito para a parte traseira e em seguida para o reforço membro vertical lado esquerdo do dispositivo e finalizando os pontos na parte superior, conforme IO	25,00	25,00
7	Abra todos os grampos, e coloque o painel traseiro sem janela ou com janela conforme especificação, e feche os grampos na parte inferior e na parte lateral do painel traseiro.	11,80	11,80
8	Execute os pontos começando do lado esquerdo do dispositivo para o direito, conforme IO. OBS: Dressar a <i>GUN</i> .	62,00	62,00
9	Em seguida fixar o dispositivo de marcação em cima do painel traseiro na parte lateral direita e esquerda, e fazer as marcações das furações, conforme IO.	8,70	8,70
10	Abra todos os grampos e retire o painel já pronto do dispositivo com a ventosa e soldar os <i>studs</i> <sup>17</sup> , conforme IO.	17,50	17,50
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>140,60</b>	<b>140,60</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>17</sup> Tipo de parafuso que é soldado na cabine

## ANEXO M – TAREFAS DA ESTAÇÃO 12: GEOMETRIA

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Selecione o modelo da cabine a ser produzida L1/L2 e gire a chave seletora no painel de controle e aperte o botão de passo a passo para subir o pino guia.	1,80	1,80
2	Em seguida encaixe o sub-conjunto de assoalho no dispositivo GS088, e retire o dispositivo de transporte e deixe-o próximo a estação 200.	7,00	7,00
3	Com a GUN PI080 execute os pontos de solda do lado esquerdo, e com a GUN PI082 execute os pontos de solda do lado direito, conforme IO.	11,30	11,30
4	Pegue a lateral direita, coloque no dispositivo da geometria com a talha e feche o grampo e puxe a plataforma direita para travar no slide. Em seguida, pegue a lateral esquerda e coloque no dispositivo da geometria e feche o grampo e puxe a plataforma para travar no slide e o painel traseiro, e acione o pedal para travar os grampos. OBS: Dê leves marteladas na lateral do frontal e assoalho lado direito e esquerdo.	22,00	22,00
5	Preencha a lista de verificação.	3,50	3,50
6	Em seguida fazer o fechamento da cabine apertando o botão de passo a passo. OBS: Por dois soldadores.	3,00	3,00
7	Utilize as escadas da plataforma para ir até a parte frontal da cabine e alimente o <i>Front Roof</i> no dispositivo da geometria.	3,70	3,70
8	Com a ajuda de outro soldador, ao mesmo tempo apertar o botão de passo a passo para o fechamento geral da cabine, em seguida prenda as bordas do <i>Front Roof</i> com a lateral esquerda e lateral direita com um alicate de pressão.	4,50	4,50
9	Execute a solda MAG na parte frontal da cabine lado direito e lado esquerdo e em seguida na parte traseira da cabine, conforme IO.	45,80	45,80
10	Desce da escada e abre a plataforma do lado direito.	2,20	2,20
11	Em seguida abrir a plataforma do lado esquerdo e abastecer o <i>Front Roof</i> , e na parte traseira da cabine lado esquerdo e lado direito. Com o martelo dê leves marteladas para ajustar o painel traseiro com o assoalho.	6,80	6,80
12	Executar solda MAG no lado esquerdo e lado direito do painel traseiro com o assoalho conforme IO, e empurre a plataforma lado direito.	9,30	9,30
13	Com a GUN PI024 execute os pontos de solda no painel traseiro com o assoalho. OBS: Na cabine L1 os pontos de solda do lado direito na parte final do assoalho são dados no <i>respot</i> <sup>18</sup> .	17,00	17,00
14	Em seguida executar os pontos de solda na parte frontal da cabine, começando do lado esquerdo, e colocar o reforço frontal do teto lado direito e lado esquerdo dentro da cabine e, em seguida, executar os pontos de solda do lado direito, conforme IO.	25,00	25,00
15	Com a ajuda de outro soldador acionar o botão de passo a passo para abrir os slides direito e esquerdo da geometria.	9,00	9,00
16	Com a GUN PI080 e PI082 execute os pontos de solda na lateral direita e lateral esquerda com os assoalhos em seguida soldar o reforço do frontal do teto esquerdo e o reforço do frontal do teto direito.	29,80	29,80
17	Para finalizar, pegar a talha e retirar a cabine já pronta da estação 220 e levar para a estação 230, <i>Respot</i> .	9,70	9,70
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>211,40</b>	<b>211,40</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>18</sup> Estação de solda e espera da cabine para entrar na estação do robô.

## ANEXO N – TAREFAS DA ESTAÇÃO 13: RESPOT

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Com a <i>GUN</i> PI 018, soldar os pontos na parte superior e parte inferior da lateral do lado esquerdo, L1/L2 conforme IO.	20,00	15,90
2	Girar a cabine para soldar o lado direito.	1,70	1,70
3	Atenção! Na cabine L1, antes de soldar os pontos inferiores do lado direito, soldar os pontos do painel traseiro com assoalho, conforme IO.	5,80	5,80
4	Com a <i>GUN</i> PI 018, soldar os pontos na parte superior e parte inferior da lateral do lado direito, L1/L2, conforme IO.	20,00	20,00
5	Com a <i>GUN</i> PI 024, soldar os pontos no painel traseiro com a longarina do lado direito e lado esquerdo, conforme IO.	10,50	10,50
6	Girar a cabine.	1,70	1,70
7	Verificar se a cabine é <i>Rcooler</i> <sup>19</sup> , ou não para soldar os <i>studs</i> na parte traseira da cabine L1/L2. OBS: Testar os <i>studs</i> e colocar os ímãs nos assoalhos da cabine.	8,00	8,00
8	Transportar a cabine para a estação 240 <i>studs</i> , com o auxílio da talha e retirar a talha e dar passo a passo.	7,50	7,50
9	Selecionar o modelo da cabine para soldar os <i>studs</i> na estação 240.	4,20	4,20
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>79,40</b>	<b>75,30</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)

<sup>19</sup> Código de variante da cabine que diz se a cabine deve ter solda de parafusos ou não

## ANEXO O – TAREFAS DA ESTAÇÃO 14: SOLDA MANUAL

Número da Tarefa	Descrição das tarefas	Tempo de Operação L2H1 (UT)	Tempo de Operação L1H1 (UT)
1	Retire o <i>TROLLER</i> com a cabine da estação 280, posicionando na estação 320 manual.	7,00	7,00
2	Em seguida abasteça a estação 280 com outro <i>TROLLER</i> e acione o botão de passo a passo para subir o elevador.	4,20	4,20
3	Com a máquina de solda <i>MAG MS38/MS39</i> soldar a chapa da longarina lado direito e esquerdo na parte traseira da cabine.	158,00	145,00
4	Em seguida soldar a parte frontal e depois a parte interna da cabine lado direito e lado esquerdo conforme IO.	40,50	40,50
5	Verificar as variantes da cabine. Em seguida executar as furações L1/L2 conforme IO. OBS: Após as furações, passar o macho em todos os furos.	9,20	9,20
6	Preencha a lista de verificação e puxe o <i>TROLLER</i> com cabine já pronta até a estação 424.	4,80	4,80
<b>Tempo total de operação:</b>		<b>223,70</b>	<b>210,70</b>

Fonte: (Adaptado de MARCILIO; SKRABA, 2010)