

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
RODRIGO BONFIM BREGINSKI

**BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM DE  
MODELO MISTO: UM ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA NO  
BRASIL**

CURITIBA  
2013

RODRIGO BONFIM BREGINSKI

**BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM DE  
MODELO MISTO: UM ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA NO  
BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração em Tecnologia e Inovação, Departamento de Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Marcelo Gechele Cleto.

CURITIBA

2013

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais **Ciro** e **Herminia** e minha irmã **Tatiane**, pelo apoio constante e palavras de conforto nos momentos difíceis.

À **Alice Feix**, pelo apoio constante e companheirismo.

Ao professor **Marcelo Gechele Cleto**, pela atenção e cuidado que dedicou a realização deste trabalho, pela orientação e conhecimento transmitido.

A todos os professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

À empresa que tornou este trabalho possível, em especial ao **Ney**, pela atenção, orientação e conhecimento transmitido.

À minha tia **Tania**, pelo incentivo à pesquisa.

Aos meus amigos, pelo apoio, companhia e conselhos.

À **CAPES**, que financiou este estudo e possibilitou sua realização.

*"The cave you fear to enter holds the treasure you seek"*

**Joseph Campbell**

*"There is no expedient to which a man will not resort to avoid the real labor of thinking."*

**Joshua Reynolds**

## RESUMO

O balanceamento de linhas de montagem e sequenciamento da produção são atividades críticas para as indústrias, aumentando sua competitividade em um mercado que exige cada vez mais diversidade de produtos. Este estudo de caso foi realizado em uma empresa multinacional, localizada na região de Curitiba, e teve como objetivo avaliar métodos selecionados de balanceamento e um método de sequenciamento de linhas de montagem em uma empresa de grande porte do setor automotivo. A coleta de dados foi realizada por observação e documentação. Foi realizado o balanceamento da linha de montagem por heurísticas e em seguida foi realizado o sequenciamento da produção por um método proposto, utilizando quebra de restrições e prioridades de produção. Os resultados dos balanceamentos foram comparados entre si, para verificar qual o melhor método de balancear a linha de montagem e comparados com o balanceamento atual da empresa. O resultado do sequenciamento proposto foi comparado com o realizado atualmente pela empresa considerada no estudo. Ao final deste, obtiveram-se resultados semelhantes para os métodos de balanceamento da linha de montagem, porém esses tiveram uma variação quando comparados com o balanceamento atual da empresa do estudo. O sequenciamento proposto quando comparado com o sequenciamento utilizado atualmente pela empresa, apresentou-se mais eficiente, obtendo redução das quebras de restrições de 66%.

## **ABSTRACT**

The assembly line balancing and production sequencing are critical activities for industries, increasing their competitiveness in a market that increasingly demands more diversity of products. This case study was conducted in a multinational company, located in Curitiba, and had the objective to evaluate selected methods of balancing and a method of assembly lines sequencing in a large automotive company. Data collection was performed by observation and documentation. The assembly line balancing was done by heuristics and then the production sequencing was carried out by a method proposed using constraints violation and production priorities. The balancing results were compared to ascertain the best method of balancing the assembly line and compared with the company's current balancing. The result of the proposed sequencing process was compared with the currently utilized by the company considered in the study. At study ends, similar results were obtain for the balancing assembly line methods, but these have a variation when compared with the company's current balancing. The proposed sequencing process compared with the currently sequencing utilized by the company, presented to be more efficient, obtaining a reduction of constraints violation of 66%.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LINHA DE PRODUÇÃO SIMPLES.....	18
FIGURA 2 - LINHA DE PRODUÇÃO MISTA.....	19
FIGURA 3 - LINHA MULTI-MODELO.....	19
FIGURA 4 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIA.....	23
FIGURA 5 - EXEMPLO DE MATRIZ DE PRECEDÊNCIA. ....	23
FIGURA 6 - GRAFOS DE PRECEDÊNCIA PARA (A) MODELO A E (B) MODELO B. .....	28
FIGURA 7 - MATRIZ DE PRECEDÊNCIA PARA (A) MODELO A E (B) MODELO B. .....	29
FIGURA 8 - GRAFO E MATRIZ DE PRECEDÊNCIA EQUIVALENTE.....	29
FIGURA 9 - ALGORITMO DA REGRA HEURÍSTICA DE UTILIZAÇÃO INCREMENTAL.....	42
FIGURA 10 - ARQUITETURA DE SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MODELO MISTO .....	50
FIGURA 11 - OPERAÇÃO DE MONTAGEM EM UMA LINHA COM TEMPO ENTRE VEÍCULOS VARIÁVEL.....	53
FIGURA 12 – FLUXO DE MATERIAIS E MOVIMENTAÇÃO DE OPERADORES EM MÚLTIPLAS ESTAÇÕES DE TRABALHO.....	54
FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE CAMPO E RELAÇÃO COM OS OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	61
FIGURA 14 – CÁLCULO DE QUEBRA DE RESTRIÇÕES PARA UMA VARIANTE COM RESTRIÇÃO DE 1/3. ....	66
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA ESCOLHA DE VEÍCULO DO MÉTODO DE SEQUENCIAMENTO PROPOSTO. ....	68
FIGURA 16 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 1.....	72
FIGURA 17 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 2.....	73
FIGURA 18 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 3.....	74
FIGURA 19 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 4.....	74
FIGURA 20– UTILIZAÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONTAGEM.....	75
FIGURA 21 – UTILIZAÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONTAGEM PARA O BALANCEAMENTO DE TODAS AS ATIVIDADES. ....	76
FIGURA 22 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA A. ....	77

FIGURA 23 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA B. ....	78
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA C. ....	79
FIGURA 25 - ARQUITETURA PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MODELO MISTO .....	82
FIGURA 26 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 1.....	93
FIGURA 27 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 2.....	94
FIGURA 28 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 3.....	95
FIGURA 29 - – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 4. ....	96
FIGURA 30 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 1 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	107
FIGURA 31 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 2 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	108
FIGURA 32 -- VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 3 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	108
FIGURA 33 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 4 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	109
FIGURA 34 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 5 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	109
FIGURA 35 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 6 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	110
FIGURA 36 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 1 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	111
FIGURA 37 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 2 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	112



FIGURA 38 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 3 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	112
FIGURA 39 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 4 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	113
FIGURA 40 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 5 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	113
FIGURA 41 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 6 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.....	114

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - VERSÕES DO SALBP. ....	25
QUADRO 2- TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_1$ . 28	
QUADRO 3 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_2$ .30	
QUADRO 4 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_3$ .30	
QUADRO 5 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_4$ .31	
QUADRO 6 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_5$ .32	
QUADRO 7 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO $\alpha_6$ .33	
QUADRO 8 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_1$ . ..34	
QUADRO 9 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_2$ . ..34	
QUADRO 10 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_3$ . 35	
QUADRO 11 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_4$ . 35	
QUADRO 12 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_5$ . 36	
QUADRO 13 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO $\beta_6$ . 36	
QUADRO 14 - TAXONOMIA DOS OBJETIVOS. ....	37
QUADRO 15 – RELAÇÃO DAS HEURÍSTICAS E DA ESCOLHA DAS TAREFAS ALOCADAS ÀS ESTAÇÕES DE TRABALHO. ....	44
QUADRO 16 - TÉCNICAS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS POR OBJETIVOS. ....	59
QUADRO 17 – COMPARATIVO DE PRODUÇÃO DE TODOS OS VEÍCULOS COM PRIORIDADE POR SEMANA ENTRE O SEQUENCIAMENTO REAL E O PROPOSTO.....	82

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NOTAÇÕES UTILIZADAS NOS PROBLEMAS DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM. ....	39
TABELA 2 – DEMANDA DE CADA MODELO. ....	64
TABELA 3 - COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO DO BALANCEAMENTO ENTRE OS OITO MÉTODOS E O UTILIZADO PELA EMPRESA. ....	71
TABELA 4 – TEMPOS TOTAIS DE MONTAGEM PARA AS TRÊS ALTERNATIVAS E O REAL E PERCENTUAL COMPARADO COM O TEMPO REAL. ....	79
TABELA 5 – COMPARATIVO ENTRE NÚMERO DE QUEBRA DE RESTRIÇÕES DO SEQUENCIAMENTO REAL UTILIZADO PELA EMPRESA E O SEQUENCIAMENTO PROPOSTO. ....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	PROBLEMA.....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Geral.....	15
1.2.2	Específicos .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA .....	16
1.4	DELIMITAÇÃO .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	LINHAS DE MONTAGEM.....	18
2.2	BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM.....	22
2.3	PROBLEMA SIMPLIFICADO DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM .....	24
2.4	PROBLEMA GERAL DE BALANCEAMENTO E TAXONOMIA DE LINHAS DE MONTAGEM .....	25
2.4.1	Características do Grafo de Precedência.....	27
2.4.2	Características das Estações e da Linha .....	33
2.4.3	Taxonomia dos Objetivos .....	37
2.5	MÉTODOS DE BALANCEAMENTO .....	38
2.5.1	Modelo Matemático .....	38
2.5.2	Heurísticas.....	41
2.5.3	Metaheurísticas .....	45
2.5.4	Simulação.....	48
2.6	SEQUENCIAMENTO .....	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>56</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	56
3.2	AMBIENTE DA PESQUISA DE CAMPO .....	56
3.3	TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A COLETA .....	58
<b>4</b>	<b>PESQUISA DE CAMPO .....</b>	<b>61</b>
4.1	HEURÍSTICAS DE BALANCEAMENTO .....	63
4.2	HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO.....	65
4.3	RESTRICÇÕES E PRIORIDADES .....	69
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
5.1	DO BALANCEAMENTO .....	70
5.2	DO SEQUENCIAMENTO .....	77

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>84</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	85
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção em massa permite a manufatura com custos mais baixos devido a grande quantidade de unidades produzidas do mesmo produto e apenas é possível pela divisão do trabalho (AMEN, 2001). O grande aumento da produção, conseqüente da divisão do trabalho, se deve a três circunstâncias: aumento da destreza de cada trabalhador; redução do tempo perdido passando de um tipo de trabalho a outro e invenção de um grande número de máquinas que facilitam o trabalho, possibilitando uma pessoa fazer o trabalho de muitas (SMITH, 1983).

A linha de montagem se tornou popular com a produção em massa de automóveis, quando Henry Ford começou a montagem do modelo T na fábrica “Highland Plant” em 1913. Em um sistema de linha de montagem, a matéria-prima entra e progressivamente se move através de uma série de estações de trabalho enquanto está sendo transformada no produto desejado (SOUZA *et al.*, 2003). A quantidade total de trabalho do processo de montagem é dividida em operações elementares, chamadas de tarefas, que necessitam de um tempo para serem realizadas. As tarefas seguem uma relação de precedência e para poder realizar-se uma tarefa todas as suas tarefas antecessoras já devem ter sido realizadas (AMEN, 2001; BECKER e SCHOLL, 2006). Kimms (2000) afirma que para garantir a completa produção de cada modelo que passe pela linha, cada estação deve estar equipada com máquinas, robôs e pessoas capacitadas e o número de estações e equipamento das estações é chamado de configuração da linha.

O conteúdo total de trabalho do processo de montagem é dividido entre as estações de trabalho, que repetem as operações a cada intervalo de tempo determinado, chamado tempo de ciclo, sem violar as relações de precedência de montagem (AMEN, 2001; BECKER e SCHOLL, 2006; SOUZA *et al.*, 2003). O problema de otimizar essa divisão de tarefas entre as estações de trabalho é conhecido como Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem (*Assembly Line Balancing Problem* - ALBP) (SCHOLL; BOYSEN e FLIEDNER, 2009).

O mercado tem exigido uma maior variedade de produtos, ocasionando uma procura diversificada e produtos com um curto ciclo de vida. Para atender essa exigência, segundo Gilmore e Pine II (1997) e da Silveira, Borenstein e Fogliatto (2001), surgiu no final dos anos 80 a customização em massa, que é um sistema de produção que permite a customização de produtos ou serviços para consumidores

individuais em grande escala e com custos relativamente baixos, pela tecnologia da informação e trabalho flexível. Visando manter uma maior variedade de modelos e custos baixos são utilizadas linhas de montagem flexíveis.

## 1.1 PROBLEMA

Para atender as necessidades dos consumidores, as linhas de montagem antigas, onde apenas um único modelo era fabricado, estão mudando para atender a produção de diferentes modelos, podendo ser uma linha de modelo misto, onde as unidades são produzidas de forma misturada (lotes unitários), ou multi-modelo, onde a produção é realizada em lotes de cada modelo e entre esses lotes é necessário um tempo de *setup* (BECKER e SCHOLL, 2006), os tipos de linha de montagem são descritos no Capítulo 2, Seção 2.1.

Para aumentar a eficiência e reduzir os custos de operação da linha é realizado o balanceamento das operações entre as estações de trabalho, que pode ser feito pelos métodos: exatos (modelos matemáticos), heurísticos (procedimento que pode encontrar uma boa solução viável para determinada classe de problemas (HILLIER e LIEBERMAN, 2010)), metaheurísticos (métodos de resolução geral que fornecem estruturas e diretrizes de estratégia gerais para desenvolver um método heurístico específico (HILLIER e LIEBERMAN, 2010)) ou simulação. Nas linhas de montagem que produzem mais de um modelo, muitas vezes os tempos totais e individuais de montagem são diferentes entre os modelos, assim os tempos de operação de cada posto acabam variando de modelo para modelo.

O balanceamento em linhas que produzem mais de um modelo pode ser realizado utilizando as médias ponderadas dos tempos dos diferentes modelos, mas um efeito pode ser a sobrecarga dos operadores quando o modelo com um tempo maior de montagem passa pela linha e a ociosidade dos operadores, quando o modelo com um menor tempo de montagem passa pela linha. Outra alternativa é a utilização de uma função objetivo que considere o desbalanceamento entre os modelos e tente minimizá-lo.

Outras ações possíveis para minimizar a diferença de tempos nos postos de montagem são a utilização de operadores flutuantes, que ajudam os operadores da linha de montagem nos modelos mais lentos e realizam outras tarefas no restante do tempo, e restrições de relação de quantidade de produtos mais lentos. A frequência

que um veículo com tempo de montagem mais longo pode entrar na linha fica limitada à entrada de determinada quantidade de veículos com um tempo de montagem menor ou igual que a média ponderada dos tempos de produção, evitando que vários veículos mais lentos entrem na linha de montagem em sequência. Um exemplo é que cada produto mais lento apenas possa entrar depois de cinco produtos com tempo igual ou menor que o tempo médio ponderado de produção.

A restrição de quantidade de produtos mais lentos faz com que o sequenciamento da linha de montagem tenha que trabalhar em conjunto com o balanceamento da linha. Porém ainda existem dificuldades para se determinar qual é o melhor sequenciamento possível e minimizar a quantidade de operadores flutuantes, pois os objetivos utilizados, como redução de tempo ocioso e nivelamento do uso de materiais, podem ser conflitantes (BOYSEN, FLIEDNER e SCHOLL, 2009).

Diante do exposto, a questão de pesquisa a ser respondida é: qual o melhor modelo para o balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem de modelo misto de empresas de grande porte do setor automotivo?

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são divididos em um geral e seis específicos.

### 1.2.1 Geral

Aplicar oito métodos existentes de balanceamento e de um método de sequenciamento de linhas de montagem de modelo misto em uma empresa de grande porte do setor automotivo.

### 1.2.2 Específicos

- a) Pesquisar os diferentes métodos, teóricos e práticos, de balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem de modelo misto.
- b) Definir critérios para comparar os métodos.



- c) Coletar dados de uma empresa de grande porte do setor automotivo e aplicar os métodos para a solução do problema do balanceamento e sequenciamento.
- d) Implementar computacionalmente as oito heurísticas para o cálculo do balanceamento e implementar a heurística do sequenciamento.
- e) Comparar os resultados dos métodos de balanceamento entre si e com o balanceamento atualmente adotado pela empresa em uma parte da linha de montagem.
- f) Comparar a solução proposta de sequenciamento com a solução que a empresa utiliza atualmente na linha de montagem.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho está relacionado com a Engenharia de Operações e Processos da Produção, uma das grandes áreas da Engenharia de Produção (ABEPRO, 2008). Segundo Amen (2001) o balanceamento de linhas de montagem ainda é um tema atual, pois o princípio de aumentar a produtividade pela divisão do trabalho é atemporal. Para Sanches (2010) o sequenciamento das linhas de montagem é tarefa primordial para o alcance das metas estratégicas, pois afeta a programação de toda a fábrica.

Boysen, Fliedner e Scholl (2009) afirmam que para as indústrias terem uma grande variedade de produtos e manterem os benefícios de um eficiente fluxo de produção é necessário utilizar linhas de montagem de modelo misto. Com esse tipo de linha de montagem um problema a ser solucionado é a sequência de produção.

A aplicação de diferentes métodos de balanceamento e sequenciamento e a comparação entre eles será mais uma indicação de qual alternativa atende melhor as empresas de grande porte do setor automotivo, com as características da empresa do estudo.

A possibilidade de fazer a pesquisa utilizando dados reais de uma empresa aumenta o vínculo Universidade-Empresa e facilita uma maior integração em trabalhos futuros, atendendo uma necessidade, levantada por Boysen, Fliedner e Scholl (2008), de maior quantidade de pesquisa prática em balanceamento de linhas de montagem, pois essa representava apenas 5% dos trabalhos sobre balanceamento de linhas de montagem. Além disso, para Falkenauer (2005) existe

uma lacuna entre os trabalhos acadêmicos de balanceamento de linhas de montagem e os problemas de balanceamento enfrentados pelas indústrias.

Uma linha de montagem bem balanceada e sequenciada reduz desperdícios, como ociosidade dos operadores, necessidade de operadores flutuantes, estoques e produtos com defeitos, fazendo que cada unidade tenha um custo de produção menor para as organizações, permitindo que as indústrias reduzam o preço de seus produtos. Assim a maior parte da população terá acesso a esses produtos.

O método utilizado nessa dissertação para avaliação das diferentes alternativas poderá ser aplicado em outras empresas, com possíveis modificações para respeitar as particularidades de cada empresa, levando esse benefício para mais empresas e conseqüentemente mais consumidores.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO

Este trabalho teve a seguinte delimitação:

Para o problema do balanceamento foi possível utilizar os dados das quatro primeiras estações da linha de montagem devido ao grande número de atividades realizadas nas vinte e uma estações da linha e o tempo disponível para a realização do projeto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é realizada uma análise do referencial teórico sobre o problema de pesquisa. Inicialmente é definida a linha de montagem, em seguida é descrito o balanceamento das linhas de montagem, tratando do modelo simples e do modelo geral de balanceamento.

A taxonomia do problema de balanceamento é apresentada pelas características dos grafos de precedência, características das estações e da linha e pela taxonomia do objetivo do balanceamento.

Em seguida são descritos os quatro métodos de balanceamento das linhas de montagem: modelos matemáticos (exatos), heurísticas, metaheurísticas e simulação.

A última seção descreve o problema de sequenciamento da produção.

### 2.1 LINHAS DE MONTAGEM

Linhas de montagem são sistemas de fluxos orientados de produção e são muito utilizadas na produção industrial de altas quantidades e produtos padronizados. Entre os problemas de decisão, problemas de balanceamento de linhas de montagem são atividades importantes para o planejamento de médio prazo (BECKER e SCHOLL, 2006; SCHOLL; BOYSEN e FLIEDNER, 2009). A configuração da linha define a capacidade de produção por vários anos (KIMMS, 2000).

Quanto ao número de produtos as linhas de produção podem ser classificadas em três tipos básicos (BECKER e SCHOLL, 2006; SMIDERLE; VITO e FRIES, 1997):

- Linha de produção simples: Utilizada na produção em massa de um único produto, conforme FIGURA 1.

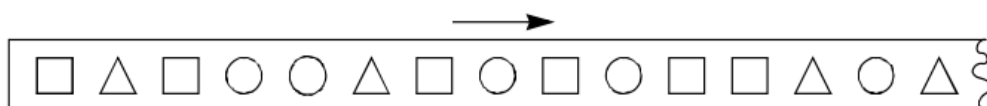
FIGURA 1 - LINHA DE PRODUÇÃO SIMPLES.



Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2006).

- Linha de produção mista: Utilizada na produção de vários modelos de um produto básico, sem a necessidade de *setup* (ou com um tempo de *setup* muito pequeno). A FIGURA 2 representa um exemplo deste tipo de linha.

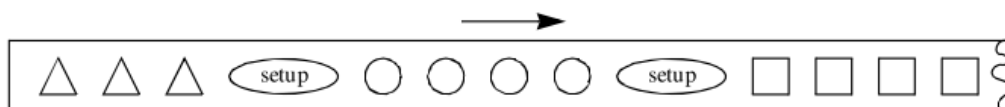
FIGURA 2 - LINHA DE PRODUÇÃO MISTA.



Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2006).

- Linha multi-modelo: Utilizada quando existem diferenças significativas nos processos produtivos de cada modelo. Para minimizar a ineficiência do tempo de *setup* entre os modelos são utilizados lotes. Surge o problema de dimensionamento dos lotes. Esse tipo de linha está ilustrada na FIGURA 3.

FIGURA 3 - LINHA MULTI-MODELO.



Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2006).

Boysen, Fliedner e Scholl (2008) classificam as linhas de acordo com o movimento dos produtos:

- Linha compassada: Os produtos têm um avanço contínuo na linha. Eles são puxados por uma correia a uma velocidade constante.
- Linha descompassada síncrona: Os produtos têm um avanço intermitente na linha e são transferidos para a próxima estação ao mesmo tempo, normalmente por uma correia, quando todos os postos de trabalho terminam as tarefas.
- Linha descompassada assíncrona: Os produtos têm um avanço intermitente na linha e são transferidos para a próxima estação de forma dessincronizada, quando o posto de trabalho termina as tarefas, sem a necessidade de espera dos demais postos terminarem também.

Outras características que podem ser atribuídas às linhas são (BECKER e SCHOLL, 2006; SMIDERLE; VITO e FRIES, 1997):

- Linha em série: As várias estações estão arranjadas em volta de uma correia transportadora. Esta é a forma mais tradicional de linha.
- Linha em U: O início e o fim da linha estão juntos, permitindo que as estações trabalhem em dois segmentos da linha.
- Estações paralelas: São utilizadas em pontos críticos da linha, para diminuir o risco de parada. Outra utilização é para executar uma tarefa com tempo maior de execução. Aumenta o investimento necessário, pois necessita da instalação do mesmo equipamento em todas as estações em paralelo.
- Linhas paralelas: A instalação de linhas paralelas torna o sistema menos sensível a falhas e aumenta sua flexibilidade, pois permite fácil adaptação à demanda pela mudança do número de linhas em funcionamento. Além do que, a falha em uma linha não causa paralisação total da produção. Necessita de um investimento maior em equipamentos.
- Linhas de dois lados: Consiste em duas linhas em série trabalhando em paralelo no mesmo produto, uma no lado direito e outra no lado esquerdo, utilizada na montagem de produtos muito grandes.

Alguns termos utilizados nas linhas de montagem devem ser definidos:

- Tempo de ciclo: Gaither e Frazier (2002), Ritzman e Krajewski (2004), Martins e Laugeni (2005), Reid e Sanders (2005) e Corrêa e Corrêa (2009) definem o tempo de ciclo como a frequência que com que uma peça deve sair da linha, ou o intervalo de tempo entre duas peças consecutivas e pode ser calculado pela equação 1:

$$c = \frac{\text{tempo disponível para a produção}}{\text{demanda}} \quad (1)$$

- Número mínimo teórico de operadores: caso apenas um operador trabalhe em cada estação de trabalho, pode ser chamado de número mínimo teórico de estações de trabalho. Para Gaither e Frazier (2002), Ritzman e Krajewski (2004), Martins e Laugeni (2005), Reid e Sanders

(2005) e Corrêa e Corrêa (2009) é a quantidade mínima teórica de operadores necessários para atingir determinada produção. O cálculo é feito pela equação 2:

$$MT = \frac{\text{tempo total para produzir uma peça na linha}}{\text{tempo de ciclo}} \quad (2)$$

- Tempo ocioso: é o tempo improdutivo total para todas as estações, calculado pela equação 3 (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004):

$$\text{Tempo ocioso} = n * c - \sum t \quad (3)$$

onde:

$n$  = número de estações;

$c$  = tempo de ciclo;

$\sum t$  = tempo total exigido para montar cada unidade.

- Utilização: também chamada de eficiência é a porcentagem de tempo que a linha de produção trabalha e é calculada pela equação 4 (REID e SANDERS, 2005; RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004):

$$E(\%) = \frac{\sum t}{nc} * 100 \quad (4)$$

Gaither e Frazier (2002) e Martins e Laugen (2005) utilizam a equação 5 para o cálculo:

$$E(\%) = \frac{\text{Número mínimo teórico de operadores na estação}}{\text{Número real de operadores}} * 100 \quad (5)$$

Neste trabalho será utilizado a equação 4 para o cálculo da utilização.

- Atraso de balanceamento: no caso da linha produzir vários modelos, pode ser calculado o atraso de balanceamento para cada modelo pela seguinte equação (DONNINI; MAGATÃO e RODRIGUES, 2010):

$$\text{Atraso de balanceamento } (\%)_p = \frac{t_{total,p} - \sum_{m \in M} t_{m,p}}{t_{total,p}} \quad \forall p \in P \quad (6)$$

onde:

$t_{total,p} = \text{tempo de ciclo } c \text{ do modelo } p \times \text{número de estações } m$

$t_{m,p} = \text{tempo de montagem do modelo } p \text{ na estação } m$

Na equação 6 o modelo  $p$  pertence ao conjunto  $P$  e a estação de trabalho  $m$  pertence ao conjunto  $M$ . Após o cálculo para cada modelo, os valores são somados e é obtido o atraso de balanceamento da linha.

## 2.2 BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

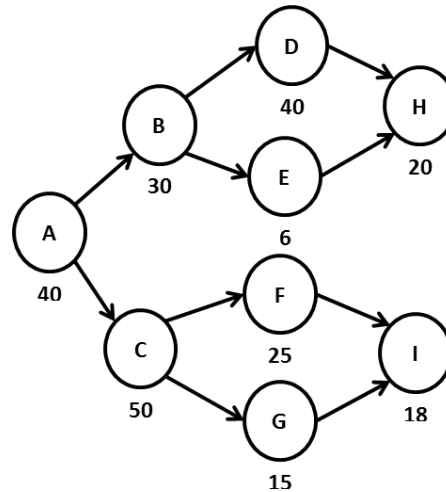
Para Magatão *et al.* (2011), Farnes e Pereira (2007) e Falkenauer (2005) o conceito básico de balanceamento de linha é atribuição de tarefas às estações em uma linha de modo a obter o índice de produção (ou tempo de ciclo) desejado com menor número de estações de trabalho (funcionários), ou visar a minimização do tempo de ciclo para um determinado número de funcionários. O número de estações ou o tempo de ciclo são medidas de desempenho a serem otimizadas.

Vários modelos de otimização que buscam dar suporte ao processo de decisão estão surgindo sobre o termo Balanceamento de Linhas de Montagem. A primeira formalização matemática foi feita por Salveson em 1955, desde então os trabalhos acadêmicos estão principalmente focados na alocação das tarefas às estações de trabalho (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007). Recentemente cada vez mais trabalhos têm tentado expandir o problema, integrando aspectos como: linhas em U, estações em paralelo, alternativas de processamento e linhas de produção mista (BECKER e SCHOLL, 2006).

O diagrama de precedência, utilizado no estudo do balanceamento, é construído para ajudar a visualização das tarefas predecessoras. Os elementos de trabalho são indicados por círculos, com o tempo necessário para executar o trabalho abaixo de cada círculo. Setas conduzem dos predecessores imediatos ao próximo elemento do trabalho (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004). Slack, Chambers e Johnston (2009) afirmam que duas regras devem ser seguidas quando se está construindo o diagrama de precedência: os círculos devem ser desenhados o mais

possível à esquerda e nenhuma seta deve ser desenhada no sentido vertical. A FIGURA 4 mostra um exemplo de diagrama de precedência.

FIGURA 4 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIA.



Fonte: (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

Outro recurso para o estudo do balanceamento é a matriz de precedência. Enquanto o diagrama de precedência é mais visual, a matriz facilita os cálculos do balanceamento, por esse motivo será utilizada na implementação computacional. Seu formato é triangular com valores iguais a 0 ou 1. A célula (i,j) da matriz representa a precedência entre as tarefas i e j do processo. Se o valor for igual a 1, a tarefa j só pode ser realizada após a tarefa i ter sido concluída, se igual a 0 não existe dependência entre as tarefas. A precedência indicada na matriz pode ou não ser imediata (GERHARDT, 2005; GÖKCEN e EREL, 1998). A matriz de precedência do exemplo de diagrama da FIGURA 4 pode ser vista na FIGURA 5.

FIGURA 5 - EXEMPLO DE MATRIZ DE PRECEDÊNCIA.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		1	1	1	1	1	1	1	1
B			0	1	1	0	0	1	0
C				0	0	1	1	0	1
D					0	0	0	1	0
E						0	0	1	0
F							0	0	1
G								0	1
H									0
I									

Fonte: O autor (2013).



Gaither e Frazier (2002) descrevem o procedimento geral de balanceamento de linha da seguinte forma:

1. Determine quais tarefas devem ser executadas para concluir uma unidade de um produto particular.
2. Determine a ordem ou sequência na qual as tarefas devem ser executadas.
3. Trace um diagrama de precedência.
4. Estime as durações das tarefas.
5. Calcule o tempo de ciclo.
6. Calcule o número mínimo de estações de trabalho.
7. Use uma regra para atribuir tarefas a estações de trabalho de forma que a linha de produção seja balanceada.

Segundo os autores, os quatro primeiros passos sempre serão seguidos para o balanceamento, não importando o método escolhido.

### 2.3 PROBLEMA SIMPLIFICADO DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Um dos mais estudados problemas de balanceamento é chamado de Problema de Balanceamento de Linha de Montagem Simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP), nesse caso algumas considerações são feitas (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007; SCHOLL, BOYSEN e FLIEDNER, 2009):

1. Produção de apenas um produto.
2. Todas as tarefas são processadas de um determinado modo (não existem alternativas).
3. Linhas de montagem com tempo de ciclo fixo.
4. A linha é considerada serial, sem linhas de abastecimento ou paralelas.
5. A sequência de processamento das tarefas deve seguir as restrições de precedência.
6. Os tempos das tarefas são determinísticos.
7. As únicas restrições para atribuir às tarefas devem ser de precedência.
8. Uma tarefa não pode ser dividida em duas ou mais estações de trabalho.

9. Todas as estações são igualmente equipadas com máquinas e operadores.

Segundo Cristo (2010) a resolução de todos os demais problemas de balanceamento de linha de montagens são derivados do SALBP, por isso este vem sendo cada vez mais estudado, porém situações reais que respeitam as nove condições feitas são praticamente inexistentes.

Os problemas que não atendem as nove condições anteriores são classificados como Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem Generalizado (*Generalized Assembly Line Balancing Problem* - GALBP) e serão apresentados na seção seguinte (BECKER e SCHOLL, 2006).

Os SALBP podem ser divididos em quatro tipos, conforme o QUADRO 1. O primeiro, chamado de SALBP-F, verifica a viabilidade (F - *Feasible*) do problema para um dado tempo de ciclo e número de estações. O SALBP-1 minimiza o número de estações para um tempo de ciclo dado, enquanto o SALBP-2 minimiza o tempo de ciclo para um determinado número de estações. O SALBP-E é o problema mais geral, maximizando a eficiência (E - *Efficiency*) da linha, minimizando tempo de ciclo e número de estações (BECKER e SCHOLL, 2006; BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

QUADRO 1 - VERSÕES DO SALBP.

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

Fonte: (BECKER e SCHOLL, 2006).

## 2.4 PROBLEMA GERAL DE BALANCEAMENTO E TAXONOMIA DE LINHAS DE MONTAGEM

Os SALBP não têm muita aplicabilidade nos casos reais, isso pode ser verificado pelas dificuldades para as indústrias aplicarem os modelos teóricos de balanceamento de linhas de montagem, identificadas por Falkenauer (2005):

- Não balancear, mas rebalancear: muitos estudos consideram que a linha ainda será construída. O autor considera a simplificação mais

grave, pois esse caso é o menos frequente. Os casos mais frequentes são de rebalanceamento de linhas existentes.

- Estações de trabalho tem identidade: como a maioria dos casos as linhas já existem, as estações já possuem identidade. Cada estação tem suas restrições de espaço, equipamentos pesados com um custo alto de movimentação, capacidade de determinados recursos e restrições de processos que podem ser realizados.
- Operações fixas e restrições de zoneamento: operações fixas só podem ser realizadas em determinada estação e restrições de zoneamento ocorrem quando a operação pode ser realizada em determinadas estações (não necessariamente contíguas).
- Impossibilidade de eliminar estações: a eliminação de estações só pode ocorrer no início ou final da linha existente, caso a estação seja intermediária, surgirão buracos no meio da linha.
- Necessidade de equilibrar a carga de trabalho: como eliminar estações de trabalho não é possível, após atingir o tempo de ciclo desejado o objetivo é minimizar o quadrado das diferenças de carga de trabalho entre as estações.
- Múltiplos operadores: as estações podem ter mais de um operador trabalhando no produto ao mesmo tempo. A dificuldade pode ocorrer nas restrições de precedência, onde um operador necessite esperar (fique ocioso) outro operador terminar alguma atividade para continuar com as suas atividades.
- Operações de múltiplos operadores: algumas atividades necessitam que um segundo operador ajude no processo.
- Restrições ergonômicas: as restrições ergonômicas podem estar relacionadas com a estação, caso uma atividade necessite que o produto seja levantado, as demais tarefas também devem ser realizadas com o produto levantado, outras possibilidades são atividades nas laterais, frente, atrás ou com o produto inclinado. Relacionados com os operadores são restrições de trabalho no mesmo local ao mesmo tempo, alocação de tarefas no mesmo local do produto, evitando deslocamentos.

- Múltiplos produtos: Para o autor a montagem de apenas um produto é extremamente rara. Pode-se para esta situação utilizar a média dos tempos para o balanceamento, redução dos tempos de pico do modelo mais lento ou no caso de operações raras e demoradas um operador pode seguir a linha com o produto realizando a operação e no final volta ao posto de início da operação.

Boysen, Fliedner e Scholl (2007) constroem uma taxonomia para os GALBP utilizando a notação que Graham em 1979 utilizou para organização do cronograma de operações de máquinas. O problema consiste de três elementos básicos: características do grafo de precedência ( $\alpha$ ), características da linha ou estação ( $\beta$ ) e objetivos ( $\gamma$ ). Os autores ainda descrevem uma série de restrições possíveis para cada elemento ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). No ano seguinte os autores descrevem vários trabalhos que tratam sobre cada restrição (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

#### 2.4.1 Características do Grafo de Precedência

As características do grafo de precedência podem ser representadas por seis atributos (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007):

- Grafos de precedência específicos para os produtos ( $\alpha_1$ ).
- Estrutura do grafo de precedência ( $\alpha_2$ ).
- Tempos de processamento ( $\alpha_3$ ).
- Incremento de tempo de processamento das tarefas dependente da sequência ( $\alpha_4$ ).
- Restrições de alocação ( $\alpha_5$ ).
- Alternativas de processamento ( $\alpha_6$ ).

O atributo dos grafos de precedência específicos para os produtos ( $\alpha_1$ ) pode ser dividido em três, conforme QUADRO 2. O atributo é determinado pela quantidade de produtos fabricados, mas o balanceamento da linha é afetado pelo nível de homogeneidade entre os grafos (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007). O estudo dos modelos mistos ( $\alpha_1 = \text{mix}$ ) teve início com Thomopoulos em 1970 (BOCK, 2008). Para Gehardt (2005), a contribuição mais importante de Thomopoulos foi a possibilidade de união dos diagramas de precedência referentes

a cada modelo em um diagrama de precedência equivalente, como consequência, a diminuição da desigualdade da quantidade de trabalho ao longo da linha.

QUADRO 2- TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_1$ .

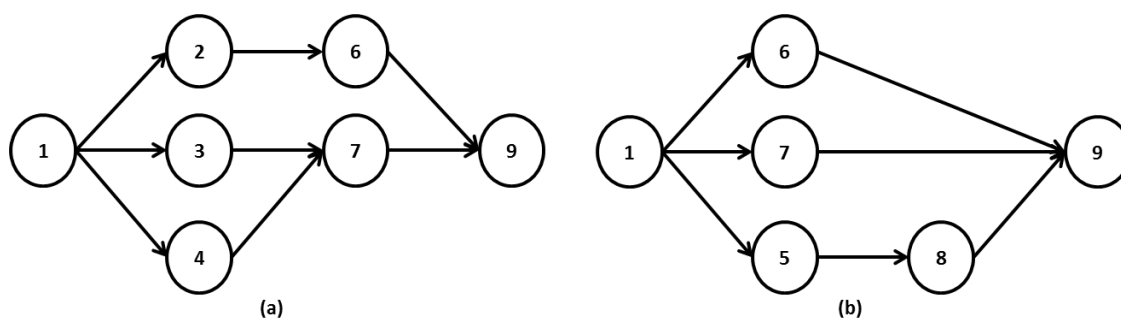
Grafos de precedência específicos para os produtos	
$\alpha_1 = \text{mix}$	Produção de modelos mistos
$\alpha_1 = \text{multi}$	Produção multi-modelo
$\alpha_1 = \circ$	Produção de modelo único

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

A união dos grafos de precedência apenas pode ser realizada se não existirem conflitos de precedência entre os modelos, por exemplo, se um modelo requer que a tarefa A seja realizada antes da B, então nenhum outro modelo deve requerer que a tarefa B seja realizada antes da A (GÖKCEN e EREL, 1998).

O grafo de precedência equivalente é construído pela combinação das matrizes de precedência de cada um dos modelos. Na FIGURA 6 é representado um exemplo de dois grafos de precedência, em seguida, a FIGURA 7 contém suas respectivas matrizes de precedência. Na montagem de uma matriz de precedência equivalente, o valor de uma tarefa é igual a 1 se em qualquer das matrizes de precedências dos modelos considerados o valor para essa tarefa seja igual a 1 (GERHARDT, 2005).

FIGURA 6 - GRAFOS DE PRECEDÊNCIA PARA (A) MODELO A E (B) MODELO B.



Fonte: (GERHARDT, 2005).

FIGURA 7 - MATRIZ DE PRECEDÊNCIA PARA (A) MODELO A E (B) MODELO B.

	1	2	3	4	6	7	9
1		1	1	1	1	1	1
2			0	0	1	0	1
3				0	0	1	1
4					0	1	1
6						0	1
7							1
9							

(a)

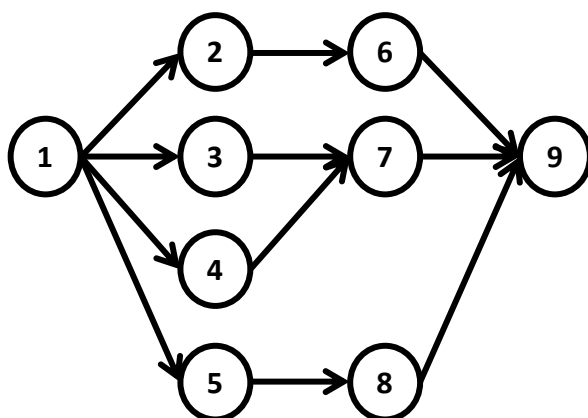
	1	5	6	7	8	9
1		1	1	1	1	1
5			0	0	1	1
6				0	0	1
7					0	1
8						1
9						

(b)

Fonte: (GERHARDT, 2005).

A FIGURA 8 contém o grafo e a matriz de precedência equivalente para os modelos A e B.

FIGURA 8 - GRAFO E MATRIZ DE PRECEDÊNCIA EQUIVALENTE.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1	1	1	1	1	1	1	1
2			0	0	0	1	0	0	1
3				0	0	0	1	0	1
4					0	0	1	0	1
5						0	0	1	1
6							0	0	1
7								0	1
8									1
9									

Fonte: (GERHARDT, 2005).

Na construção do diagrama equivalente os tempos de processamento equivalentes são calculados a partir da taxa de produção de cada modelo em um determinado período de tempo (o somatório da taxa de produção de todos os modelos tem que ser igual a um). Multiplicando o tempo de execução da tarefa de cada modelo pelo percentual de demanda do modelo e fazendo o somatório para cada tarefa, obtendo assim um tempo equivalente (SIMARIA e VILARINHO, 2004).

Yavuz e Tufekci (2006) desenvolveram um método de programação dinâmica, que nos problemas de multi-modelos ( $\alpha_1 = \text{multi}$ ) primeiramente calculam o tamanho dos lotes e em seguida a sequência dos lotes. Os autores resolvem esse problema

com a filosofia do *Just In Time* (JIT) em mente, visando à minimização dos lotes e o nivelamento da produção.

A estrutura dos grafos ( $\alpha_2$ ), representada no QUADRO 3, pode ter qualquer estrutura acíclica ( $\alpha_2 = \circ$ ) ou em alguns estudos podem ser restringidas para estruturas especiais ( $\alpha_2 = \text{spec}$ ) como: lineares, divergentes ou convergentes. As estruturas especiais são utilizadas para o desenvolvimento de algoritmos específicos mais eficientes (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 3 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_2$ .

Estrutura do grafo de precedência	
$\alpha_2 = \text{spec}$	Restrição para estrutura especial no grafo de precedência
$\alpha_2 = \circ$	O grafo pode ter qualquer estrutura acíclica

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

A divisão dos tempos de processamento ( $\alpha_3$ ) é feita conforme o QUADRO 4. Quando as tarefas são realizadas de forma automatizada ou são muito simples os tempos de processamento são determinísticos ( $\alpha_3 = \circ$ ), ou seja, não apresentam variação. Os tempos podem apresentar variações e serem chamados de estocásticos ( $\alpha_3 = t^{\text{sto}}$ ) devido à instabilidade dos humanos, que dependem de aspectos como: velocidade do trabalho, habilidade e motivação. Tempos dinâmicos ( $\alpha_3 = t^{\text{dy}}$ ) consideram a reduções dos tempos, que podem ocorrer pela curva de aprendizagem e melhorias sucessivas do processo de produção (BECKER e SCHOLL, 2006).

QUADRO 4 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_3$ .

Tempos de processamento	
$\alpha_3 = t^{\text{sto}}$	Estocásticos
$\alpha_3 = t^{\text{dy}}$	Dinâmicos (curva de aprendizagem)
$\alpha_3 = \circ$	Estáticos e determinísticos

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

Para Liu, Ong e Huang (2005) três aproximações estão sendo usadas para modelar os problemas com tempo estocásticos. A primeira é considerar os tempos determinísticos e alocar tarefas nas estações até um percentual determinado do

tempo de ciclo. As dificuldades, neste caso, estão na determinação do valor adequado para o percentual e a possibilidade de desperdício do tempo de ciclo. A segunda considera a probabilidade das tarefas ultrapassarem o tempo de ciclo em cada estação, este valor deve ser menor que um valor determinado. Nesta forma, caso a linha seja muito grande a probabilidade do tempo de ciclo ser excedido em um posto é alta. A terceira considera os custos de produção e de não completar as tarefas, porém esse custo pode ser difícil de ser estimado corretamente.

Fernandes e Dalalio (2000) propõem dois métodos para considerar a curva de aprendizagem: teoria da curva de aprendizagem ou método das médias móveis com suavização exponencial. Indicando o primeiro caso existam muitos trabalhadores novos na linha, caso contrário, o segundo.

Dependendo da sequência de execução das tarefas o tempo pode ser incrementado ( $\alpha_4$ ), conforme o QUADRO 5. Isto pode ocorrer de maneira direta ( $\alpha_4 = \Delta t_{dir}$ ), por exemplo, atividade de *setup* ou deslocamento entre as atividades (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007; SCHOLL; BOYSEN e FLIEDNER, 2008). Outra possibilidade é ocorrer de maneira indireta ( $\alpha_4 = \Delta t_{indir}$ ), por exemplo, as várias atividades não contribuem para a correta ergonomia do operador, incrementando o tempo devido à fadiga (CRISTO, 2010).

QUADRO 5 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_4$ .

Incremento de tempo de processamento das tarefas dependente da sequência	
$\alpha_4 = \Delta t_{dir}$	Devido à sucessão direta entre tarefas (troca de ferramenta)
$\alpha_4 = \Delta t_{indir}$	Devido à sucessão de tarefas (tarefas atrapalham uma as outras)
$\alpha_4 = \circ$	Incrementos de tempo das tarefas não considerados

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

As restrições de alocação ( $\alpha_5$ ), representadas no QUADRO 6, limitam a associação entre as tarefas e estações de trabalho. Pode ser necessário que algumas tarefas sejam executadas na mesma estação ( $\alpha_5 = link$ ), normalmente quando as tarefas compartilham algum recurso de alto valor, a situação contrária, quando não é possível alocar duas tarefas na mesma estação ( $\alpha_5 = inc$ ), ocorre em situação como solda e abastecimento de combustível. Pode ocorrer de um determinado valor cumulativo de alguma condição não poder ser ultrapassado ( $\alpha_5=cum$ ), por exemplo, restrição de espaço para estocar material. Uma situação no



balanceamento de linhas já existentes são restrições que determinadas tarefas devem ser realizadas em determinadas estações de trabalho ( $\alpha_5 = \text{fix}$ ), devido recursos que são de difícil movimentação, outra situação análoga são recursos que não podem ser instalados em determinadas estações, fazendo que determinadas tarefas não possam ser realizadas nestas estações ( $\alpha_5 = \text{excl}$ ). Algumas tarefas necessitam ser executadas em determinado tipo de estação ( $\alpha_5 = \text{type}$ ), por exemplo, tarefas a serem realizadas em baixo do produto. Uma distância (tempo, número de estações ou distância física) mínima entre tarefas ( $\alpha_5 = \text{min}$ ) pode ser necessária, por exemplo, após um processo de pintura é necessário esperar um tempo, para a tinta secar, antes de realizar uma tarefa no local. A distância pode ser máxima ( $\alpha_5 = \text{max}$ ), por exemplo, na aplicação de uma cola e a tarefa de posicionar o componente a ser colado antes da cola secar (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007; CRISTO, 2010).

QUADRO 6 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_5$ .

Restrições de alocação	
$\alpha_5 = \text{link}$	Tarefas interligadas devem ser alocadas na mesma estação
$\alpha_5 = \text{inc}$	Tarefas incompatíveis não podem ser combinadas na mesma estação
$\alpha_5 = \text{cum}$	Restrição cumulativa de alocação tarefa-estação
$\alpha_5 = \text{fix}$	Tarefas fixas só podem ser alocadas em determinada estação
$\alpha_5 = \text{excl.}$	Tarefas não devem ser alocadas em determinada estação
$\alpha_5 = \text{type}$	Tarefas devem ser alocadas em determinado tipo de estação
$\alpha_5 = \text{min}$	Mínima distância entre tarefas deve ser observada
$\alpha_5 = \text{max}$	Máxima distância entre tarefas deve ser observada
$\alpha_5 = \circ$	Nenhuma restrição de alocação é considerada

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

O último atributo do grafo de precedência está representado no QUADRO 7 e é referente à existência de alternativas de processamento ( $\alpha_6$ ), essas alternativas geram escolhas adicionais e o grafo de precedência pode sofrer mudanças. As alternativas de processamento podem gerar apenas mudanças nos tempos e custos de processamento ( $\alpha_6 = \text{pa}^\circ$ ), em outro caso, além dos tempos e custos, relações de precedências são afetadas ( $\alpha_6 = \text{pa}^{\text{prec}}$ ). A alternativa pode até mesmo mudar

totalmente uma parte do grafo de precedência ( $\alpha_6 = pa^{\text{subgraph}}$ ) (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 7 - TAXONOMIA DO GRAFO DE PRECEDÊNCIA PELO ATRIBUTO  $\alpha_6$ .

Alternativas de processamento	
$\alpha_6 = pa^\circ$	Tempos de processamento e custos são alterados
$\alpha_6 = pa^{\text{prec}}$	Restrições de precedência são alteradas
$\alpha_6 = pa^{\text{subgraph}}$	Subgrafos de precedência são alterados
$\alpha_6 = \circ$	Alternativas de processamento não são consideradas

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

#### 2.4.2 Características das Estações e da Linha

As estações e seu arranjo na linha de montagem podem ser representados por seis atributos (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007):

- Movimento dos produtos ( $\beta_1$ ).
- Leiaute da linha ( $\beta_2$ ).
- Paralelismo ( $\beta_3$ ).
- Alocação de recursos ( $\beta_4$ ).
- Estação sujeita a incrementos no tempo de processamento ( $\beta_5$ ).
- Aspectos adicionais da configuração da linha ( $\beta_6$ ).

A movimentação dos produtos ( $\beta_1$ ), representada no QUADRO 8, pode afetar o balanceamento, variando de acordo com os tipos de linha de montagem: compassada, descompassada síncrona e descompassada assíncrona que já foram descritos na Seção 2.1. As linhas compassadas e mistas ainda são subdivididas, podendo a média do volume de trabalho ser restrita pelo tempo de ciclo ( $\beta_1 = \circ$ ), outra possibilidade é que todos os modelos devem respeitar o tempo de ciclo ( $\beta_1 = \text{each}$ ) ou que os tempos de ciclo sejam respeitados com certa probabilidade ( $\beta_1 = \text{prob}$ ). O tempo de ciclo pode ser único para toda a linha de montagem (global) ( $\beta_1 = \circ$ ), em outro caso, determinadas estações de trabalho podem ter tempos de ciclo diferentes (locais) ou os modelos podem ter tempos de ciclo diferentes ( $\beta_1 = \text{div}$ ) (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 8 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_1$ .

Movimento dos produtos		
$\beta_1 = \circ\lambda u$	$\lambda = \circ$	Linha compassada e média do volume de trabalho restrito pelo tempo de ciclo
	$\lambda = \text{each}$	Linha compassada e cada modelo deve respeitar o tempo de ciclo
	$\lambda = \text{prob}$	Linha compassada e tempo de ciclo respeitado com certa probabilidade
	$u = \circ$	Linha compassada e tempo de ciclo único e global
	$u = \text{div}$	Linha compassada e tempos de ciclo locais
$\beta_1 = \text{unpac}^\circ$		Linha descompassada e assíncrona
$\beta_1 = \text{unpac}^{\text{syn}}$		Linha descompassada e síncrona

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

O leiaute da linha ( $\beta_2$ ) foi explicado na Seção 2.1 e suas três divisões possíveis estão representadas no QUADRO 9. Caso a linha tenha o formato de U ( $\beta_2 = u^\circ$ ), deve ser analisado quantos Us são formados ( $\beta_2 = u^n$ ). Segundo Becker e Scholl (2006), uma linha de montagem em formato de U deve ter um resultado melhor no balanceamento da linha de montagem, pois oferece um número maior de combinações de tarefa e estação de trabalho.

QUADRO 9 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_2$ .

Leiaute da linha	
$\beta_2 = \circ$	Linha em série
$\beta_2 = u^\circ$	Linha em U
$\beta_2 = u^n$	Linha em múltiplos Us, formando uma linha n-U

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

Linhas e estações paralelas ( $\beta_3$ ) são descritas na Seção 2.1 e suas características possíveis estão no QUADRO 10. As tarefas paralelas ( $\beta_3 = \text{ptask}^\wedge$ ) são tarefas alocadas a mais de uma estação de trabalho. Estações com locais de trabalho paralelos ( $\beta_3 = \text{pwork}^\wedge$ ) são estações que permitem mais de uma pessoa trabalhando no mesmo produto simultaneamente, um exemplo é a linha de dois lados (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007; FALKENAUER, 2005).

QUADRO 10 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_3$ .

Paralelismo	
$\beta_3 = p_{line}^\lambda$	Linhas paralelas
$\beta_3 = p_{stat}^\lambda$	Estações paralelas
$\beta_3 = p_{task}^\lambda$	Tarefas paralelas
$\beta_3 = p_{work}^\lambda$	Locais de trabalho paralelos na estação
$\beta_3 = \circ$	Nenhum tipo de paralelismo é considerado
$\lambda \in \{\circ, 2, 3, \dots\}$ : nível máximo de paralelismo; $\circ$ = sem restrição	

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

Alocação de recursos ( $\beta_4$ ) está relacionada com operadores, máquinas e ferramentas que dão habilidade ou capacidade tecnológica para a estação executar alguma atividade, as possibilidades estão representadas no QUADRO 11. No caso de cada estação ter que escolher exatamente um equipamento ( $\beta_4 = equip$ ) de uma série de equipamentos possíveis, o problema de balanceamento está relacionado com um problema de seleção de equipamento. Em vez de selecionar um equipamento, determinadas tarefas necessitam de um mesmo recurso (ferramenta ou máquina), caso essas tarefas forem alocadas na mesma estação ( $\beta_4 = res^{01}$ ), o valor de investimento é minimizado. Se as tarefas forem diferenciadas pela qualidade do recurso necessário (por exemplo, mão de obra mais qualificada), a tarefa com maior qualidade necessária define a qualidade do recurso ( $\beta_4 = res^{max}$ ) alocado na estação. Outros casos de sinergia e/ou dependência podem ocorrer ( $\beta_4 = res^\circ$ ) (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 11 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_4$ .

Alocação de recursos	
$\beta_4 = equip$	Problema de seleção de equipamento
$\beta_4 = res^{01}$	Se duas tarefas dividem um recurso, os custos de investimento são reduzidos na estação
$\beta_4 = res^{max}$	Tarefa mais complexa define o nível de qualificação necessária do recurso
$\beta_4 = res^\circ$	Outro tipo de sinergia e/ou dependência

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

O atributo de estações sujeitas a incrementos de tempo ( $\beta_6$ ), representado no QUADRO 12, é relativo a algum tempo da estação consumido por tarefas improdutivas ( $\beta_5 = \Delta t_{unp}$ ), que devem ser consideradas (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 12 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_5$ .

Estação sujeita a incrementos no tempo de processamento	
$\beta_5 = \Delta t_{unp}$	Atividades não produtivas na estação são consideradas
$\beta_5 = \circ$	Incrementos de tempos devido à estação não são considerados

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

Os aspectos adicionais ( $\beta_6$ ) dependem do sistema de produção utilizado, conforme representação no QUADRO 13. Caso devam ser alocados e dimensionados estoques ( $\beta_6 = \text{buffer}$ ). No caso de linhas secundárias que abasteçam a linha principal ( $\beta_6 = \text{feeder}$ ) e devam ser balanceadas ao mesmo tempo. Caso caixas de material devam ser posicionadas e dimensionadas ( $\beta_6 = \text{mat}$ ). Caso uma tarefa necessite que o produto seja colocado em determinada posição (por exemplo, levantado) deve ser decidido se a posição será fixa na estação ou se uma máquina irá mudar a posição do produto ( $\beta_6 = \text{change}$ ) (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

QUADRO 13 - TAXONOMIA DAS ESTAÇÕES E DA LINHA PELO ATRIBUTO  $\beta_6$ .

Aspectos adicionais da configuração da linha	
$\beta_6 = \text{buffer}$	Estoques devem ser alocados e dimensionados
$\beta_6 = \text{feeder}$	Linhas secundárias devem ser balanceadas simultaneamente
$\beta_6 = \text{mat}$	Caixas de material precisam ser posicionados e dimensionados
$\beta_6 = \text{change}$	Máquinas para a mudança da posição dos produtos são necessárias
$\beta_6 = \circ$	Não são considerados aspectos adicionais

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

### 2.4.3 Taxonomia dos Objetivos

A otimização do balanceamento da linha de montagem pode ser guiado por alguns objetivos que validam as soluções. Pode ser utilizado mais de um dos objetivos representados no QUADRO 14 (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007):

QUADRO 14 - TAXONOMIA DOS OBJETIVOS.

Objetivos	
$\gamma = m$	Minimizar o número de estações
$\gamma = c$	Minimizar o tempo de ciclo
$\gamma = E$	Maximizar a eficiência da linha
$\gamma = Co$	Minimizar o custo
$\gamma = Pr$	Maximizar a rentabilidade
$\gamma = SSL^{stat}$	Tempos das estações devem ser nivelados em uma estação (balanceamento horizontal)
$\gamma = SSL^{line}$	Tempos das estações devem ser nivelados entre as estações (balanceamento vertical)
$\gamma = score$	Maximizar ou minimizar algum indicador composto
$\gamma = \circ$	Busca apenas soluções viáveis

Fonte: (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2008).

O objetivo de minimização do número de estações ( $\gamma = m$ ) é escolhido de acordo com um planejamento, especificado pelo tempo de ciclo ou taxa de produção. O tempo de ciclo ( $\gamma = c$ ) é minimizado para um número de estações definido. Quando tanto as estações e o tempo de ciclo são minimizados a eficiência ( $\gamma = E$ ) da linha é maximizada. A minimização dos custos ( $\gamma = Co$ ) pode ser associada às tarefas, estações, alternativas de processamento e recursos. A maximização da rentabilidade ( $\gamma = Pr$ ) é definida pela diferença entre o valor e os custos. Podem ser utilizados no lugar ou adicionados aos objetivos já citados os objetivos de nivelamento. No caso de linhas de modelo misto a minimização da diferença de tempos entre modelos é chamada de balanceamento horizontal ( $\gamma = SSL^{stat}$ ). A minimização da diferença de tempos entre as estações é chamada de balanceamento vertical ( $\gamma = SSL^{line}$ ). Pode ser utilizada alguma maximização ou minimização de um indicador composto ( $\gamma = score$ ) relacionado a um ou mais

atributos, por exemplo, número de mudanças de posição da peça ou qualidade (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2007).

No início desta seção, 2.4, são expostos alguns motivos que fazem o balanceamento de linhas de montagem prático mais complexo que o teórico, pois neste várias considerações e simplificações são feitas. Em seguida a taxonomia dos grafos, estações, linhas de montagem e objetivos do balanceamento apresenta as possíveis variações, percebe-se que os problemas de balanceamento de linhas de montagem podem ser abordados de várias maneiras diferentes e incluindo uma ou mais variações.

## 2.5 MÉTODOS DE BALANCEAMENTO

O balanceamento das linhas de montagem pode ser realizado por quatro métodos diferentes: modelo matemático (método exato), heurísticas, metaheurísticas e simulação. Os quatro métodos são descritos a seguir.

### 2.5.1 Modelo Matemático

Para facilitar o entendimento a TABELA 1 apresenta as notações e define parâmetros e variáveis utilizadas nesta seção.

Os problemas de balanceamento geralmente são formulados com um problema de programação binária, onde a variável  $x_{ik}$  é igual a 1, se a tarefa  $i \in V$  está alocada na estação  $k \in M$ , caso contrário é igual a 0 (BOYSEN e FLIEDNER, 2008; CRISTO, 2010).

No modelo matemático do SALBP-1, a função objetivo minimiza o número de estações de trabalho dado um tempo de ciclo  $c$ . Está representada pela equação 7 e sujeita as restrições 8, 9, 10 e 11 (BOYSEN e FLIEDNER, 2008):

$$\text{Min } z = \sum_{k \in M} x_{nk} * k \quad (7)$$

$$\text{s.a } \sum_{k \in M} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \quad (8)$$

$$\sum_{k \in M} k * x_{ik} \leq \sum_{k \in M} k * x_{jk} \quad \forall (i, j) \in E \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ik} * t_i \leq c \quad \forall k \in M \quad (10)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V; k \in M \quad (11)$$

TABELA 1 – NOTAÇÕES UTILIZADAS NOS PROBLEMAS DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM.

Notações	
<b>V</b>	Conjunto de tarefas, $V = \{1, \dots, n\}$
<b>M</b>	Conjunto de estações, $M = \{1, \dots, m\}$
<b>E</b>	Conjunto das precedências imediatas
<b>P</b>	Conjunto de modelos de produtos
<b>c</b>	Tempo de ciclo
<b>m</b>	Número de estações de trabalho
<b><math>x_{ik}</math></b>	Variável binária com valor 1, se tarefa $i \in V$ está alocada na estação $k \in M$
<b><math>t_i</math></b>	Tempo de montagem da tarefa $i \in V$
<b><math>t_{il}</math></b>	Tempo de montagem da tarefa $i \in V$ do modelo $l \in P$
<b><math>dur_{kl}</math></b>	Somatório dos tempos das tarefas alocadas a estação $k \in M$ para cada modelo $l \in P$
<b><math>prop_l</math></b>	Proporção de ocupação da linha pelo modelo $l \in P$

Fonte: O autor (2013)

A equação 8 garante que cada tarefa será alocada apenas para uma estação, a inequação 9 restringe que cada atividade para ser alocada necessita que todas as predecessoras já tenham sido alocadas (o conjunto das precedências imediatas  $E$  contém todas as combinações  $(i,j)$  no caso de uma atividade  $i$  preceder a atividade  $j$ ) e a inequação 10 limita o somatório de tempo das atividades de cada estação de trabalho para o tempo de ciclo, onde  $t_i$  é o tempo de execução da atividade  $i$  (BOYSEN e FLIEDNER, 2008; CRISTO, 2010).

No SALBP-2, o tempo de ciclo é minimizado pela função objetivo, equação 12, para um determinado número de estações  $m$ . Tem o seguinte modelo (BOYSEN e FLIEDNER, 2008):

$$\text{Min } z = c \quad (12)$$

$$\text{s.a: } (8)-(11)$$

$$\sum_{k \in M} x_{|V|k} * k \leq m \quad (13)$$



Além de estar sujeita às equações 8, 9, 10 e 11 a função objetivo está sujeita a inequação 13 que garante que o número de estações não passe de  $m$  (BOYSEN e FLIEDNER, 2008).

Para o SALBP-E, que busca a eficiência da linha e minimiza o tempo de ciclo e o número de estações, utilizando a multiplicação deles na sua função objetivo, conforme a equação 14 e sujeita as equações 8, 9, 10, 11 e 13 (BOYSEN e FLIEDNER, 2008):

$$\text{Min } z = c * m \quad (14)$$

$$\text{s.a: } (8)-(11),(13)$$

Estes modelos têm pouca utilidade prática, porque é muito difícil encontrar situações que atendam às restrições do SALBP, mas eles são importantes, pois são a base para os modelos mais complexos. Modificações são feitas nesses modelos, visando uma maior similaridade com os problemas reais.

No caso do balanceamento de uma linha de modelo misto, minimizando o tempo de ciclo  $c$  e com o número de estações de trabalho  $m$  constante, Donnini, Magatão e Rodrigues (2010) propõem um modelo utilizando a equação 12 como função objetivo e sujeito às equações 8, 9 e a outras duas restrições:

$$\sum_{i \in V} t_{il} * x_{ik} = dur_{kl} \quad \forall k \in M ; \forall l \in P \quad (15)$$

$$\sum_{l \in P} prop_l * dur_{kl} \leq c \quad \forall k \in M \quad (16)$$

Na equação 15 o somatório do tempo das tarefas alocadas na estação  $m$  para cada modelo  $l$  do conjunto de modelos  $P$  será dado pela variável  $dur_{kl}$ . A multiplicação da proporção de ocupação da linha pelo modelo  $l$  pela variável  $dur_{kl}$  representa a ocupação equivalente do posto  $m$  pelo produto  $l$ . A inequação 16 garante que o somatório dos tempos equivalentes de ocupação do posto será igual ou menor que o tempo de ciclo (DONNINI; MAGATÃO e RODRIGUES, 2010).

Os modelos matemáticos geram soluções ótimas, porém em problemas maiores, como os encontrados nas indústrias, o tempo necessário para obtenção da solução acaba dificultando sua utilização. Eles são usados em problemas menores ou em problemas maiores com algumas considerações, visando sua simplificação.

### 2.5.2 Heurísticas

Para Hillier e Lieberman (2010), um método heurístico é um procedimento que pode encontrar uma boa solução viável para determinada classe de problemas, mas que não é, necessariamente, uma solução ótima. Para Amen (2001) a comparação justa entre uma solução heurística e a ótima deve considerar o tempo computacional gasto, isso também é válido quando se compara soluções de diferentes heurísticas.

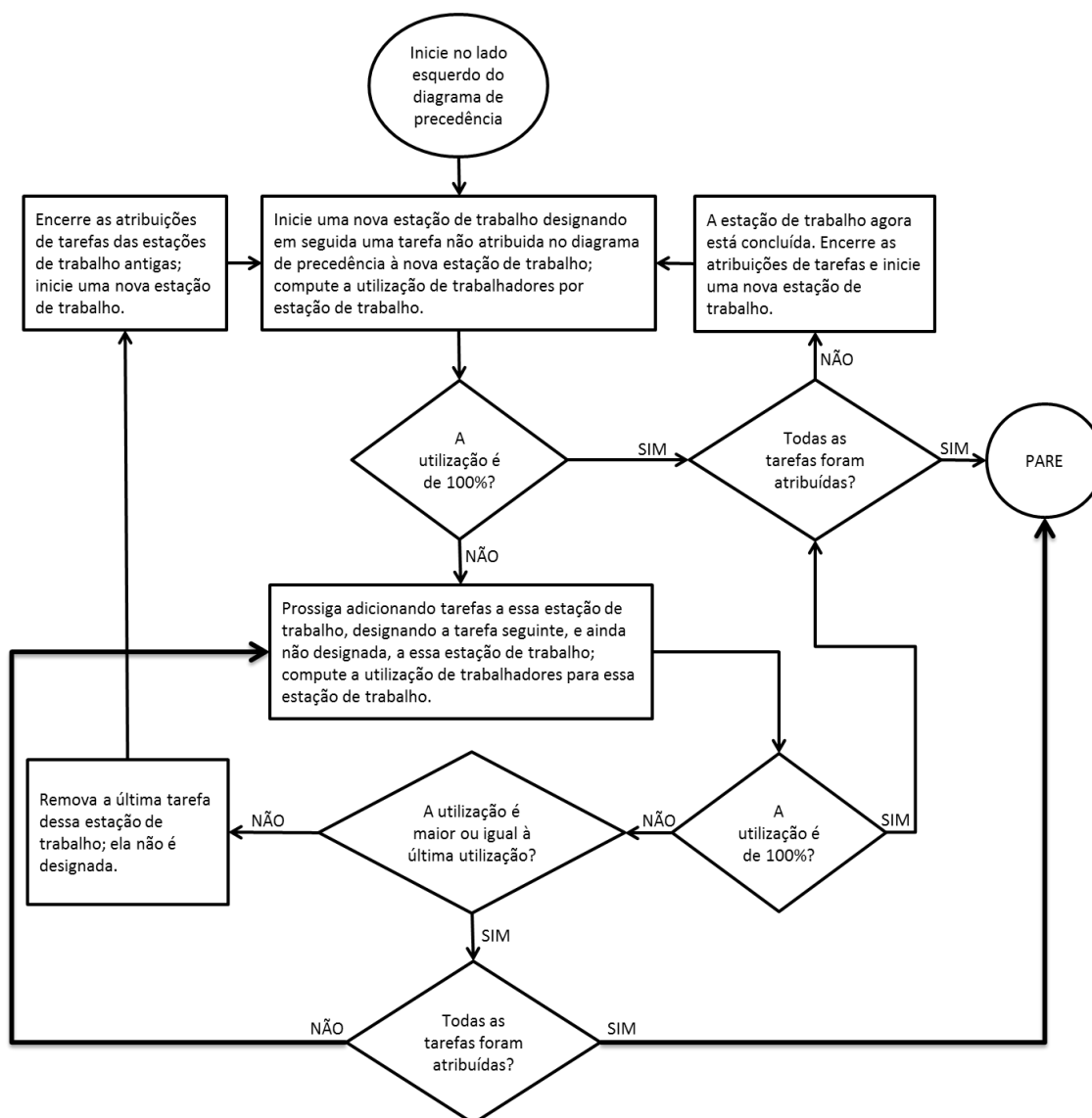
Segundo Gaither e Frazier (2002), os métodos heurísticos, ou baseados em regras simples, têm sido usados para desenvolver boas soluções para os problemas de balanceamento de linhas de montagem. Apesar de não resultarem nas soluções ótimas, as soluções obtidas são muito boas.

Em seguida serão apresentadas algumas regras heurísticas.

A Regra Heurística de Utilização Incremental acrescenta tarefas a uma estação de trabalho em ordem de precedência de tarefa. A cada tarefa acrescentada são adicionados operadores a estação, quando for necessário, e é realizado o cálculo da utilização dos trabalhadores, pela equação 4. As tarefas são adicionadas na estação até que a utilização dos operadores seja de 100% ou ocorra a redução da utilização, considerando a nova tarefa e mais um operador, quando necessário. Então, uma nova estação é considerada e o procedimento é repetido na estação de trabalho seguinte para as tarefas restantes (GAITHER e FRAZIER, 2002). O algoritmo da regra é representado na FIGURA 9.

Outra regra também descrita por Gaither e Frazier (2002) é a Regra Heurística da Tarefa de mais Longa Duração. Nesta regra as tarefas são alocadas a uma estação de trabalho, uma de cada vez, seguindo a ordem de precedência das tarefas. Caso existam duas ou mais tarefas alocáveis é escolhida a que tem a mais longa duração. Isso tem o efeito de designar o mais rápido possível as tarefas que são mais difíceis de encaixar numa estação de trabalho e as tarefas com durações menores são reservadas para se aprimorar a solução, preenchendo os tempos ociosos nas estações (GAITHER e FRAZIER, 2002).

FIGURA 9 - ALGORITMO DA REGRA HEURÍSTICA DE UTILIZAÇÃO INCREMENTAL.



Fonte: (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Essa regra segue os seguintes passos (GAITHER e FRAZIER, 2002):

1. Admitamos que  $i=1$ , onde  $i$  é o número da estação de trabalho que está sendo formada.
2. Faça uma lista de todas as tarefas candidatas a serem designadas a essa estação de trabalho. Para que uma tarefa esteja nessa lista, ela deve satisfazer a todas estas condições:
  - a. Ela não pode ter sido designada anteriormente a essa ou qualquer outra estação de trabalho.
  - b. Suas predecessoras imediatas devem ter sido atribuídas a essa estação de trabalho ou uma anterior.
  - c. A soma dessa duração de tarefa e de todas as outras durações de tarefa já designadas à estação de trabalho deve ser inferior ou igual à duração do ciclo. Se nenhuma candidata puder ser encontrada, vá para o Passo 4.

3. Designe a tarefa da lista que tem a mais longa duração à estação de trabalho.
4. Encerre a atribuição de tarefas à Estação de Trabalho  $i$ . Isso pode ocorrer de duas maneiras. Se não houver qualquer tarefa na lista de candidatas para a estação de trabalho, mas ainda houver tarefas a serem designadas, defina  $i=i+1$  e retorne ao Passo 2. Se não houver mais tarefas não designadas, o procedimento está completo.

Slack, Chambers e Johnston (2009) citam uma regra que segue os mesmos dois primeiros passos e o quarto passo da regra da tarefa de mais longa duração, porém a escolha da tarefa, realizada no terceiro passo, deve ser baseada na quantidade de tarefas subsequentes, ou seja, a tarefa com maior número de tarefas que só podem ser alocadas depois que essa tarefa o for, chamada de regra do Número de Tarefas Sucessoras.

Farnes e Pereira (2007) também utilizam uma regra que altera o passo de escolha da tarefa, a regra do Peso Posicional considera a soma do tempo das tarefas subsequentes. As tarefas são alocadas na ordem decrescente do Peso Posicional.

Grzechca (2008) compara oito técnicas heurísticas para determinar suas eficiências com problemas de tempos das tarefas e três para o problema de custos das tarefas. Entre as oito técnicas comparadas nos problemas de tempo a única que obteve a solução ótima foi a Heurística do Número de Tarefas Imediatamente Subsequentes. Outras regras utilizadas foram: Peso Posicional Invertido, similar ao Peso Posicional, mas considera a soma do tempo das tarefas predecessoras, e Número de Tarefas Predecessoras, a escolha da tarefa é feita baseada na quantidade de tarefas predecessoras. Segundo o autor tanto a minimização do custo como do tempo é importante para que o produto final fique mais competitivo.

A heurística COMSOAL foi desenvolvida pela empresa Chrysler e relatado por Arcus em 1966 no artigo "COMSOAL - A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Line". Esse método designa aleatoriamente tarefas às estações de trabalho e a cada iteração compara a solução corrente com a anterior e mantém a melhor solução (GROOVER, 2001). Para Togawa, de Paula e Álvares (2001) o método COMSOAL, comparado com outros métodos de balanceamento, é eficiente e simples.

Sete heurísticas citadas variam apenas em relação ao terceiro passo, referente à alocação da tarefa à estação de trabalho, dos quatro propostos por

Gaither e Frazier (2002). O QUADRO 15 mostra o terceiro passo para cada heurística.

QUADRO 15 – RELAÇÃO DAS HEURÍSTICAS E DA ESCOLHA DAS TAREFAS ALOCADAS ÀS ESTAÇÕES DE TRABALHO.

Heurística	Alocação da tarefa à estação de trabalho (terceiro passo)
Tarefa de mais Longa Duração.	Designe a tarefa da lista que tem a mais longa duração à estação de trabalho.
Número de Tarefas Sucessoras.	Designe a tarefa da lista que tem o maior número de tarefas sucessoras à estação de trabalho.
Peso Posicional.	Designe a tarefa da lista que tem o maior peso posicional (somatório dos tempos de todas as tarefas subsequentes) à estação de trabalho.
Número de Tarefas Imediatamente Subsequentes.	Designe a tarefa da lista que tem o maior número de tarefas imediatamente subsequentes à estação de trabalho.
Peso Posicional Invertido.	Designe a tarefa da lista que tem o maior peso posicional invertido (somatório dos tempos de todas as tarefas predecessoras) à estação de trabalho.
Número de Tarefas Predecessoras.	Designe a tarefa da lista que tem o maior número de tarefas predecessoras à estação de trabalho.
COMSOAL.	Designe a tarefa da lista de maneira aleatória à estação de trabalho.

Fonte: O autor (2013).

Capacho *et al.* (2006) definem um algoritmo geral e propõem cinco heurísticas para o problema de diferentes alternativas de montagem. As heurísticas variam na forma de escolha das tarefas que serão alocadas (passo 5) e o algoritmo geral é o seguinte:

1. Definir a condição de execução.
2. Selecionar as rotas de montagem e formar o conjunto de rotas selecionadas.

3. Formar o conjunto de tarefas disponíveis. As tarefas desse conjunto pertencem a rota selecionada.
4. Se o conjunto de tarefas disponíveis não estiver vazio, determinar o conjunto de tarefas alocáveis. Uma tarefa é alocável se todas as suas predecessoras já foram alocadas e o seu tempo mais o tempo das tarefas já alocadas à estação corrente não ultrapassar o tempo de ciclo.
5. Selecionar a próxima tarefa a ser alocada à estação corrente do conjunto de tarefas alocáveis.
6. Se não existirem mais tarefas alocáveis, mas existirem tarefas disponíveis, abrir uma nova estação.
7. Atualizar o conjunto de tarefas alocáveis.
8. Repetir os passos 5-7 até todas as tarefas serem alocadas.
9. Se a solução na iteração corrente melhorar a melhor solução guardada, guardar a solução corrente.
10. Repetir a partir do passo 2 enquanto mantiver a condição de execução.

Os autores obtiveram os melhores resultados para o algoritmo proposto utilizando a seleção de tarefas (passo 5) de maneira aleatória seguindo uma distribuição uniforme, repetida algumas vezes e guardando o melhor resultado.

As heurísticas tendem a ter uma utilização mais simples que o método exato ou metaheurísticas, podendo ser implementadas utilizando ferramentas como planilhas. Por este motivo, no presente trabalho, o balanceamento será realizado utilizando oito heurísticas: Regra Heurística da Tarefa de mais Longa Duração, Heurística do Número de Tarefas Imediatamente Subsequentes, COMSOAL, Regra Heurística de Utilização Incremental, Peso Posicional, Peso Posicional Invertido, Número de Tarefas Sucessoras e Número de Tarefas Predecessoras.

### 2.5.3 Metaheurísticas

Segundo Sanches (2010) o grande problema dos métodos heurísticos é a possibilidade do método ficar preso em regiões de “ótimos” locais, deixando de explorar regiões com boas soluções ou a solução ótima. As metaheurísticas foram desenvolvidas para evitar este problema. A lógica consiste em aprimorar os

procedimentos de determinada heurística, com o objetivo de evitar a estagnação em regiões de “ótimos” locais.

As metaheurísticas podem ser divididas em duas categorias, a primeira é a técnica de busca local, que parte de uma solução inicial e explora soluções vizinhas. Busca Tabu e Recozimento Simulado, em inglês *Simulated Annealing*, são exemplos dessa técnica. A segunda técnica é de busca populacional, que parte de um conjunto de soluções iniciais, denominado população inicial, e são aplicados operadores na tentativa de gerar novos e melhores indivíduos para a população. Exemplos dessa técnica são Algoritmo Genético e *Scatter Search* (HÖRNER, 2009).

A metaheurística Colônia de Formigas foi introduzida por Dorigo e colegas no início dos anos 90 e simula o comportamento das formigas quando deixam a colônia para buscar comida e voltam. As formigas deixam um feromônio por onde passam que é rastreado pelas outras formigas, que escolhem seguir ou não o caminho. As formigas fazem a escolha devido à quantidade de feromônio, quanto maior, maior a probabilidade de ser escolhido. Caso o caminho seja escolhido a formiga também deixará seu feromônio, quanto mais formigas passarem no mesmo caminho, mais feromônio este terá. Os caminhos mais curtos serão utilizados com maior frequência, pois as formigas irão buscar a comida e voltar em um menor tempo (DORIGO e BLUM, 2005; MCMULLEN, 2001).

Outra técnica utilizada é o *Simulated Annealing* que foi proposta em 1983 por Kirkpatrick (SANCHES, 2010). O conceito é baseado no recozimento de metais, onde o metal inicia com uma temperatura alta e é resfriado lentamente (AL-AOMAR, 2011). Uma diferença entre as demais técnicas de busca local é que durante o processo de busca essa técnica substitui a solução atual por uma solução relativamente inferior para evitar que fique parada em ótimos locais (MCMULLEN e FRAZIER, 2000).

A Busca Tabu é outra metaheurística utilizada, essa técnica inicia com uma solução e move na vizinhança para uma solução que pode ser melhor ou não. Utiliza uma lista Tabu que é atualizada a cada iteração, nesta lista estão as restrições para uma solução ser aceita ou não. O histórico de movimento é guardado para que não entre em um ciclo de soluções, evitando que fique parada em um ótimo local (GLOVER, 1986; LAPIERRE; RUIZ e SORIANO, 2006; SCHOLL e VOß, 1996).

O Algoritmo Genético utiliza buscas aleatórias para localizar a solução ótima em problemas complexos (TASAN e TUNALI, 2008). É um procedimento de busca

iterativa, baseado no processo biológico de seleção natural e herança genética (SIMARIA e VILARINHO, 2004). Pelas operações de reprodução, cruzamento e mutação novos elementos são formados para a população e os melhores sobrevivem. Com a mudança das gerações as soluções na população melhoram até próximo do ótimo (BEAN, 1994).

Segundo Simaria e Vilarinho (2004) os principais passos do Algoritmo Genético são:

1. Criar a população inicial (população de cromossomos).
2. Avaliar cada indivíduo (cromossomo) da população.
3. Selecionar um grupo de indivíduos para realizar os operadores genéticos (cruzamento e mutação).
4. Avaliar os descendentes gerados.
5. Aplicar uma estratégia de substituição para criar a nova geração.
6. Parar se o critério de parada for alcançado, caso contrário retornar ao passo 3.

Um cromossomo é a maneira de representar uma solução no Algoritmo Genético e decodificando um cromossomo resultará em uma solução (SIMARIA e VILARINHO, 2004).

No segundo passo dessa metaheurística é realizada a avaliação de cada cromossomo. Para cada indivíduo é atribuído um valor, baseado em uma função de aptidão, essa função é desenvolvida de acordo com os atributos que se deseja maximizar ou minimizar. Alguns exemplos que podem ser citados são: tempo de ciclo, número de estações de trabalho (como a redução desse atributo ocorre apenas com a redução de uma estação inteira, é difícil verificar qual dos cromossomos é mais apto, por esse motivo sua utilização feita juntamente com outro atributo), o quadrado do tempo ocioso e desbalanceamento (SIMARIA e VILARINHO, 2004; TASAN e TUNALI, 2008).

Os dois operadores genéticos, terceiro passo, são o cruzamento e a mutação. O cruzamento é o operador que seleciona dois elementos para gerarem um novo elemento para a população. O operador de mutação altera aleatoriamente elementos do cromossomo e é usado pra manter a diversidade da população. O operador de cruzamento é o principal operador e é utilizado sempre com uma taxa maior que o operador de mutação (HÖRNER, 2009; SIMARIA e VILARINHO, 2004; TASAN e TUNALI, 2008).



Para o balanceamento de linhas de montagem alguns cuidados devem ser tomados para que no cruzamento os novos elementos continuem respeitando as relações de precedência (CRISTO, 2010), porém Anderson e Ferris (1994) utilizam os métodos convencionais de cruzamento e mutação e comentam que ter soluções não factíveis na população ajuda na diversificação da busca, mas eles utilizam uma função de aptidão que penaliza as soluções não factíveis.

As diferentes metaheurísticas existentes tendem a ser versáteis, por serem métodos de solução geral, podendo ser aplicadas a diferentes tipos de problemas. Têm a vantagem sobre as heurísticas por tentar minimizar a estagnação da solução em “ótimos” locais.

#### 2.5.4 Simulação

Banks (1999) define a simulação como a imitação de operação, processo ou sistema real por um período de tempo. A simulação é utilizada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, ajudar o projeto de sistemas reais e responder perguntas do tipo “e se” sobre o sistema real.

Para Santoro e Moraes (2000), no âmbito da produção, algumas aplicações da simulação são: projeto e análise de sistemas de movimentação de materiais, linhas de fabricação e montagem, de sistemas de armazenagem automatizados.

Para Law e McComas (2000) uma das desvantagens da simulação é não ser uma técnica de otimização. O analista simula alguns números para a configuração do sistema e escolhe os que apresentam o melhor resultado.

Banks (1999) apresenta alguns conceitos importantes para simulação:

- Variáveis de estado do sistema: são uma coleção de informações do sistema, necessárias para definir o que está acontecendo no sistema num nível suficiente. As variáveis utilizadas na simulação de um mesmo sistema podem variar, pois dependem do propósito da simulação.
- Entidades e atributos: uma entidade representa um objeto que necessita de definição explícita e pode ser dinâmica, quando se move pelo sistema, ou estática. O automóvel numa linha de montagem é um exemplo de entidade dinâmica e o operador de entidade estática. As entidades podem ter atributos, por exemplo, o tempo entre cada

automóvel. Alguns atributos podem não ter importância dependendo da investigação, um exemplo é o atributo cor do veículo em uma investigação sobre tempos de montagem, quando a cor não influencia no tempo.

- Recursos: fornece um serviço para uma entidade dinâmica. A entidade fica durante algum tempo e depois libera o recurso.
- Lista de processamento: nos casos que o recurso pode prestar serviço para apenas uma entidade as demais ficam numa lista de espera para serem processadas na ordem definida.
- Atividades e atrasos: o tempo das atividades pode ser determinístico ou estocástico. O atraso tem tempo indefinido e pode ocorrer por combinação das condições do sistema.
- Modelo de simulação de evento discreto: nesse caso as variáveis de estado alteram apenas quando eventos acontecem.

Alguns *softwares* que podem ser utilizados para simulação são Arena, Promodel, Witness e Simul8 (SANCHES, 2010). Para realizar a otimização do sistema é necessário utilizar outro *software* específico em conjunto.

A simulação tem uma grande utilidade quando o objetivo é testar diferentes possibilidades, sem a necessidade de utilizar o sistema real. Porém a simulação é realizada apenas para os dados escolhidos pelo analista, não é realizada a otimização do sistema.

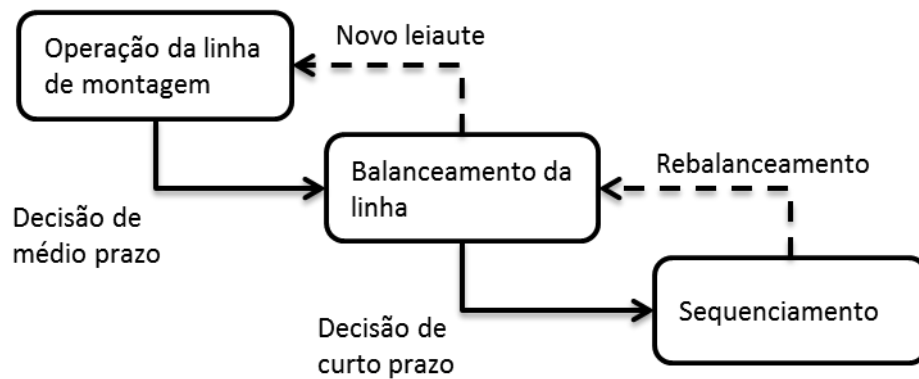
## 2.6 SEQUENCIAMENTO

O problema de sequenciamento é a decisão da sequência de produção de uma linha de produção mista para um determinado número de modelos em um horizonte de planejamento, por exemplo, um dia ou turno de produção (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2009; FATTAHI e SALEHI, 2009).

Para Sanches (2010) a globalização dos conceitos da manufatura enxuta e JIT colocaram o sequenciamento das linhas de montagem na condição de tarefa primordial para o alcance das metas estratégicas. O balanceamento gera a eficiência local, podendo ser uma estação de trabalho ou toda a linha de montagem, já o sequenciamento influencia a programação de toda a fábrica.

Na FIGURA 10, é representado o esquema de leiaute, sequenciamento e balanceamento de linhas de montagem. O balanceamento e sequenciamento são decisões de curto prazo e são realizadas em ciclo, após realizar o balanceamento é necessário sequenciar e após o sequenciamento é necessário rebalancear. O balanceamento e o leiaute da linha de montagem também devem ser realizados em ciclo, porém a decisão de mudança de leiaute é de médio prazo (CAO e MA, 2008).

FIGURA 10 - ARQUITETURA DE SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MODELO MISTO



Fonte: (CAO e MA, 2008).

Lummus (1995) apresenta três regras para o sequenciamento da linha de montagem:

- Na primeira regra a demanda de cada produto determina a sequência de produção. Por exemplo, dois modelos A e B com demanda de 80% e 20%, respectivamente, a sequência seria: AAAABAAAAB.
- A segunda regra de sequenciamento diminui as trocas de produto, reduzindo os *setups*. O exemplo anterior ficaria da seguinte maneira: AAAAAAAAAABB.
- A terceira regra é direcionada pela demanda, os produtos são produzidos seguindo a sequência de pedidos dos clientes, de maneira aleatória.

Nas regras descritas por Lummus (1995), os tempos de montagem dos diferentes modelos não são considerados, nem restrições da linha de montagem, qualquer sequência é possível de ser fabricada. Isso não é o que ocorre atualmente nas indústrias, como pode ser observado no trabalho de Boysen, Fliedner e Scholl

(2009). Esses autores citam que os problemas de sequenciamento de linhas de montagem são centrados em dois objetivos:

- Sobrecarga de trabalho: os modelos diferentes necessitam de tempos diferentes de montagem e caso ocorra sobrecarga de trabalho será necessário utilizar operadores flutuantes na estação. Com uma sequência que alterne os modelos mais lentos com os mais rápidos a sobrecarga de trabalho pode ser evitada.
- Objetivos *just in time*: cada modelo utiliza peças e materiais diferentes na montagem, para manter o objetivo do JIT a sequência deve manter o consumo de materiais estável, evitando a utilização de estoques em momentos de pico de demanda.

Três alternativas são possíveis para tratar dos problemas quando se quer minimizar a sobrecarga de trabalho e nivelar a utilização de peças (BOYSEN; FLIEDNER e SCHOLL, 2009):

- Sequenciamento de modelos mistos: essa alternativa minimiza ou evita sobrecarga de trabalho devido à sequência baseado em detalhes de tempos de operação, movimentação, tamanho das estações e outras características da linha.
- Sequenciamento de carros: utilizado para evitar a coleta de dados necessária na alternativa de sequenciar o mix de modelos. Isso é possível definindo regras de sequência do tipo  $H_0 : N_0$ , que significa que em  $N_0$  posições seguidas de uma sequência no máximo  $H_0$  ocorrências de um modelo  $o$  são permitidas. Buscam-se sequências que não violem as regras ou que violem o mínimo possível.
- A programação nivelada: as duas primeiras opções visam à minimização de restrições de capacidade, nivelar a programação busca uma sequência alinhada com a filosofia JIT. A sequência minimiza a diferença entre uma taxa de produção ideal, que foi definida previamente, e atual.

As regras de sequenciamento do tipo  $H_0 : N_0$ , descrita por Boysen, Fliedner e Scholl (2009), é chamada por Rocha (2005) de restrição de capacidade de razão ( $H_0/N_0$ ). Neste trabalho será utilizada a notação  $H_0/N_0$ . Isso significa que a cada  $N_0$

veículos apenas  $H_0$  podem ter a variante X. Por exemplo, uma restrição 1/3, significa que em 3 veículos, no máximo 1 veículo pode ter a variante X.

Além dos dois objetivos mais utilizados nos problemas de sequenciamento, citados por Boysen, Fliedner e Scholl (2009), existem os objetivos de minimizar o custo com *setup*, minimizar o risco de parada de linha e minimizar o tamanho da linha de montagem (HYUN, KIM e KIM, 1998).

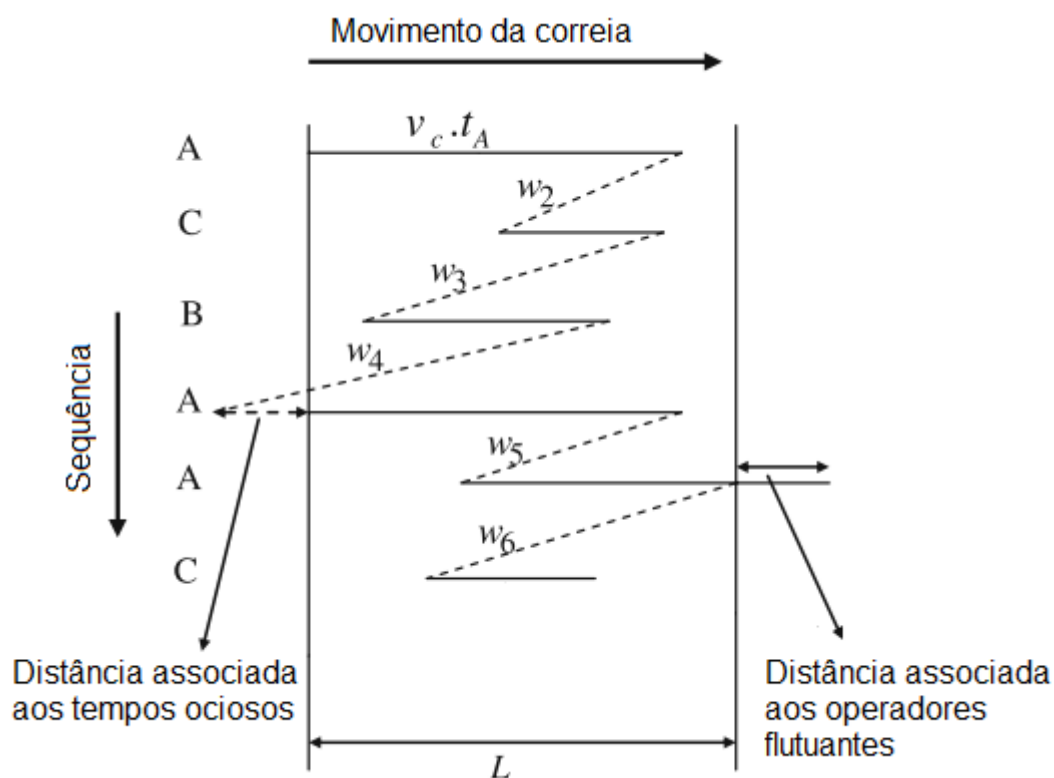
No trabalho desenvolvido por Rocha (2005) uma heurística é proposta para o sequenciamento de carros, visando à minimização das quebras de restrições do tipo de razão e minimização de troca de cores. A autora divide as quebras de restrições em alta e baixa prioridade. A priorização de objetivos a serem minimizados é feita na seguinte ordem: violações de restrições de alta prioridade, violações de restrições de baixa prioridade e trocas de cores. Uma solução inicial é criada com uma heurística construtiva e em seguida é analisada a troca de posição dos carros, caso gere uma redução na função objetivo, o veículo é trocado de posição. Para evitar que os veículos com algum tipo de restrição fiquem acumulados no final da sequência, estes veículos recebem uma priorização na seleção dos veículos que não quebrem restrições na construção da solução inicial.

Fattahi e Salehi (2009) em seu trabalho minimizam os tempos ociosos e a utilização de operadores flutuantes pela variação do tempo (distância) entre os produtos na linha de montagem. Considerando as estações de trabalho fechadas (os operadores não podem sair de seus postos), os autores desenvolveram uma heurística que determina qual a sequência de modelos que será produzida e qual o horário de entrada na linha de cada um, variando o tempo entre cada veículo.

A FIGURA 11 ilustra um exemplo que a sequência é A, C, B, A, A, C. No limite esquerdo da estação começa a ser executada a primeira operação (modelo A). Uma linha horizontal representa o início e fim da operação de montagem em relação à posição do produto na estação, essa distância pode ser calculada pela multiplicação da velocidade da correia  $v_c$  pelo tempo de montagem ( $t_p$ ) do modelo  $p$  na estação,  $L$  é o comprimento do posto. A distância entre dois veículos é representada por  $w_i$ , esta é obtida pela multiplicação da velocidade da correia  $v_c$  pelo intervalo de tempo entre a entrada na linha de cada produto. Caso o produto esteja dentro da estação o operador pode executar a montagem, se o operador terminar uma montagem e o produto seguinte não tiver cruzado o limite da estação, ocorrerá um tempo ocioso, isso ocorre no quarto produto da sequência (segundo modelo A).

A utilização de operadores flutuantes é necessária quando a montagem não é finalizada antes do limite da estação, quinto produto (terceiro modelo A) (FATTAHI e SALEHI, 2009).

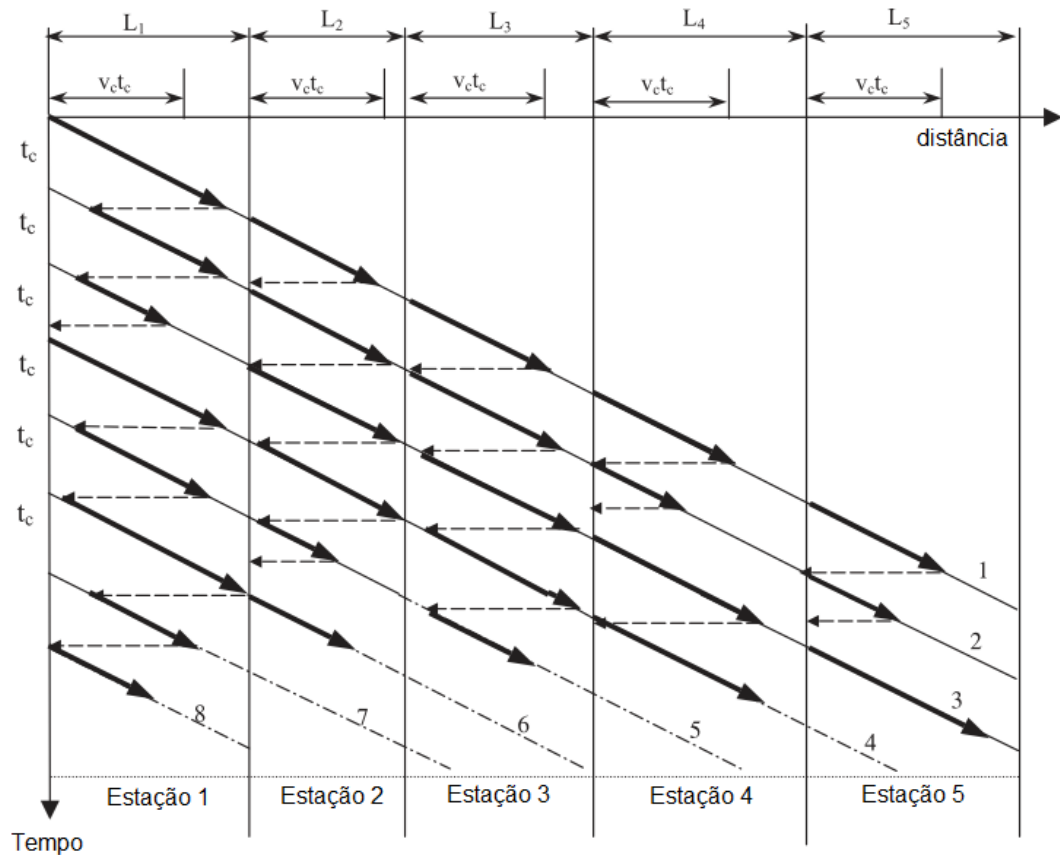
FIGURA 11 - OPERAÇÃO DE MONTAGEM EM UMA LINHA COM TEMPO ENTRE VEÍCULOS VARIÁVEL.



Fonte: (FATTAHI e SALEHI, 2009).

Celano, Costa e Fichera (2004) ilustram o fluxo de material e a movimentação dos operadores em cinco estações de trabalho, conforme FIGURA 12. A representação é um pouco diferente da utilizada por Fattahi e Salehi (2009), pois a movimentação dos operadores são as linhas horizontais e o fluxo do produto é representado pela linha inclinada, onde a flecha em negrito representa o tempo de montagem. Na figura não ocorre momentos de necessidade da utilização de operadores flutuantes, mas em alguns momentos, por exemplo, a estação 1 no final da montagem do produto 3, o operador tem que esperar a entrada do produto 4 na borda da estação. Na figura também é possível visualizar que o intervalo de tempo entre cada produto é fixo e igual ao tempo de ciclo.

FIGURA 12 – FLUXO DE MATERIAIS E MOVIMENTAÇÃO DE OPERADORES EM MÚLTIPLAS ESTAÇÕES DE TRABALHO.



Fonte: (CELANO, COSTA e FICHERA, 2004).

Quando a demanda de produtos é muito grande, por exemplo, 10.000 itens, sendo 3.000 do modelo A, 3.000 do modelo B e 4.000 do modelo C, pode-se fazer uso da estratégia de produção do *Minimal Part Set* (MPS). A demanda é dividida na menor porção possível que mantenha a proporção da demanda real. Primeiro é calculado o máximo divisor comum das demandas dos modelos que é chamado de frequência, no caso citado o valor é igual a 1.000, em seguida o valor das demandas parciais é dividido pela frequência. No exemplo os novos valores seriam de 3, 3 e 4 respectivamente para os modelos A, B e C e o cálculo da sequência é feito para esses novos valores e repetido pelo número de vezes da frequência. No caso a sequência seria feita apenas para 10 produtos e repetida 1.000 vezes, facilitando os cálculos de sequenciamento (DONG, LU e GUI, 2012; FATTAHI *et al.*, 2012).

Um estudo comparativo entre a realização do balanceamento e sequenciamento ao mesmo tempo com a realização das duas atividades em separado foi realizado por Sawik (2002). O autor realizou o balanceamento e

sequenciamento de diversos problemas de duas maneiras, a primeira ao mesmo tempo e a segunda balanceou as tarefas e em seguida sequenciou os modelos a entrarem na linha. Nos dois problemas o cálculo foi realizado utilizando o método exato, obtendo a mesma solução. Para os problemas simples a primeira alternativa obteve resultados com um menor tempo computacional, porém para problemas maiores a alternativa de realizar primeiro o balanceamento e em seguida o sequenciamento obteve resultados ótimos com menos esforço computacional.

A alternativa de balancear e sequenciar em separado também é utilizada por Uddin, Soto e Lastra (2010), que obtêm bons resultados pelo uso dessa alternativa. Zhu, Hu, Koren e Huang (2012) propõem que a linha seja sequenciada, podendo ser feito vários sequenciamentos, e em seguida balanceada para cada sequenciamento.

Hu e Linwei (2009) compararam o resultado de um sequenciamento de 16 produtos, de 5 modelos diferentes, utilizando o modelo matemático, algoritmo genético e recozimento simulado. Os resultados das metaheurísticas foram respectivamente 6% e 10% pior que a solução ótima, obtida pelo modelo matemático.

Os conceitos apresentados por Celano, Costa e Fichera (2004) e Fattahi e Salehi (2009), têm uma grande aplicação quando o objetivo do sequenciamento é reduzir os operadores flutuantes, tempos ociosos e pode ser utilizado juntamente com nivelamento da utilização de materiais.

Rocha (2005) apresenta uma heurística de sequenciamento por restrições. Neste trabalho não apenas os veículos com restrições serão priorizados na construção da solução, os veículos com prioridades de produção também terão preferência na escolha.



### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo é descrita a metodologia de pesquisa utilizada no presente estudo. Na primeira seção a pesquisa é classificada, na segunda seção é descrito o ambiente do estudo de campo, com algumas informações sobre a empresa utilizada. Na terceira seção são descritas as técnicas utilizadas para a coleta de dados.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A abordagem deste trabalho é uma pesquisa quantitativa. Com base nas modalidades de delineamento de pesquisa, este trabalho é classificado como um estudo de caso. Para Fachin (2006) o estudo de caso tem como função principal a explicação sistemática dos fatos que ocorrem e que geralmente se relacionam com uma multiplicidade de variáveis.

Gil (2009) descreve como utilizar as técnicas de coleta de dados no estudo de caso. Neste estudo foram usadas as seguintes:

- observação espontânea, Marconi e Lakatos (2010) denominam como assistemática, informal ordinária, simples, livre, ocasional e acidental: permanecendo alheio à comunidade, o pesquisador observa os fatos que ocorrem;
- documentação: consulta a documentos da empresa.

#### 3.2 AMBIENTE DA PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo foi realizada em uma empresa multinacional de grande porte do setor automotivo, localizada no estado do Paraná. A empresa foi escolhida pela abertura proporcionada ao pesquisador, juntamente com quatro alunos de graduação, que atuaram em diferentes projetos de pesquisa.

Por motivo de confidencialidade de informações, características específicas da empresa e de seus produtos, não serão detalhadas. Foram utilizados os dados de uma linha de montagem, que produz dois tipos diferentes de veículos, cada um com cerca de 500 famílias de variantes, como cor, ar condicionado e sistemas de segurança. Cada família de variante pode ter de duas a várias variantes, por

exemplo, com ar condicionado ou sem ar condicionado, ou no caso das cores com várias opções de escolha.

A linha de montagem é composta por 21 estações, onde trabalham aproximadamente 200 montadores. Os dados referentes à sequência de produção utilizados nesta pesquisa são do mês de julho de 2012. Estes dados foram utilizados para a geração e análise comparativa de novas alternativas de sequenciamento.

Utilizando a taxonomia da linha de montagem, apresentada no Capítulo 2, Seção 2.4, o grafo de precedência da linha de montagem deste estudo de caso é classificado como:  $\alpha_1 = \text{mix}$ ,  $\alpha_2 = \circ$ ,  $\alpha_3 = t^{\text{sto}}$ ,  $\alpha_4 = \circ$ ,  $\alpha_5 = \text{fix}$ ,  $\alpha_6 = \circ$ . Como a linha utiliza operadores, seus tempos são estocásticos, porém foram considerados tempos determinísticos ( $\alpha_3 = \circ$ ). A linha de montagem tem a seguinte classificação:  $\beta_1 = \circ$ ,  $\beta_2 = u$ ,  $\beta_3 = \text{pwork}$ ,  $\beta_4 = \circ$ ,  $\beta_5 = \circ$ ,  $\beta_6 = \circ$ . Apesar da linha de montagem ser em U, como foram utilizadas as primeiras estações a classificação  $\beta_2$  foi considerada igual a  $\circ$ . Em algumas estações de montagem ocorre paralelismo de tarefas ( $\beta_3 = \text{ptask}$ ), porém não ocorre paralelismo de tarefas nas estações consideradas para o problema de balanceamento. O objetivo é classificado como  $\gamma = m$ .

A empresa trabalha com tempo de ciclo único para toda a linha de montagem, fazendo uso de operadores flutuantes quando necessário. A sequência de produção é montada na venda dos produtos às concessionárias, com o auxílio de um *software*, onde são respeitadas todas as restrições de produção, como a quantidade de modelos mais lentos em relação aos modelos de tempo médio e capacidade diária máxima de produção de determinados componentes. O sistema da empresa utiliza apenas os valores de máximo diários de produção, transformando todas as restrições do tipo razão em restrições de máximo diário. Por exemplo, caso uma variante tenha uma restrição do tipo razão de 1/2 o sistema limitará a produção dessa variante para a metade da produção diária.

A venda dos produtos é realizada por um sistema onde as concessionárias inserem os pedidos e a data de entrega desejada, o sistema verifica a possibilidade da produção para entrega no dia desejado. Caso a sequência de produção esteja completa ou a inserção do modelo não respeite alguma restrição, o sistema informa à concessionária que a data não é possível, se a concessionária insistir com a data, o planejador de produção é avisado, verifica o motivo da impossibilidade e negocia soluções.

### 3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A COLETA

Yin (2010) descreve três princípios dominantes nos estudos de caso, sendo um deles a utilização de duas ou mais fontes de evidência para a coleta dos dados. No acompanhamento dos departamentos da empresa os dados foram coletados por observação espontânea e documentação (GIL, 2009).

Utilizando análise documental e observação foi realizado um levantamento de todas as variantes de processo de montagem e quais as implicações nos diferentes agentes da produção: linha de produção, fornecedores internos e processos após a montagem. As variantes que afetam os processos de montagem e os fornecedores foram identificadas com ajuda dos especialistas das áreas responsáveis por esses processos.

A sequência de montagem por dia de produção do mês de julho foi obtida pela análise documental.

Os processos necessários e as relações de precedência para a montagem de cada modelo foram coletados por meio das instruções de trabalho da empresa e observação do funcionamento da linha de montagem.

A identificação dos processos semelhantes necessários para a montagem foi realizada com a ajuda dos especialistas nos processos dos diferentes veículos produzidos, juntamente com as folhas de processo.

Foram utilizados os tempos de montagem de cada processo dos diferentes modelos produzidos pela empresa. Os valores são cronometrados pela empresa quando existem mudanças de processo e a cada montagem eles são coletados automaticamente por um sistema eletrônico e atualizados no banco de dados da empresa. Os valores para os tempos de montagem foram os que constam neste sistema da empresa.

Visando à confidencialidade dos dados reais da empresa, os tempos utilizados foram multiplicados por um fator de conversão e foram expressos em unidades de tempo (UT).

No QUADRO 16 os objetivos específicos do estudo foram relacionados com as técnicas de coleta de dados e o tratamento dos dados que foram utilizados.

QUADRO 16 - TÉCNICAS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS POR OBJETIVOS.

Objetivos	Atividades	Técnica de coleta de dados	Tratamento dos dados
Pesquisar os diferentes métodos, teóricos e práticos, de balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem de modelo misto.	Pesquisa bibliográfica dos métodos teóricos de balanceamento e sequenciamento.	Análise documental.	Os dados foram armazenados para análise dos métodos possíveis para o balanceamento e sequenciamento.
	Pesquisa dos métodos práticos de balanceamento e sequenciamento.	Análise documental.	
Definir critérios para comparar os métodos.	Análise de quais critérios utilizar para comparar os métodos de balanceamento e sequenciamento.	Análise documental.	Anotações relativas à empresa e critérios utilizados na literatura.
Coletar dados de uma empresa de grande porte do setor automotivo e aplicar os métodos para a solução do problema do balanceamento e sequenciamento.	Coleta dos dados de variantes, implicações nos diferentes departamentos e sequência.	Análise documental e observação.	
	Coleta dos dados de tarefas, tempos e relações de precedência.	Análise documental e observação.	
	Aplicação dos métodos.	Métodos de balanceamento e sequenciamento.	Os resultados dos métodos aplicados foram ordenados para comparação.

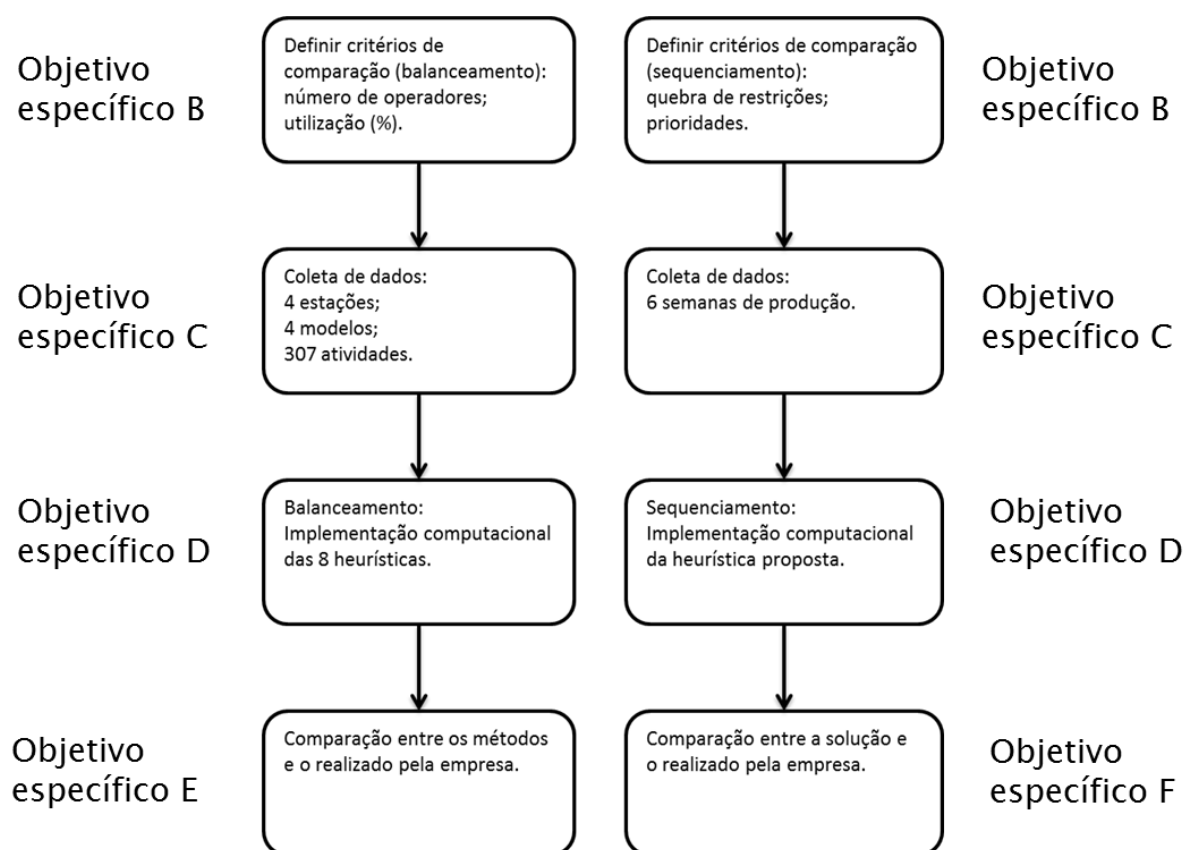
continua

Objetivos	Atividades	Técnica de coleta de dados	Tratamento dos dados
Implementar computacionalmente as oito heurísticas para o cálculo do balanceamento e implementar a heurística do sequenciamento.	Desenvolver utilizando a linguagem VBA, uma planilha que calcule o balanceamento pelos oito métodos diferentes.		Análise documental.
	Desenvolver utilizando a linguagem VBA, uma planilha que calcule o sequenciamento pelo método proposto.		Análise documental.
Comparar os resultados dos métodos de balanceamento entre si e com o balanceamento atualmente adotado pela empresa em uma parte da linha de montagem.	Análise comparativa entre os resultados dos oito métodos teóricos e do atualmente utilizado pela empresa.		Análise documental.
Comparar a solução proposta de sequenciamento com a solução que a empresa utiliza atualmente na linha de montagem.	Análise comparativa entre os resultados do método proposto e do atualmente utilizado pela empresa.		Análise documental.

#### 4 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo foi realizada para o balanceamento e sequenciamento seguindo o fluxograma ilustrado na FIGURA 13. Também é relacionado o objetivo específico que será alcançado ao completar cada atividade da pesquisa.

FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE CAMPO E RELAÇÃO COM OS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.



Fonte: O autor (2013).

Iniciou-se a pesquisa de campo no Departamento Comercial da empresa, para o entendimento das atividades necessárias nas vendas para as concessionárias. Seguiu-se para o Departamento de Planejamento da Produção, que recebe de todos os envolvidos na produção uma relação de restrições de operações.

Para definir a sequência de produção diária, o Departamento de Planejamento da Produção retira do sistema da empresa uma lista com os veículos a serem montados por dia de produção e organiza a sequência de montagem de forma manual. A organização é realizada tentando respeitar as restrições de

produção fornecidas pelos envolvidos na produção. Essa sequência é inserida no sistema e enviada para a linha de montagem e todos os fornecedores.

O Departamento de Engenharia de Manufatura é responsável pelo balanceamento da linha e pela definição das restrições de modelos (informação enviada para o Departamento de Planejamento de Produção), devido aos tempos de montagem ou capacidade de montagem. A fase final neste processo da empresa é relacionada com o Departamento Comercial, nesta fase o produto acabado é expedido para a concessionária.

A fabricação de alguns componentes é realizada na própria empresa. Foram coletados os dados desses fornecedores internos em relação às restrições de produção diária para a linha de produção estudada. No total são quatro fornecedores internos que afetam as restrições de montagem. Cada um afetando diferentes famílias de variantes, tanto com restrições de máximo diário de produção como restrições de número máximo de determinada variante em determinado número de veículos.

No acompanhamento dos fornecedores foi constatado que esses utilizavam sequências de produção próprias, diferentes da sequência da linha de montagem, visando maximizar sua própria eficiência. Porém, isso obriga os fornecedores internos a manter um estoque para absorver essas diferenças, uma vez que produzem em uma sequência e precisam alterá-la para entregar os componentes para a linha principal, que utiliza outra sequência. Comentários sobre a importância da definição de regras para o sequenciamento que incluam e busquem sequências ideais para todos ou a maioria dos agentes envolvidos com a linha de montagem foram ouvidos nas visitas.

Para realizar o sequenciamento e possibilitar a priorização dos veículos com características de já possuir um comprador definido, que tendem há ficar menos tempo no estoque da empresa após montado, acompanhou-se o Departamento de Engenharia de Vendas, fazendo o levantamento das variantes que auxiliariam a identificar esses veículos. Alguns exemplos dessas variantes são: banco de couro e um sistema diferenciado de climatização.

A sequência dos modelos montados no mês de julho de 2012 foi obtida pelos documentos da empresa. Estes documentos contêm a sequência e todos os dados sobre os produtos montados (variantes escolhidas). Estes dados foram organizados por dia de produção, obtendo assim a sequência de modelos montados para cada

dia. Estes dados foram utilizados para o cálculo de um novo sequenciamento e para comparar com os resultados obtidos.

Os dados referentes às tarefas foram organizados em matriz com as tarefas e as informações relativas, como tempo de montagem para cada modelo, tarefas precedentes e observações relevantes, essa coleta foi realizada pela análise dos documentos.

Os métodos heurísticos de balanceamento de linhas de montagem: Regra Heurística da Tarefa de mais Longa Duração, Heurística do Número de Tarefas Imediatamente Subsequentes, COMSOAL, Regra Heurística de Utilização Incremental, Peso Posicional, Peso Posicional Invertido, Número de Tarefas Sucessoras e Número de Tarefas Predecessoras, foram implementados computacionalmente, utilizando a linguagem Visual Basic for Applications.

O sequenciamento proposto da linha de montagem foi realizado utilizando os conceitos de Rocha (2005), apresentados no Capítulo 2, Seção 2.6 tendo como objetivos: reduzir o número de quebras de restrições da linha de montagem e fornecedores e antecipar os veículos com maior prioridade de montagem. Foi utilizada a linguagem Visual Basic for Applications para a implementação computacional.

Conforme o trabalho de Sawik (2002), descrito na Seção 2.6, para problemas maiores, realizar o balanceamento e sequenciamento em separados requer um esforço computacional menor, por este motivo esta opção foi utilizada neste trabalho para a implementação computacional.

#### 4.1 HEURÍSTICAS DE BALANCEAMENTO

Os oito métodos de balanceamento de linhas de montagem foram implementados computacionalmente utilizando a linguagem VBA, devido a grande utilização de planilhas eletrônicas pelas indústrias. Os métodos foram descritos na Seção 2.5.2.

Para o método COMSOAL o número de iterações foi escolhido levando em consideração que Togawa, de Paula e Álvares (2001) utilizaram 100 iterações em seu trabalho, porém para tentar garantir resultados melhores o valor utilizado para o cálculo neste trabalho foi de 1.000 iterações.



Os quatro modelos, dos produtos da empresa, escolhidos para serem utilizados no balanceamento foram selecionados por apresentarem as maiores diferenças nos tempos de montagem nos quatro primeiros postos da linha de montagem.

Os dados das atividades e tempos foram coletados no sistema da empresa, algumas atividades que deveriam ser realizadas em sequência foram agrupadas em apenas uma tarefa. A mesma tarefa pode ter tempos de montagem diferentes nos diferentes modelos. O tempo de ciclo utilizado nos cálculos foi de 4947 UT (unidades de tempo).

As relações de precedências das atividades foram coletadas na linha de montagem. Os tempos foram multiplicados por um fator de conversão, para proteger os dados da empresa.

A demanda de cada modelo é necessária para o cálculo dos tempos de montagem equivalentes e foi coletada utilizando os dados das seis semanas utilizadas para o sequenciamento. Os valores utilizados de demanda estão na TABELA 2.

Os diagramas de precedência das atividades dos quatro modelos estão no APÊNDICE A. A tabela com os tempos de montagem das tarefas que consta no APÊNDICE B contém os tempos para os 4 modelos, divididos em colunas. Caso uma célula esteja com o tempo em branco significa que a tarefa não é realizada no determinado modelo.

TABELA 2 – DEMANDA DE CADA MODELO.

	<b>Demanda</b>
<b>Modelo 1</b>	15,45%
<b>Modelo 2</b>	63,51%
<b>Modelo 3</b>	12,25%
<b>Modelo 4</b>	8,79%

Fonte: O autor (2013).

Devido à impossibilidade de acesso aos dados de custo, esse critério não pode ser utilizado. Os critérios adotados para a comparação dos resultados foram a quantidade de operadores necessários para a montagem e a utilização, que é calculada utilizando a equação 4.

## 4.2 HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO

Na visão do Departamento de Engenharia de Manufatura da empresa existe uma possibilidade de sequenciamento que vem de encontro com a filosofia da manufatura enxuta em relação à flexibilidade e nivelamento da produção. Esses princípios enxutos costumam ter um custo adicional para as empresas, porém a empresa em estudo não necessita de uma flexibilidade tão grande quanto a existente atualmente. Uma vez que o grande fluxo de produtos montados é expedido para as concessionárias no final do mês, ficando em estoque na empresa até esta data, possibilitando a alteração do dia de produção para alguns veículos.

Nos acompanhamentos aos fornecedores internos e à linha de montagem foram constatadas que muitas restrições de produção ocorrem devido à limitação de capacidade de equipamentos ou processos. Um estudo inicial foi realizado com a finalidade de verificar a possibilidade de utilizar um sequenciamento que agrupasse os modelos iguais e utilizassem um tempo de ciclo variante. Porém o sequenciamento por modelos necessitaria de grandes investimentos em equipamentos em diversos setores da empresa, para eliminar as restrições do tipo de número máximo de determinada variante em determinado número de veículos.

Por esse motivo a heurística de **sequenciamento proposta** foi desenvolvida respeitando todas as restrições levantadas na coleta de dados. As restrições foram divididas em três: restrições de máximo diário, relativas às variantes que tem um limite máximo diário de produção; restrições da linha de montagem, relativas às restrições do tipo de número máximo de determinada variante em determinado número de veículos para a linha de montagem, e restrições de fornecedores, relativas às restrições do tipo de número máximo de determinada variante em determinado número de veículos para qualquer um dos quatro fornecedores.

O sequenciamento ainda deve respeitar a priorização dos veículos identificados no Departamento de Engenharia de Vendas. Para redução de estoques e produção rápida dos veículos já vendidos.

Os critérios adotados para a comparação dos resultados do método proposto e o atualmente utilizado pela empresa são: número de restrições quebradas e priorização de veículos com determinadas variantes.

A FIGURA 14 apresenta um exemplo de sequência e o cálculo de quebra de restrições. O “X” é uma variante que tem restrição e o “\_” é um veículo com outra

variante, sem restrição. Em cinza estão marcados os veículos que estão sendo utilizados para o cálculo de quebra de restrições. No exemplo, três veículos estão marcados de cinza de cada vez, pois a razão utilizada é de 1/3. No primeiro veículo do dia “D”, que está sendo calculada a quantidade de quebra de restrições, são utilizados os últimos veículos do dia anterior “D - 1” para poder avaliar se existe quebra de restrição em três veículos. O número de quebras é igual ao número de veículos a mais que a restrição permite. Por exemplo, na primeira linha existem 2 veículos com a variante em 3, portanto o número de quebra de restrições é igual a 1.

FIGURA 14 – CÁLCULO DE QUEBRA DE RESTRIÇÕES PARA UMA VARIANTE COM RESTRIÇÃO DE 1/3.

D - 1	D	Número de quebra de restrições
--- X █	X █ _ X _ X X X	1
--- X █	X █ _ X _ X X X	0
--- X _	X █ _ X _ X X X	0
--- X _	X █ _ X _ X X X	0
--- X _	X █ _ X _ X X X	0
--- X _	X _ X █ _ X X X	1
--- X _	X _ X █ _ X X X	1
--- X _	X _ X █ _ X X X	2
	Total	5

Fonte: O autor (2013).

As três possíveis quebras de restrições foram classificadas da seguinte maneira de gravidade:

1. Quebra de restrição de máximo diário.
2. Quebra de restrição do tipo de razão da linha de montagem.
3. Quebra de restrição do tipo de razão de fornecedor interno.

Dessa maneira, as soluções que não apresentam nenhuma quebra de restrição de máximo diário, porém tenham quebras de restrição do tipo de razão da linha de montagem são melhores que as que não apresentam nenhuma quebra de restrições do tipo de razão da linha de montagem, mas com quebra de restrição de máximo diário.

Para evitar que os veículos com restrições de razão não sejam escolhidos na construção do sequenciamento e que se acumulem no final do sequenciamento, gerando uma grande quantidade de quebra de restrições, além das prioridades

definidas pelo Departamento de Engenharia de Vendas, os veículos com restrições também são priorizados, essa priorização também foi utilizada por Rocha (2005). Outra priorização é a do agrupamento de cores iguais. A classificação é feita da seguinte maneira:

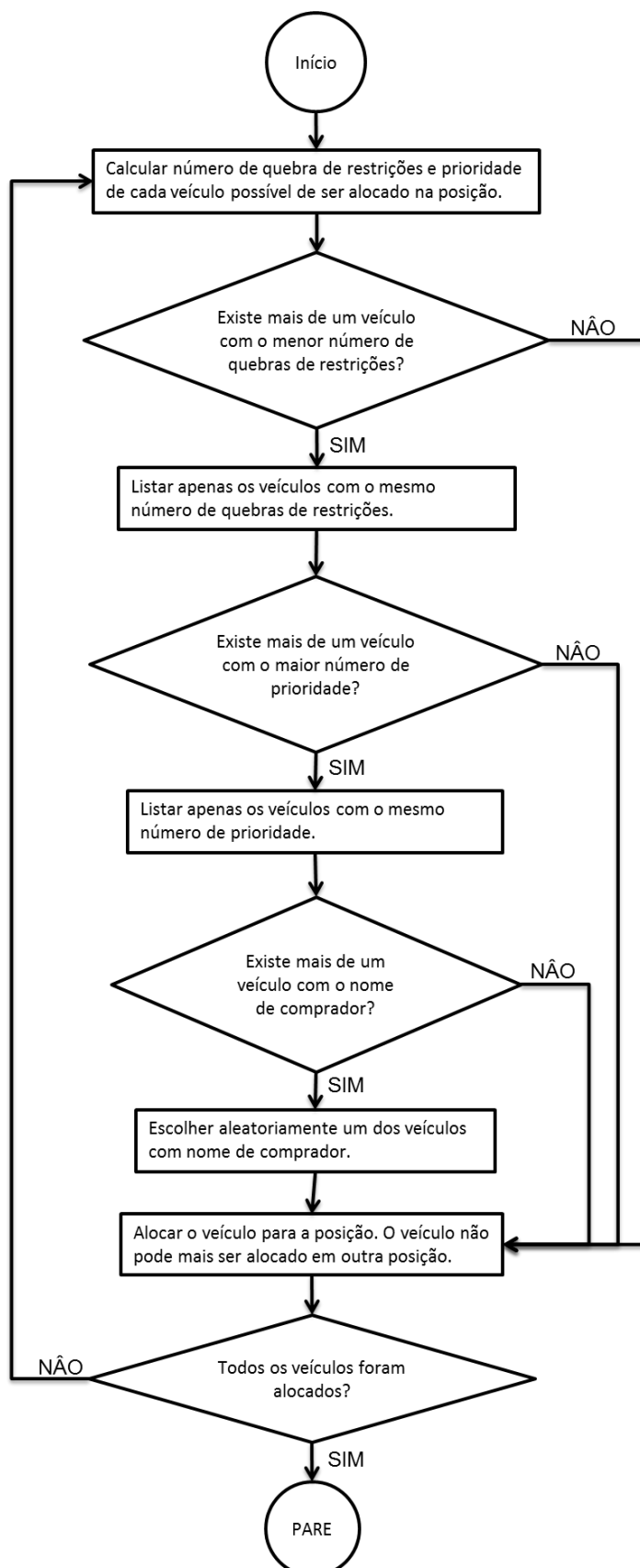
1. Variantes definidas pelo Departamento de Engenharia de Vendas.
2. Variantes que são restrições para a linha de montagem.
3. Variantes que são restrições para fornecedor interno.
4. Agrupar cores iguais.

O sequenciamento é construído posição por posição, seguindo o fluxograma da FIGURA 15 para a escolha do veículo. Em cada posição é avaliado quantas restrições são quebradas para cada veículo que ainda possa ser alocado. O veículo sem quebra de restrição, ou com o menor número de quebra de restrições, é designado para a posição. Caso tenha mais de um veículo com a menor quantidade de quebra de restrições, o grupo de veículos é separado. Desses veículos separados o com maior prioridade é alocado. Caso aconteça outro empate a escolha é feita pelo que possuir um nome de comprador, permanecendo mais de um veículo, o critério é a data de entrega prometida. Caso após o último critério ainda exista mais de uma possibilidade a escolha é feita de maneira aleatória.

A construção do sequenciamento é realizada 100 vezes, pois a escolha do veículo pode ser estocástica, quando mais de um veículo tem os mesmos valores para os critérios de seleção. Caso seja possível escolher diferentes veículos em uma determinada posição, estas diferentes escolhas podem afetar as escolhas seguintes dos veículos. O valor de 100 repetições foi adotado pelos resultados obtidos já se mostrarem satisfatórios e caso aconteça uma sequência de quebra de restrições no final da sequência essa é tratada.

Entre as sequências geradas, aquela com o menor número de quebra de restrições é escolhida. Durante os testes foi observado que poderia ocorrer o acúmulo de veículos com restrições no final da sequência, apesar das medidas de priorização que tentam evitar isto. Caso ocorra, gera um acúmulo de quebras de restrições nos últimos veículos do sequenciamento. Para resolver esse problema, os veículos no final da sequência escolhida que apresentem alguma quebra de restrição do tipo de razão da linha de montagem ou máximo diário de produção, tentam ser realocados em outras posições, que reduzam o número de quebras de restrições.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA ESCOLHA DE VEÍCULO DO MÉTODO DE SEQUENCIAMENTO PROPOSTO.



Fonte: O autor (2013).

### 4.3 RESTRIÇÕES E PRIORIDADES

As famílias de variantes e variantes que são restrições, que foram coletadas com os fornecedores internos e com a linha de montagem, e as que são prioridade, coletadas com o Departamento de Engenharia de Vendas, estão no APÊNDICE C. A primeira coluna separa as famílias de variantes, a segunda coluna identifica as variantes em cada família. Caso uma variante tenha prioridade de produção um “x” é marcado na terceira coluna. A quarta coluna identifica restrições de máximo diário, a quinta e sexta coluna representam restrições do tipo razão da linha de montagem e fornecedores internos, respectivamente. Também contém informações de variantes que preferencialmente devem ser agrupadas.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados. Os cálculos para o balanceamento e sequenciamento foram realizados separados, pois o balanceamento considerou tempos e o sequenciamento utilizou restrições.

A primeira seção é sobre os resultados do balanceamento, seguido do sequenciamento.

### 5.1 DO BALANCEAMENTO

O balanceamento foi realizado utilizando os dados de tempos e relações de precedências coletados na empresa do estudo de caso. Os oito métodos de balanceamento foram executados de duas maneiras diferentes, a primeira considerou cada estação de trabalho e as atividades atualmente realizadas nela de forma individual. A segunda maneira utilizou todas as 307 atividades de montagem realizadas nas quatro estações da linha de montagem para executar o balanceamento.

Os resultados obtidos pela aplicação dos oito métodos foram comparados entre si e com o atualmente utilizado pela empresa e estão na TABELA 3. As colunas de cada estação de montagem e a coluna com o total das quatro estações mostram o balanceamento realizado da primeira maneira. A coluna “Todas as atividades” mostra o balanceamento realizado da segunda maneira.

A comparação foi realizada utilizando o número de operadores necessários para os diferentes métodos utilizados e o atual. A partir do número de operadores é possível calcular a utilização desses pela divisão do tempo total de montagem pelo tempo de montadores disponível (número de montadores multiplicado pelo tempo de ciclo).

As figuras 16 a 20 ilustram os gráficos do balanceamento realizado por estação de trabalho e o total das quatro estações. Cada coluna representa um método de balanceamento e o adotado pela empresa. Em azul está representado o tempo de montagem por tempo de ciclo e em vermelho o tempo ocioso.

TABELA 3 - COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO DO BALANCEAMENTO ENTRE OS OITO MÉTODOS E O UTILIZADO PELA EMPRESA.

		Estação 1	Estação 2	Estação 3	Estação 4	Total	Todas as atividades
Atual	Número de Operadores	8	13	8	11	40	40
	Utilização	58,67%	76,88%	65,09%	79,94%	71,72%	71,72%
Tarefa de Mais Longa Duração	Número de Operadores	6	10	6	11	33	30
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	79,94%	86,93%	95,63%
Tarefas Imediatamente Subsequentes	Número de Operadores	6	10	6	11	33	30
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	79,94%	86,93%	95,63%
COMSOAL	Número de Operadores	6	10	6	10	32	30
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	87,94%	89,65%	95,63%
Utilização Incremental	Número de Operadores	6	10	6	11	33	30
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	79,94%	86,93%	95,63%
Peso Posicional	Número de Operadores	6	10	6	12	34	29
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	73,28%	84,38%	98,93%
Tarefas Sucessoras	Número de Operadores	6	10	6	11	33	29
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	79,94%	86,93%	98,93%
Peso Posicional Invertido	Número de Operadores	6	10	7	11	34	30
	Utilização	78,22%	99,94%	74,39%	79,94%	84,38%	95,63%
Tarefas Predecessoras	Número de Operadores	6	10	6	11	33	30
	Utilização	78,22%	99,94%	86,78%	79,94%	86,93%	95,63%

Fonte: O autor (2013).

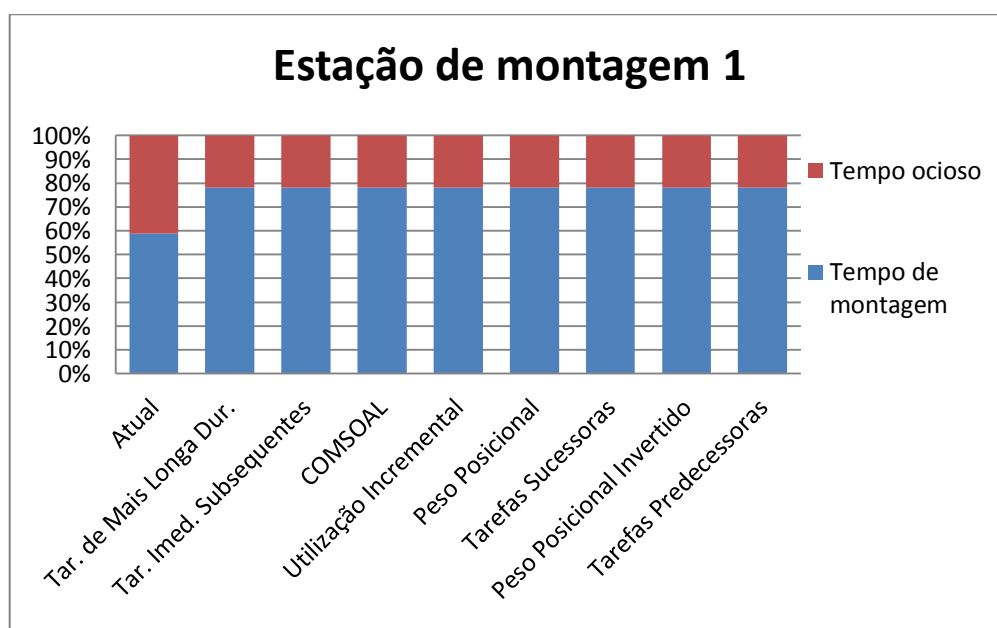
A FIGURA 16 representa o gráfico da estação de montagem 1. Os oito métodos utilizados para o balanceamento apresentaram o mesmo resultado, utilização de 78,22% da estação. Isto significa que durante 21,78% do tempo de ciclo a estação está ociosa, este tempo ocioso pode ocorrer devido às tarefas terem um tempo de execução grande e não poderem ser divididas entre os operadores da estação, deixando um tempo disponível para os operadores. Outro motivo do tempo ocioso pode ser a necessidade de executar uma tarefa com tempo longo antes de outras tarefas com tempos menores.



A utilização atual do balanceamento adotado pela empresa é de 58,67% para a estação 1. O valor da utilização é menor que o obtido pelos oito métodos, pois considera algumas restrições que não é possível considerar nos oito métodos utilizados. Estas restrições foram levantadas por Falkenauer (2005) e são válidas para o balanceamento por estações de trabalho:

- posição de execução das atividades no veículo, executar uma atividade na frente do veículo e outra atrás fará o operador utilizar muito tempo no movimento;
- número de operadores trabalhando ao mesmo tempo no veículo, apesar de ser possível mais de um operador montar ao mesmo tempo e das relações de precedência permitirem a montagem de duas atividades, isso pode não ser fisicamente possível, quando as atividades são executadas no mesmo local no veículo.

FIGURA 16 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 1.



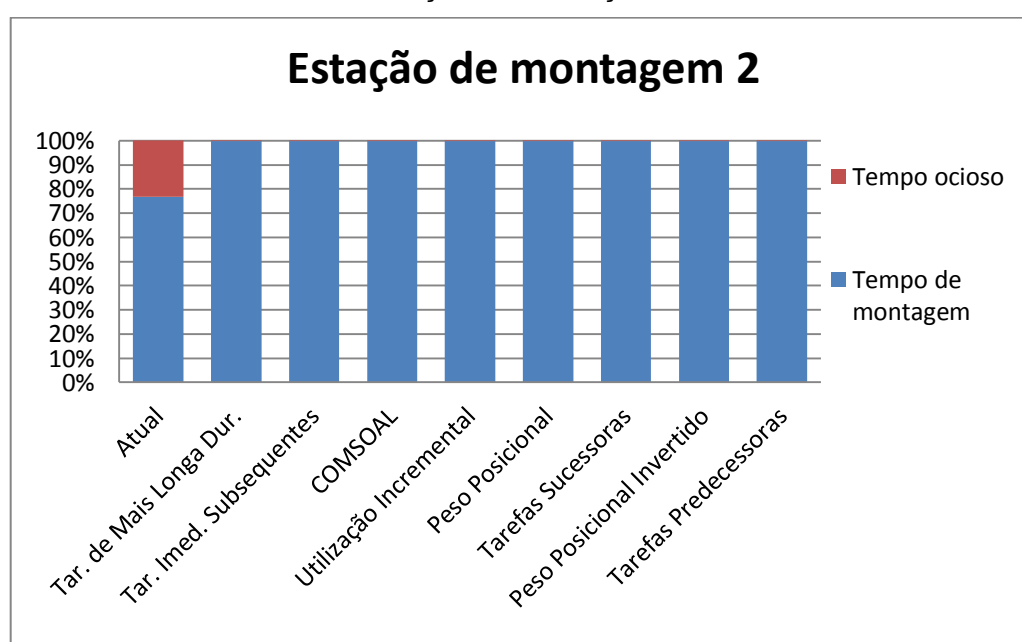
Fonte: O autor (2013).

A igualdade na solução dos oito métodos pode ter ocorrido devido às características dos dados utilizados. As características que podem ter afetado as soluções são: os tempos das tarefas e a forma do grafo de precedência dessas tarefas. Ambas podem ter restringido as escolhas das tarefas nos cálculos do balanceamento, não possibilitando que os métodos apresentassem soluções

diferentes. No Capítulo 2, Seção 2.4, na taxonomia dos grafos de precedência, o atributo “ $\alpha_2$ ” pode apresentar uma característica especial ( $\alpha_2 = \text{spec}$ ), tornando possível a utilização de algoritmos mais rápidos para o cálculo do balanceamento.

Pode-se verificar na FIGURA 17 que os oito métodos de balanceamento geram os mesmos resultados para a estação de montagem 2, utilização de 99,94%. Isto significa que apenas por 0,06% do tempo a estação fica ociosa. A solução adotada pela empresa tem uma utilização de 76,88%.

FIGURA 17 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 2.

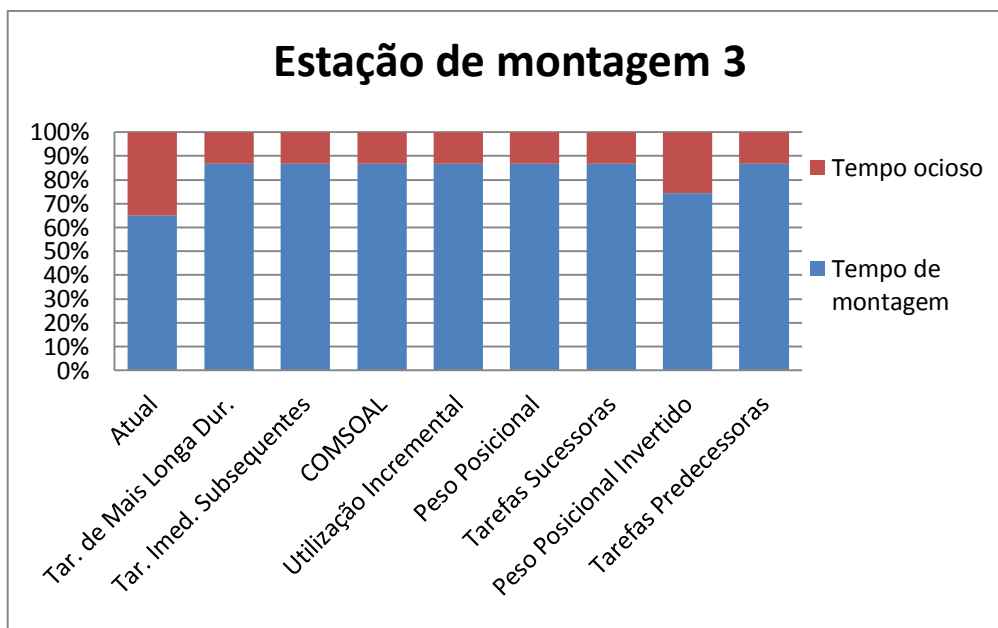


Fonte: O autor (2013).

Na estação de montagem 3, FIGURA 18, o método Peso Posicional Invertido apresentou uma utilização menor que a apresentada pelos outros métodos. Sendo respectivamente as utilizações, 74,39% e 86,78%. Já a utilização real é de 65,09%.

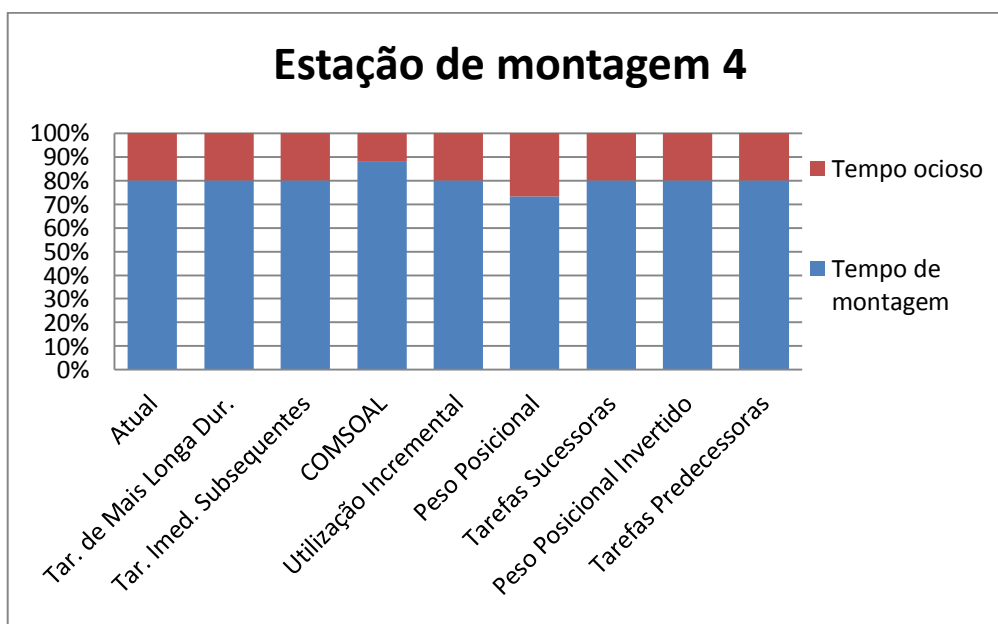
A estação de montagem 4, ilustrada na FIGURA 19, apresentou variação de solução em dois métodos e a solução adotada pela empresa é igual ao resultado obtido por seis métodos, 79,94%. O método COMSOAL obteve a melhor solução de utilização de 87,94% e a pior solução foi obtida pelo método Peso Posicional de 73,28%.

FIGURA 18 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 3.



Fonte: O autor (2013).

FIGURA 19 – UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM 4.

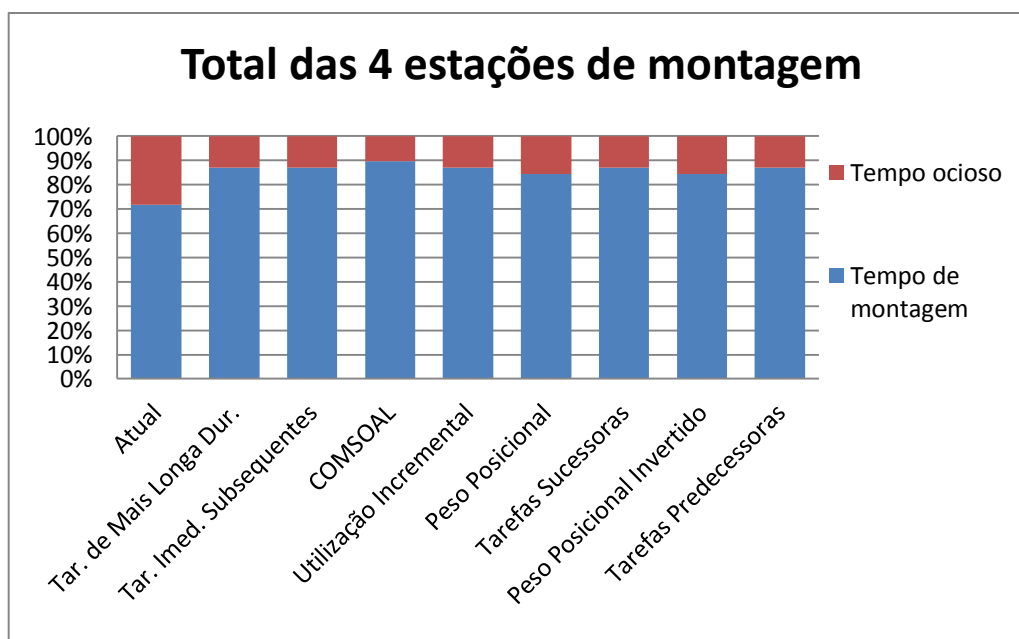


Fonte: O autor (2013).

Fazendo a soma das quatro primeiras estações da linha de montagem, obtêm-se o gráfico da FIGURA 20. A soma foi realizada somando o número de operadores necessários e calculando a nova utilização, utilizando a quantidade de montadores e tempo total de montagem, para cada método. O método COMSOAL apresentou a melhor utilização, 89,65%. Seguido pelos métodos Tarefa de Mais

Longa Duração, Tarefas Imediatamente Subsequentes, Utilização Incremental, Tarefas Sucessoras e Tarefas Predecessoras com 86,93%. Os métodos Peso Posicional e Peso Posicional Invertido resultaram em uma utilização de 84,38%. Já a utilização real é de 71,72%.

FIGURA 20– UTILIZAÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONTAGEM.



Fonte: O autor (2013).

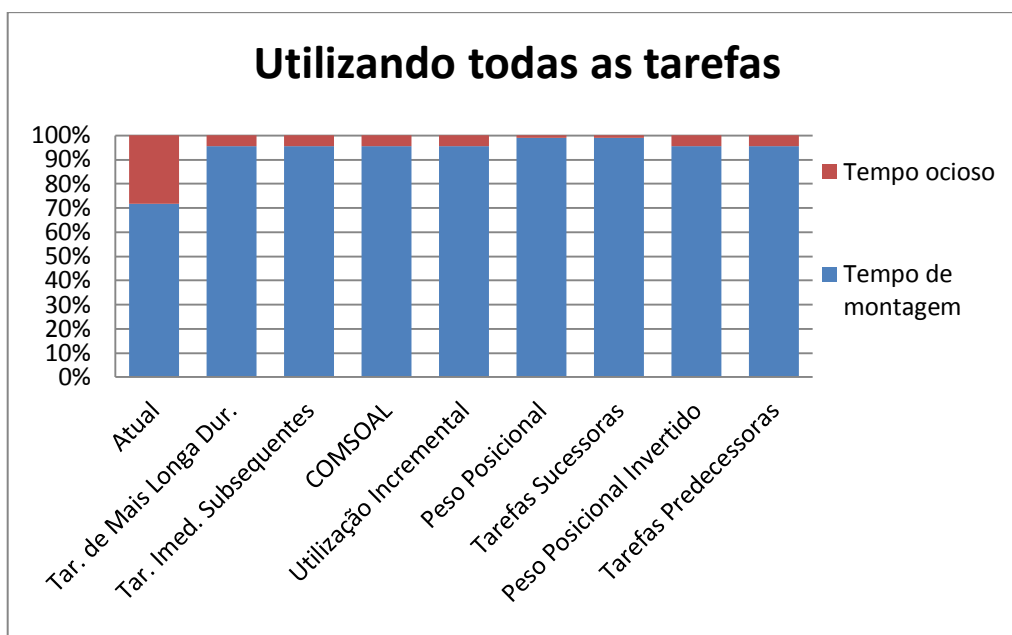
Utilizando todas as tarefas para o balanceamento o gráfico do resultado dos oito métodos e do real é representado na FIGURA 21. Os métodos Peso Posicional e Tarefas Sucessoras apresentaram os melhores resultados de utilização, 98,93%. Os demais métodos obtiveram 95,63% de utilização.

Conforme Falkenauer (2005), uma das maiores dificuldades de fazer o balanceamento em uma linha de montagem existente é que na verdade é feito o rebalanceamento. A utilização do balanceamento adotado pela empresa é de 71,72%, a diferença entre a utilização obtida pelos oito métodos utilizando todas as atividades de montagem ocorre devido:

- posição de execução das atividades no veículo e número de operadores trabalhando ao mesmo tempo no veículo, já comentadas anteriormente;
- identidade das estações, cada estação tem seus equipamentos, ferramentas, espaço e restrições de processos;

- atividades das estações finais são alocadas nas iniciais, preenchendo o tempo de trabalho dos operadores, porém essas tarefas podem utilizar equipamentos que exigiriam muitos recursos para serem mudados de posição.

FIGURA 21 – UTILIZAÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONTAGEM PARA O BALANCEAMENTO DE TODAS AS ATIVIDADES.



Fonte: O autor (2013).

O balanceamento utilizando as 307 tarefas, segunda maneira, quando comparado com o total do balanceamento por estação de trabalho, primeira maneira, necessita de menos operadores para a montagem das tarefas. São necessários, resultado do melhor método de cada maneira, 32 para a primeira maneira e 29 para a segunda maneira. Isso deve ter ocorrido pelo maior número de possibilidades de escolhas entre tarefas, quando o balanceamento é feito pela segunda maneira.

Os oito métodos apresentaram uma pequena variação entre si, em muitos casos foram iguais. Quando comparado as duas maneiras de resolver o problema, os resultados que se mostraram melhores foram da solução utilizando todas as tarefas, possivelmente pelo maior número de tarefas a serem escolhidas, porém os resultados não são facilmente aplicados na prática, devido alguns fatores citados por Falkenauer (2005).

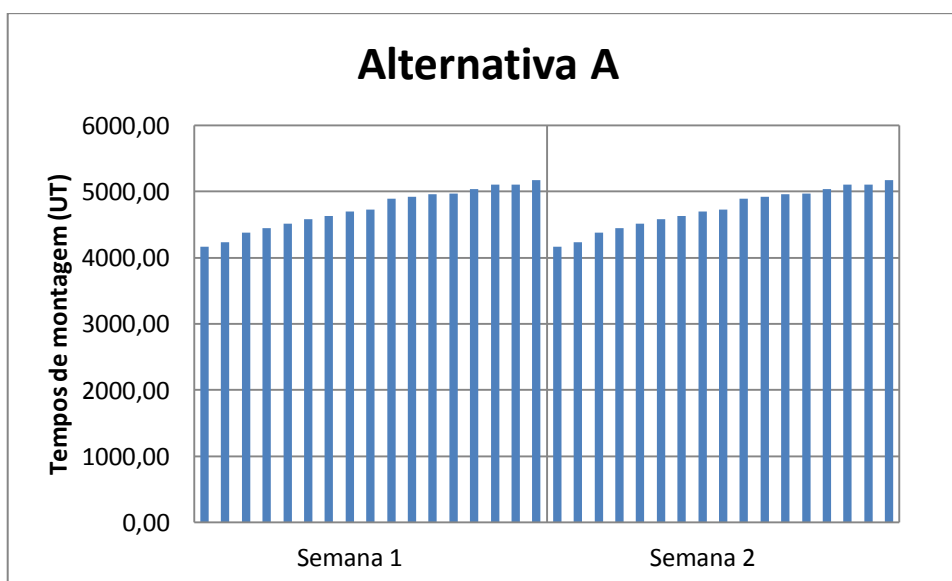
## 5.2 DO SEQUENCIAMENTO

Por estar insatisfeito com o sequenciamento atual e estar buscando melhorias que possam ser desenvolvidas nesse processo, o Departamento de Engenharia de Manufatura apresentou a ideia do sequenciamento por modelos de veículos produzidos pela empresa. Nessa situação os modelos iguais seriam agrupados e o tempo de ciclo da linha de montagem alteraria de acordo com os modelos presentes na linha de montagem, respeitando sempre a velocidade do veículo mais lento presente na linha. A melhoria de desempenho do sequenciamento ocorreria devido ao tempo de ciclo da linha de montagem estar mais próxima ao tempo de ciclo dos veículos produzidos.

A ordem de entrada de veículos na linha de montagem poderia variar de três maneiras diferentes. Para cada uma dessas alternativas foi realizado um estudo de viabilidade:

- Alternativa A: Alternativa inicialmente proposta pela empresa, as semanas seguem o mesmo padrão, iniciando com o veículo com menor tempo de montagem e acabando com o veículo com maior tempo de montagem, conforme a FIGURA 22 ilustra duas semanas.

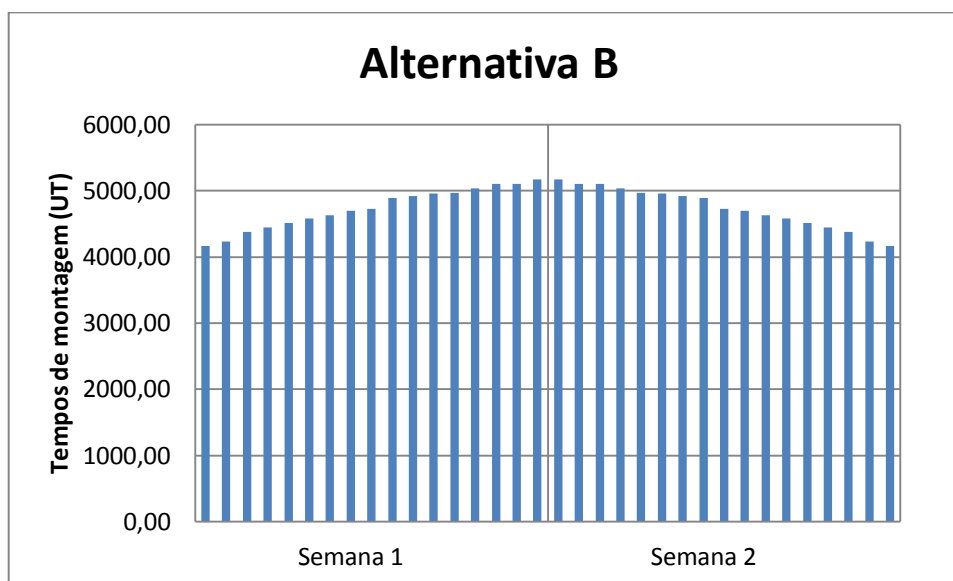
FIGURA 22 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA A.



Fonte: O autor (2013).

- Alternativa B: Alternativa proposta visando reduzir a diferença entre os tempos de montagem do último veículo da semana 1 e o primeiro da semana 2 da Alternativa A. As semanas alternam o início e fim da semana, o início de uma semana é igual ao final da semana anterior, conforme a FIGURA 23 ilustra duas semanas.

FIGURA 23 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA B.

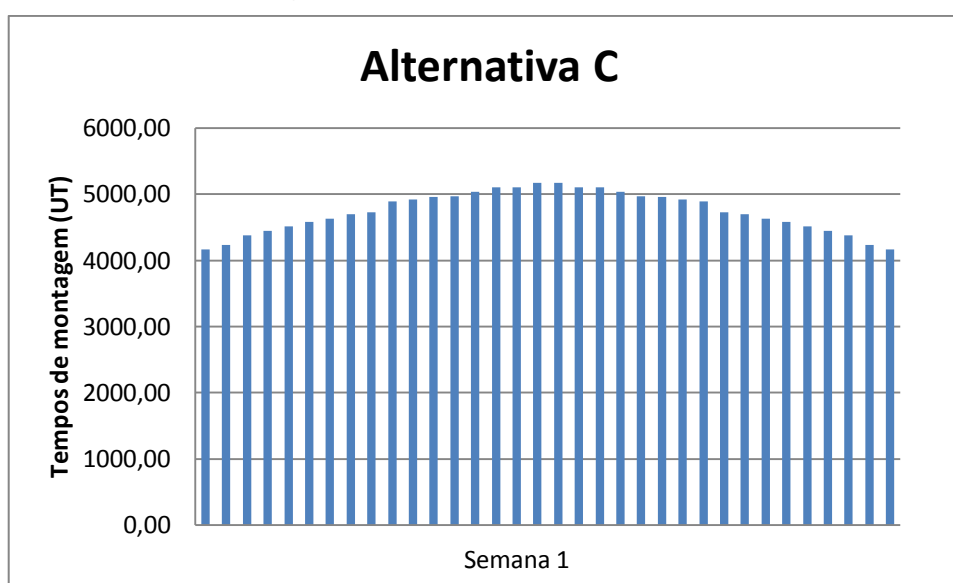


Fonte: O autor (2013).

- Alternativa C: Também visa a redução da diferença de tempos entre o último veículo da semana 1 e primeiro da semana 2 da Alternativa A. As semanas seguem o mesmo padrão, iniciando com o veículo com menor tempo de montagem e acabando com o mesmo veículo. No meio da semana são produzidos os veículos com maiores tempo de montagem, conforme FIGURA 24 ilustra uma semana, que sempre se repete.

Os dados de um mês de produção foram utilizados para a comparação entre as alternativas e o sequenciamento utilizado pela empresa. Essas alternativas geraram os resultados ilustrados na TABELA 4, os tempos de produção totais para a semana em questão, em 1000\*UT, e o percentual do tempo comparado ao utilizado pela empresa do estudo.

FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO SEMANAL DE MONTAGEM PARA A ALTERNATIVA C.



Fonte: O autor (2013).

TABELA 4 – TEMPOS TOTAIS DE MONTAGEM PARA AS TRÊS ALTERNATIVAS E O REAL E PERCENTUAL COMPARADO COM O TEMPO REAL.

	Tempo Total Atual	Tempo Total Alter. A	Alter. A	Tempo Total Alter. B	Alter. B	Tempo Total Alter. C	Alter. C
<b>Semana 1</b>	1301,1	1261,6	96,97%	1261,6	96,97%	1275,5	98,03%
<b>Semana 2</b>	1207,1	1182,7	97,98%	1182,7	97,98%	1181,7	97,90%
<b>Semana 3</b>	1508,8	1475,9	97,81%	1461,8	96,89%	1476,3	97,84%
<b>Semana 4</b>	1365,4	1348,5	98,77%	1348,5	98,77%	1347,2	98,67%
<b>Semana 5</b>	529,3	523,4	98,87%	512,1	96,74%	524,3	99,06%
<b>Total</b>	5911,7	5792,0	97,98%	5766,7	97,55%	5805,0	98,20%

Fonte: O autor (2013).

Os resultados mostraram uma redução do tempo de montagem, quando comparado com o tempo utilizado atualmente, pela utilização de tempos de ciclo que variem entre os modelos produzidos, com um benefício no melhor dos casos, Alternativa B, de 2,45%. Porém essas alternativas não levam em consideração as restrições da linha de montagem e seus fornecedores.

Para realizar esse sequenciamento seria necessário que os fornecedores e a linha de montagem fizessem mudanças em seus processos, visando a eliminação de restrições de produção. Outra solução seria a utilização de estoques pelos fornecedores, porém ambas as soluções trariam custos que poderiam ser maiores



que os benefícios alcançados. Por esses motivos essas três alternativas foram descartadas e foi proposto o sequenciamento utilizando número de quebras de restrições.

Os dados de sequenciamento de seis semanas de produção foram utilizados para o cálculo do número de quebras de restrições para a solução adotada pela empresa do estudo de caso e para o cálculo do sequenciamento utilizando o método proposto.

A TABELA 5 mostra um comparativo entre número de quebra de restrições do sequenciamento realizado pela empresa do estudo de caso e o sequenciamento proposto. Apesar de o sequenciamento proposto apresentar quebras de restrição, as de limite diário de produção e do tipo de razão da linha de montagem são iguais a zero. As quebras de restrições do tipo razão de fornecedores internos ainda existem, mas em quantidade inferior ao sequenciamento utilizado pela empresa do estudo, o total é aproximadamente 66,28% menor.

No APÊNDICE D estão representadas as seis semanas, com os veículos e as quebras de restrições identificadas, tanto para o sequenciamento real, como para o proposto. Apenas parte da semana, início e final de cada dia, é representada por motivo de confidencialidade da quantidade de veículos produzidos pela empresa.

O QUADRO 17 mostra um comparativo entre o dia da semana que foi completada a produção de todos os veículos com prioridade da semana para o sequenciamento utilizado pela empresa e o proposto. Verifica-se que os veículos com prioridade de produção são atendidos mais rapidamente no sequenciamento proposto, não depois do segundo dia da semana (terça-feira) enquanto no sequenciamento utilizado pela empresa do estudo a produção não é finalizada antes do quarto dia da semana (quinta-feira).

No APÊNDICE E as seis semanas estão representadas, para o sequenciamento adotado pela empresa e o proposto, e os veículos com prioridade de produção estão marcados. Apenas parte da semana, início e final de cada dia, é representada por motivo de confidencialidade da quantidade de veículos produzidos pela empresa.

Apesar do sequenciamento proposto não necessitar de mudanças nas estruturas físicas dos fornecedores e da linha de montagem, é necessário que o Departamento de Planejamento da Produção altere seu processo de sequenciamento da linha de montagem. Além disso, informações do Departamento

de Vendas também são necessárias para realizar o sequenciamento proposto, como o veículo possuir um nome de comprador.

TABELA 5 – COMPARATIVO ENTRE NÚMERO DE QUEBRA DE RESTRIÇÕES DO SEQUENCIAMENTO REAL UTILIZADO PELA EMPRESA E O SEQUENCIAMENTO PROPOSTO.

	Tipo de Restrição Quebrada	Sequenciamento	Sequenciamento
		Realizado	Proposto
<b>Semana 1</b>	Limite Diário	0	0
	Razão da Linha de Montagem	4	0
	Razão de Fornecedor	56	10
<b>Semana 2</b>	Limite Diário	0	0
	Razão da Linha de Montagem	17	0
	Razão de Fornecedor	87	67
<b>Semana 3</b>	Limite Diário	11	0
	Razão da Linha de Montagem	4	0
	Razão de Fornecedor	42	0
<b>Semana 4</b>	Limite Diário	0	0
	Razão da Linha de Montagem	0	0
	Razão de Fornecedor	54	20
<b>Semana 5</b>	Limite Diário	1	0
	Razão da Linha de Montagem	0	0
	Razão de Fornecedor	66	19
<b>Semana 6</b>	Limite Diário	3	0
	Razão da Linha de Montagem	5	0
	Razão de Fornecedor	39	0
<b>Total</b>	Limite Diário	15	0
	Razão da Linha de Montagem	30	0
	Razão de Fornecedor	344	116

Fonte: O autor (2013).

Com a realização deste estudo de caso, percebe-se que o processo de sequenciamento pode ser dividido em decisões de curto e médio prazo. No curto prazo são realizadas as decisões de organização de sequência de produção, atividade executada neste trabalho.

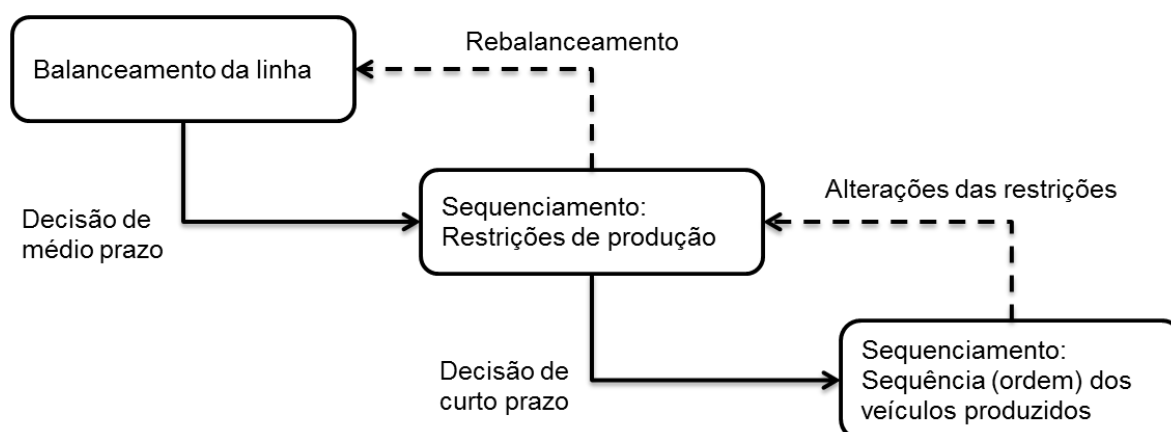
QUADRO 17 – COMPARATIVO DE PRODUÇÃO DE TODOS OS VEÍCULOS COM PRIORIDADE POR SEMANA ENTRE O SEQUENCIAMENTO REAL E O PROPOSTO

	Sequenciamento Realizado	Sequenciamento Proposto
Semana 1	Sexta-feira	Terça-feira
Semana 2	Sábado	Segunda-feira
Semana 3	Quinta-feira	Terça-feira
Semana 4	Quinta-feira	Segunda-feira
Semana 5	Sexta-feira	Segunda-feira
Semana 6	Sexta-feira	Terça-feira

Fonte: O autor (2013).

No médio prazo são realizadas as decisões que influenciam a organização da sequência de produção, no caso deste estudo as restrições de produção utilizadas, são essas decisões que estão ligadas com o balanceamento da linha de montagem. Alterações nas restrições, também decisões de médio prazo, decorrem de necessidades detectadas na atividade de definir a sequência de produção. Decorrente disso é proposta uma alteração na FIGURA 10. A FIGURA 25 ilustra a arquitetura proposta de sequenciamento e balanceamento de uma linha de montagem de modelo misto.

FIGURA 25 - ARQUITETURA PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MODELO MISTO



Fonte: O autor (2013).

O trabalho atingiu o objetivo geral, avaliando a aplicação de oito métodos de balanceamento e um método de sequenciamento de linhas de montagem de modelo

misto em uma empresa de grande porte do setor automotivo. Para atingir o objetivo geral os objetivos específicos foram alcançados, iniciando com a pesquisa dos diferentes métodos de balanceamento e sequenciamento, objetivo específico “a”. Os critérios para comparação dos métodos foram definidos, completando o objetivo específico “b”. Os dados da empresa do estudo foram coletados, atingindo o objetivo específico “c”. Utilizando a linguagem VBA os métodos foram implementados computacionalmente, objetivo específico “d”. Os dois últimos objetivos específicos “e” e “f” foram alcançados pela comparação entre os oito métodos de balanceamento e o sequenciamento proposto, ambos comparados com os realizados pela empresa.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um referencial teórico sobre linhas de montagem, o problema do balanceamento de linhas de montagem e sequenciamento de linhas de montagem. Este foi motivado pela importância do tema, balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem, para as indústrias da região e pela abertura proporcionada por uma dessas empresas.

No balanceamento foram comparados oito métodos heurísticos e a solução adotada pela empresa. Esses foram implementados computacionalmente utilizando planilhas eletrônicas, visando facilitar a utilização futura pelas indústrias. O balanceamento foi realizado de duas maneiras distintas, uma separando as tarefas nas estações de montagem a que pertencem, considerando cada estação individualmente e outra considerando as 307 tarefas.

Os resultados dos métodos pouco variaram entre si, porém quando comparados com a solução utilizada pela empresa a diferença chegou a 27,5%. Isso ocorre devido alguns fatores que são mais difíceis de serem considerados nas heurísticas na realização do balanceamento. Alguns estudos, consultados no referencial teórico, inserem alguns desses fatores em metaheurísticas no cálculo do balanceamento.

No sequenciamento a solução adotada pela empresa foi comparada com uma solução proposta. O sequenciamento proposto considerou as restrições dos fornecedores e da linha de montagem e as prioridades de produção fornecidas pelo Departamento de Engenharia de Vendas. Esse também foi implementado computacionalmente utilizando planilha eletrônica para facilitar o uso pela empresa.

A proposta de sequenciamento gerou resultados sem quebras de restrições de limite diário de produção e do tipo de razão da linha de montagem. As quebras de restrições do tipo razão de fornecedores foram reduzidas em aproximadamente 66,28%. Os veículos com prioridade de produção foram alocados para o início da semana, segunda-feira e terça-feira.

No estudo de caso, o pesquisador teve acesso a muitas informações confidenciais da empresa em questão e tomou-se o cuidado para que na apresentação do estudo tais informações não fossem reveladas.

Nesta pesquisa foi necessário ter contato com muitas pessoas de diferentes Departamentos, devido aos compromissos diários dos funcionários da empresa, as

reuniões acabam levando certo tempo para serem agendadas. Para as reuniões é importante ter as informações e perguntas anotadas, para que essa não dure mais que o necessário. Após as reuniões deve-se fazer anotações de todas as informações recebidas, pois algumas serão utilizadas muito tempo depois e será necessário consultar as anotações.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a comparação entre heurísticas de balanceamento e metaheurísticas, considerando o resultado obtido e o tempo computacional necessário. Pode-se realizar o balanceamento inserindo alguns dos fatores que influenciam no balanceamento que são encontrados na prática, por exemplo, local da atividade no veículo e ferramentas necessárias. Um estudo sobre a influência da distribuição dos tempos de execução das tarefas de montagem e formato do grafo de precedências das tarefas nos resultados dos métodos de balanceamento é outra recomendação.

Com relação ao sequenciamento, sugere-se realizar o agrupamento dos modelos iguais e utilizar um tempo de ciclo variante para a linha de montagem, alternativa que teve um estudo inicial neste trabalho. Além disso, pode-se continuar este trabalho adicionando ao estudo as restrições dos fornecedores externos. Pode-se ainda, realizar o sequenciamento utilizando os tempos de montagem, visando um equilíbrio na alteração dos modelos para a linha de montagem. Outras possibilidades são a realização do balanceamento e sequenciamento utilizando modelos exatos ou a realizá-los de maneira simultânea. Como última recomendação, o ajuste deste trabalho para um problema semelhante em outra empresa com a mesma necessidade.

## REFERÊNCIAS

ABEPRO. Áreas da Engenharia de Produção. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2008. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>>. Acesso em: 16 maio 2012.

AL-AOMAR, R. Handling multi-lean measures with simulation and simulated annealing. **Journal of the Franklin Institute**, v. 348, n. 7, p. 1506-1522, 2011.

AMEN, M. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. **International Journal of Production Economics**, v. 69, n. 3, p. 255-264, 2001.

ANDERSON, J.; FERRIS, M. C. Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assembly Line Balancing Problem. **ORSA Journal on Computing**, v. 6, n. 2, p. 161-173, 1994.

BANKS, J. Introduction to Simulation. In: SIMULATION CONFERENCE, 1999 Winter, Phoenix. **Proceedings... IEEE**, 1999. p. 7-13.

BEAN, J. C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. **ORSA Journal on Computing**, v. 6, n. 2, p. 154-160, 1994.

BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 694-715, 2006.

BOCK, S. Using distributed search methods for balancing mixed-model assembly lines in the automotive industry. **OR Spectrum**, v. 30, n. 3, p. 551-578, 2008.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. A versatile algorithm for assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 1, p. 39-56, 2008.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 2, p. 674-693, 2007.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 509-528, 2008.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Sequencing mixed-model assembly lines: survey, classification and model critique. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 2, p. 349-373, 2009.

CAO, Z.; MA, S. Balancing and Sequencing Optimization of the Mixed Model Assembly Lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER SCIENCE AND COMPUTATIONAL TECHNOLOGY, 2008, Shanghai. **Proceedings... IEEE**, 2008. 5 p.

CAPACHO, L.; PASTOR, R.; GUSCHINSKAYA, O.; DOLGUI, A. Heuristic Methods to Solve the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, 2006. CASE '06, Shanghai. **Proceedings... IEEE**, 2006. p. 501-506.

CELANO, G.; COSTA, A.; FICHERA, S. A comparative analysis of sequencing heuristics for solving the Toyota Goal Chasing problem. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 20, n. 6, p. 573-581, 2004.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2ª. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

CRISTO, R. L. D. **Balanceamento de Linhas de Montagem com Uso de Algoritmo Genético para o Caso de Linhas Simples e Extensões**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. 83 p.

DA SILVEIRA, G.; BORENSTEIN, D.; FOGLIATTO, F. S. Mass customization: Literature review and research directions. **International Journal of Production Economics**, v. 72, n. 1, p. 1-13, 2001.

DONG, Q.; LU, J.; GUI, Y. Integrated Optimization of Production Planning and Scheduling in Mixed Model Assembly Line. **Procedia Engineering**, v. 29, p. 3340-3347, 2012.

DONNINI, N.; MAGATÃO, L.; RODRIGUES, L. C. D. A. Balanceamento de uma Linha de Montagem de Bancos de Automóveis com Buffer Intermediário Usando



Programação Linear Inteira Mista. In: XLII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2010, Bento Gonçalves. **Anais...** SBPO, 2010. 12 p.

DORIGO, M.; BLUM, C. Ant colony optimization theory: A survey. **Theoretical Computer Science**, v. 344, n. 2-3, p. 243-278, 2005.

FACHIN, O. **Fundamentos de Metodologia**. 5ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

FALKENAUER, E. Line balancing in the real world. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT, 2005, Lyon. **Proceedings...** Geneve: Inderscience Enterprises, 2005. p. 360-370.

FARNES, V. C. F.; PEREIRA, N. A. Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 2, n. 1, p. 125-136, 2007.

FATTAHI, P.; TAVAKOLI, N. B.; FATHOLLAH, M.; ROSHANI, A.; SALEHI, M. Sequencing mixed-model assembly lines by considering feeding lines. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 61, n. 5-8, p. 677-690, 2012.

FATTAHI, P.; SALEHI, M. Sequencing the mixed-model assembly line to minimize the total utility and idle costs with variable launching interval. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 45, n. 9-10, p. 987-998, 2009.

FERNANDES, F. C. F.; DALALIO, A. G. Balanceamento e rebalanceamento de linhas de montagem operadas por grupos de trabalho autogerenciados. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 3, p. 378-398, 2000.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2002.

GERHARDT, M. P. **Sistemática para Aplicação de Procedimentos de Balanceamento em Linhas de Montagem Multi-modelos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 129 p.

GIL, A. C. **Estudo de caso**. São Paulo: Atlas, 2009.

GILMORE, J. H. H.; PINE II, B. J. The Four Faces of Mass Customization. **Harvard Business Review**, v. 75, n. 1, p. 91-102, 1997.

GLOVER, F. Future Paths for Integer Programming. **Computers & Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GÖKCEN, H.; EREL, E. Binary Integer Formulation for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, n. 2, p. 451-461, 1998.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems, and computer integrated manufacturing**. 2ª. ed. Prentice-Hall, 2001.

GRZECHCA, W. Estimation of Time and Cost Oriented Assembly Line Balancing Problem. In: 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING, 2008, Las Vegas. **Proceedings...** IEEE, 2008. p. 248-253.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2010.

HÖRNER, D. **Resolução do problema das p-mediana não capacitado: Uma comparação de técnicas heurísticas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009. 104p.

HU, S.; LINWEI, X. Optimization of Scheduling Problem for Auto Mixed Model Assembly Line. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS, 2009, Wuhan. **Proceedings...** IEEE, 2009. 3 p.

HYUN, C. J.; KIM, Y.; KIM, Y. K. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. **Computers & Operations Research**, v. 25, n. 7-8, p. 675-690, 1998.

KIMMS, A. Minimal investment budgets for flow line configuration. **Institute of Industrial Engineers Transactions**, v. 32, n. 4, p. 287-298, 2000.

LAPIERRE, S. D.; RUIZ, A.; SORIANO, P. Balancing assembly lines with tabu search. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 826-837, 2006.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. Simulation-Based Optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. **Proceedings...** IEEE, 2000. p. 46-49.

LIU, S. B.; ONG, H. L.; HUANG, H. C. A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, n. 1-2, p. 71-77, 2005.

LUMMUS, R. R. A simulation analysis of sequencing alternatives for JIT lines using kanbans. **Journal of Operations Management**, v. 13, n. 3, p. 183-191, 1995.

MAGATÃO, L.; RODRIGUES, L. C. A.; MARCILIO, I.; SKRABA, M. Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista. In: XLIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2011, Ubatuba. **Pré-Anais...** SBPO, 2011. 12p.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7ª. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MCMULLEN, P. R. An ant colony optimization approach to addressing a JIT sequencing problem with multiple objectives. **Artificial Intelligence in Engineering**, v. 15, n. 3, p. 309-317, 2001.

MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V. A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. **IIE Transactions**, v. 32, n. 8, p. 679-686, 2000.

REID, D. R.; SANDERS, N. R. **Gestão de operações**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. **Administração da Produção e Operações**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

ROCHA, C. T. M. **Heurísticas para o Problema de Sequenciamento da Produção de Carros**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2005. 78p.

SANCHES, A. L. **Sequenciamento de Linhas de Montagem Múltiplas em Ambiente de Produção Enxuta Utilizando Simulação**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2010. 142p.

SANTORO, M. C.; MORAES, L. H. Simulação de uma linha de montagem de motores. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 3, p. 338-351, 2000.

SAWIK, T. Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. **European Journal of Operational Research**, v. 143, n. 1, p. 115-124, 2002.

SCHOLL, A.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. The sequence-dependent assembly line balancing problem. **OR SPECTRUM**, v. 30, n. 3, p. 579-609, 2008.

SCHOLL, A.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. Optimally solving the alternative subgraphs assembly line balancing problem. **Annals of Operations Research**, v. 172, n. 1, p. 243-258, 2009.

SCHOLL, A.; VOß, S. Simple Assembly Line Balancing - Heuristic Approaches. **Journal of Heuristics**, v. 2, n. 3, p. 217-244, 1996.

SIMARIA, A. S.; VILARINHO, P. M. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. **Computers & Industrial Engineering**, v. 47, n. 4, p. 391-407, 2004.

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

SMIDERLE, C. D.; VITO, S. L.; FRIES, C. E. A busca da eficiência e a importância do balanceamento de linhas de produção. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1997, Gramado. **Anais...** ABEPRO, 1997. 8 p.

SMITH, A. **A riqueza das nações**: investigação sobre sua natureza e suas causas. São Paulo: Nova Cultura, 1983.

SOUZA, M. C. F.; YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; GONÇALVES, E. V. Análise da alocação de mão-de-obra em linhas de multimodelos de produtos com demanda

variável através do uso da simulação : um estudo de caso. **Revista Produção**, v. 13, n. 3, p. 63-77, 2003.

TASAN, S. O.; TUNALI, S. A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 19, n. 1, p. 49-69, 2008.

TOGAWA, E. T.; de PAULA, J. V. D.; ÁLVARES, A. J. Sistema para balanceamento de linhas de montagem baseado no método COMSOAL. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2001, Uberlândia. **Proceedings... COBEM**, 2001. 8 p.

UDDIN, M. K.; SOTO, M. C.; LASTRA, J. L. M. An integrated approach to mixed-model assembly line balancing and sequencing. **Assembly Automation**, v. 30, n. 2, p. 164-172, 2010.

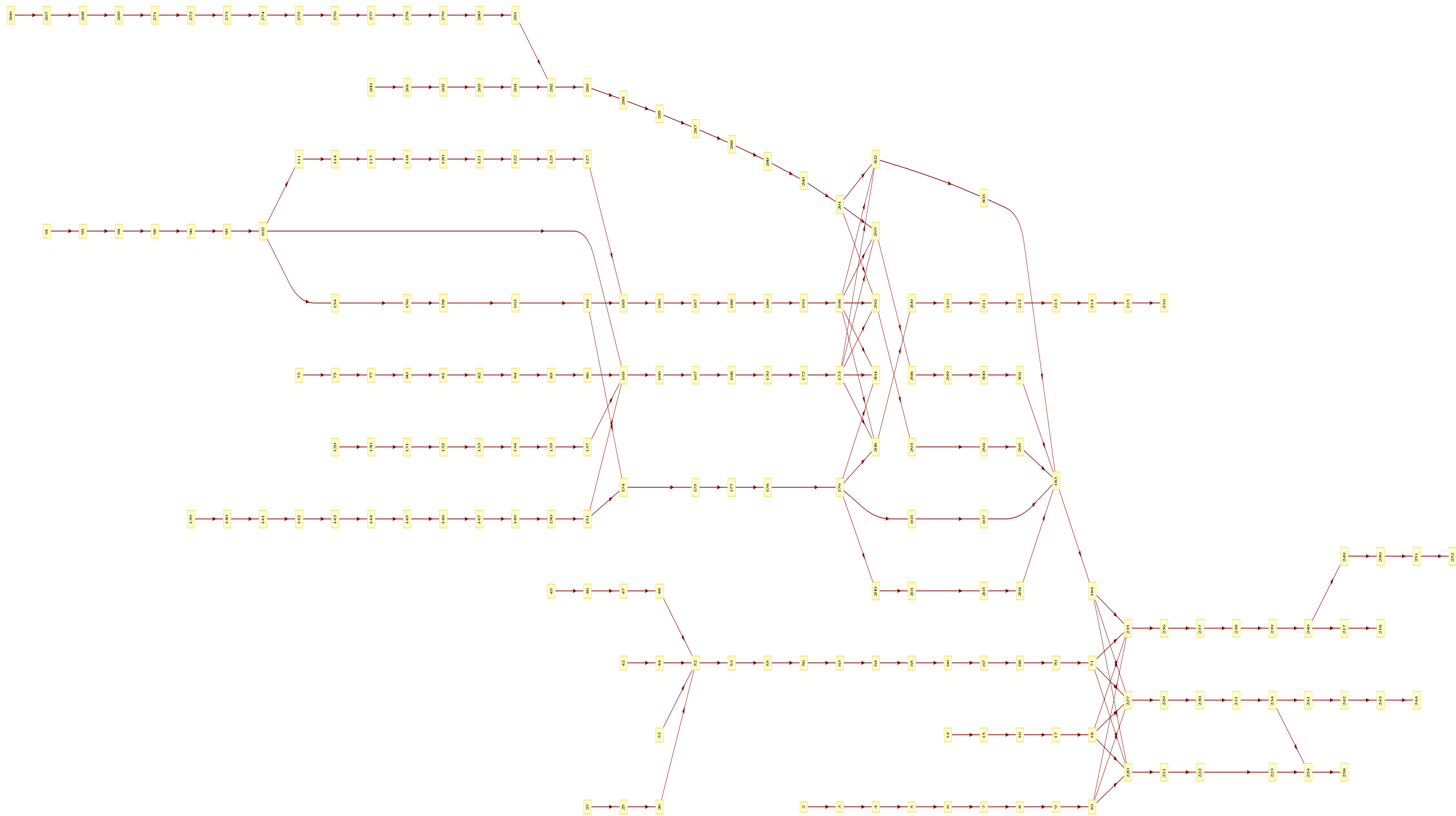
YAVUZ, M.; TUFEKCI, S. A bounded dynamic programming solution to the batching problem in mixed-model just-in-time manufacturing systems. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 2, p. 841-862, 2006.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 4ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZHU, X.; HU, S. J.; KOREN, Y.; HUANG, N. A complexity model for sequence planning in mixed-model assembly lines. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 2, p. 121-130, 2012.

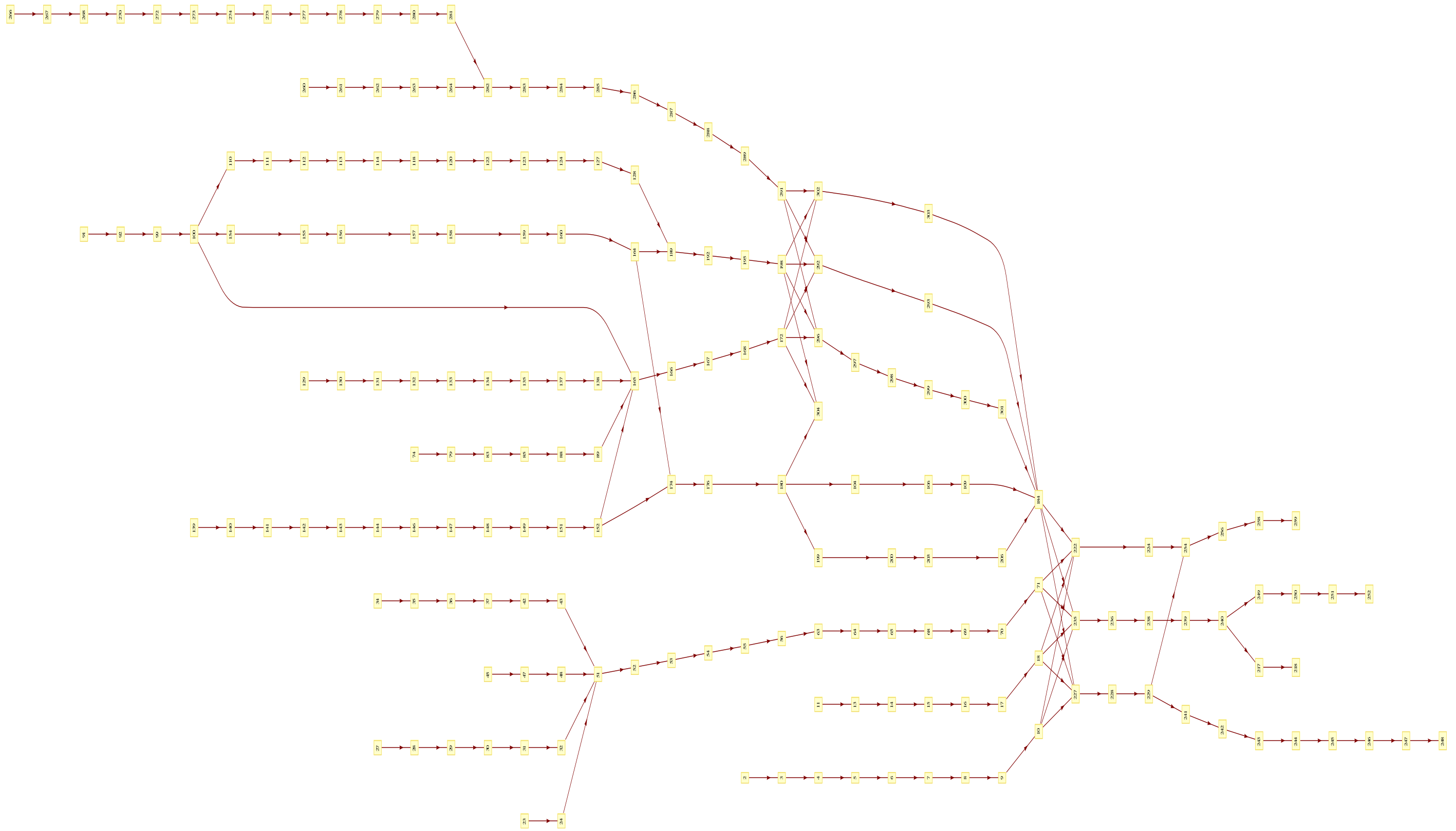
APÊNDICE A

FIGURA 26 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 1.



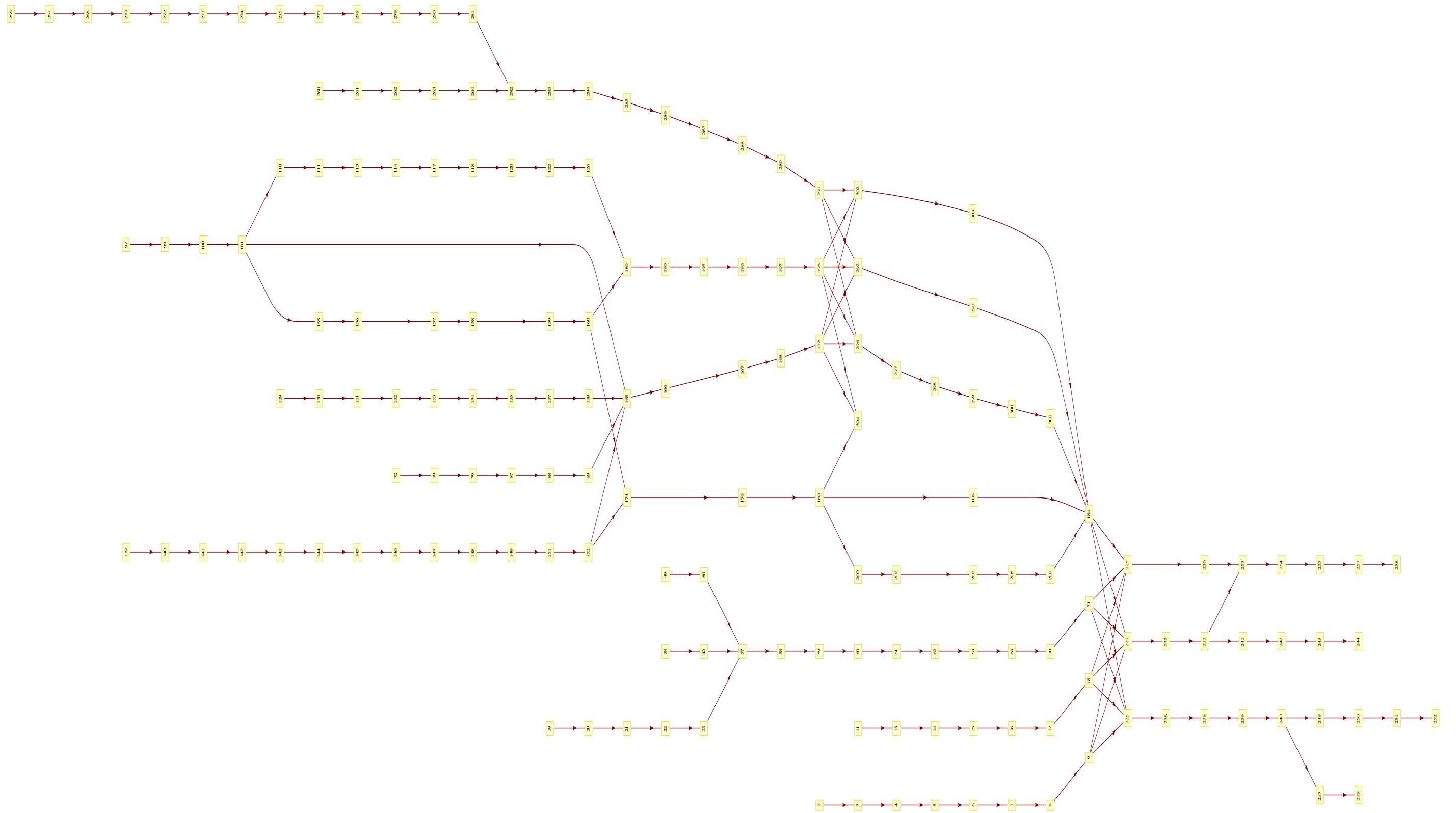
Fonte: O autor (2013).

FIGURA 27 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 2.



Fonte: O autor (2013).

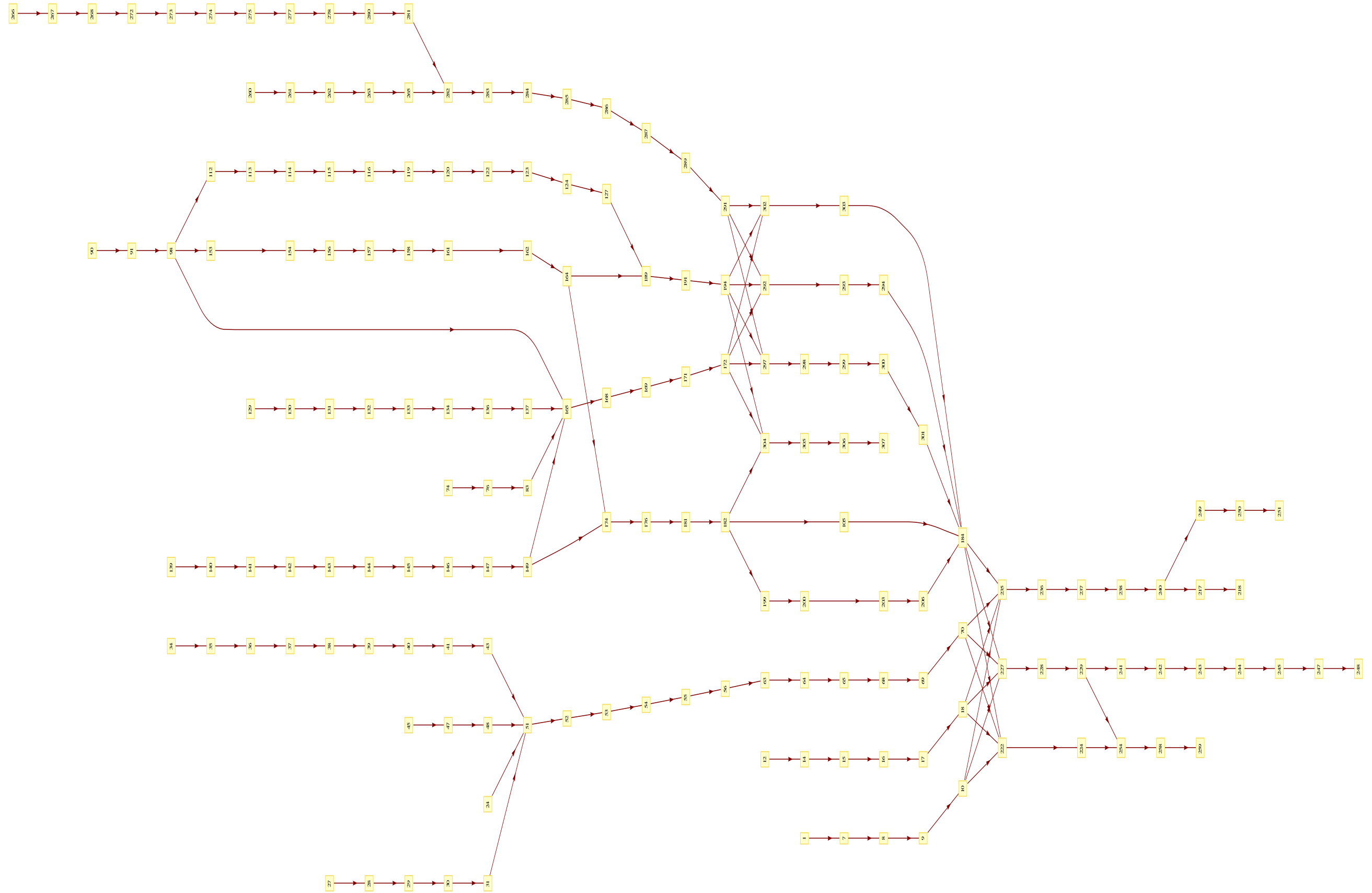
FIGURA 28 – GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 3.



Fonte: O autor (2013).



FIGURA 29 -- GRAFO DE PRECEDÊNCIA DO MODELO 4.



Fonte: O autor (2013).

**APÊNDICE B**

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
1	Estação 1				458,62
2	Estação 1	386,16	386,16	386,16	
3	Estação 1	305,84	305,84	305,84	
4	Estação 1	642,24	642,24	642,24	
5	Estação 1	201,37	201,37	201,37	
6	Estação 1	828,77	828,77	873,29	
7	Estação 1	848,85	1660,45	1660,45	1660,45
8	Estação 1	114,07	114,07	114,07	114,07
9	Estação 1	291,87	291,87	291,87	291,87
10	Estação 1	226,98	226,98		226,98
11	Estação 1		458,62	458,62	
12	Estação 1				1696,53
13	Estação 1		458,62	458,62	
14	Estação 1	201,37	201,37	133,57	201,37
15	Estação 1	654,75	654,75	436,50	654,75
16	Estação 1	2083,56	2895,16	2939,68	2066,39
17	Estação 1	145,50	145,50	145,50	145,50
18	Estação 1	291,00	291,00	291,00	291,00
19	Estação 1			482,48	
20	Estação 1			118,44	
21	Estação 1			991,44	
22	Estação 1			676,28	
23	Estação 1	1190,77	1190,77	1190,77	
24	Estação 1		1822,53		3485,89
25	Estação 1	1293,20			
26	Estação 1	1002,50			
27	Estação 1		398,67		1309,21
28	Estação 1		698,69		698,69
29	Estação 1		581,42		646,60
30	Estação 1		739,43		739,43
31	Estação 1		390,81		390,81
32	Estação 1		727,21		
33	Estação 1	1065,64			
34	Estação 1		398,67		1306,88
35	Estação 1		698,69		698,69
36	Estação 1		709,75		774,93
37	Estação 1		714,11		714,11
38	Estação 1			160,05	160,05
39	Estação 1				59,07
40	Estação 1				298,86
41	Estação 1				391,10
42	Estação 1	1190,77	1190,77	1867,06	
43	Estação 1		390,81		390,81

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
44	Estação 1	2295,70			
45	Estação 1		1097,36		2007,90
46	Estação 1	1065,64			
47	Estação 1	494,70	494,70		494,70
48	Estação 1	494,70	494,70		494,70
49	Estação 1			502,27	
50	Estação 1			291,00	
51	Estação 1		930,91		930,91
52	Estação 1	185,66	185,66		442,03
53	Estação 1	117,86	117,86		117,86
54	Estação 1		781,63		781,63
55	Estação 1	158,89	158,89		158,89
56	Estação 1	119,31	384,12		948,08
57	Estação 1			1145,09	
58	Estação 1			410,31	
59	Estação 1			314,28	
60	Estação 1			373,64	
61	Estação 1			209,81	
62	Estação 1			602,37	
63	Estação 1	212,43	212,43	106,22	212,43
64	Estação 1	398,67	398,67	366,66	398,67
65	Estação 1	226,98	226,98		226,98
66	Estação 1	727,21			
67	Estação 1	398,67			
68	Estação 1	1466,64	1466,64		1466,64
69	Estação 1		781,63		781,63
70	Estação 1	1162,25	1162,25	1162,25	1162,25
71	Estação 1	727,21	727,21	727,21	
72	Estação 2			436,21	
73	Estação 2	465,02			
74	Estação 2		1955,23		1955,23
75	Estação 2	1066,22			
76	Estação 2				2888,18
77	Estação 2	1272,54			
78	Estação 2			1051,09	
79	Estação 2		1165,16	1165,16	
80	Estação 2	628,27			
81	Estação 2	679,49			
82	Estação 2	356,18			
83	Estação 2		426,02		426,02
84	Estação 2	540,97			
85	Estação 2	509,54	509,54		
86	Estação 2	463,85			
87	Estação 2			509,54	

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
88	Estação 2		760,67	760,67	
89	Estação 2		664,64	664,64	
90	Estação 2				724,01
91	Estação 2	1655,21	1655,21		1655,21
92	Estação 2		1435,50		
93	Estação 2	973,69			
94	Estação 2	856,70			
95	Estação 2	648,64			
96	Estação 2	648,64			
97	Estação 2			1529,50	
98	Estação 2				1588,28
99	Estação 2	714,70	714,70	714,70	
100	Estação 2		787,16	787,16	
101	Estação 2			772,61	
102	Estação 2	544,46			
103	Estação 2	408,86			
104	Estação 2		304,39		
105	Estação 2				240,37
106	Estação 2		240,37		
107	Estação 2	601,79			
108	Estação 2			240,37	
109	Estação 2		316,90		
110	Estação 2		244,15	244,15	
111	Estação 2	271,50	271,50	271,50	
112	Estação 2		1072,04		1072,04
113	Estação 2		725,75	725,75	725,75
114	Estação 2	340,47	340,47	340,47	340,47
115	Estação 2				1686,64
116	Estação 2				1061,57
117	Estação 2	383,54		383,54	
118	Estação 2	106,22	106,22	106,22	
119	Estação 2				361,42
120	Estação 2	3809,77	3809,77	1686,64	3809,77
121	Estação 2	339,02			
122	Estação 2	222,62	222,62	222,62	222,62
123	Estação 2		238,62		238,62
124	Estação 2		399,54		399,54
125	Estação 2	235,71			
126	Estação 2			462,98	
127	Estação 2	544,46	544,46		544,46
128	Estação 2		363,75		
129	Estação 2	264,23	264,23	264,23	264,23
130	Estação 2	106,22	106,22	106,22	106,22
131	Estação 2	384,12	384,12	384,12	517,69

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
132	Estação 2	445,52	445,52	445,52	445,52
133	Estação 2	524,38	524,38	524,38	524,38
134	Estação 2	342,51	342,51	342,51	342,51
135	Estação 2	87,88	87,88	87,88	
136	Estação 2				504,59
137	Estação 2	1024,61	1024,61	1024,61	1024,61
138	Estação 2		339,02	339,02	
139	Estação 2	363,75	363,75	363,75	363,75
140	Estação 2	582,00	582,00	582,00	582,00
141	Estação 2	264,23	264,23	264,23	264,23
142	Estação 2	135,02	135,02	135,02	135,02
143	Estação 2	113,78	113,78	113,78	227,56
144	Estação 2	518,27	518,27	518,27	518,27
145	Estação 2	468,80		468,80	989,98
146	Estação 2	434,17	434,17	434,17	434,17
147	Estação 2	424,57	424,57	424,57	685,89
148	Estação 2		842,45	842,45	
149	Estação 2	363,75	363,75	363,75	363,75
150	Estação 2	480,73			
151	Estação 2	87,88	87,88	87,88	
152	Estação 2		339,02	339,02	
153	Estação 2				652,71
154	Estação 2	506,63	506,63		506,63
155	Estação 2		121,64	121,64	
156	Estação 2	106,22	594,51	594,51	106,22
157	Estação 2		725,75	725,75	725,75
158	Estação 2	434,17	434,17	774,64	434,17
159	Estação 2		1686,64	1686,64	
160	Estação 2		422,82	422,82	
161	Estação 2				1405,24
162	Estação 2				1061,57
163	Estação 2	320,10			
164	Estação 2	747,29	747,29		747,29
165	Estação 2	516,53	516,53	516,53	516,53
166	Estação 2	970,49	970,49	970,49	
167	Estação 2	970,49	970,49	970,49	
168	Estação 2	361,42	361,42	361,42	711,20
169	Estação 2				474,91
170	Estação 2	454,54			
171	Estação 2				441,74
172	Estação 2	2353,03	2353,03	2353,03	2353,03
173	Estação 2	339,02			
174	Estação 2	2157,18	2157,18	2157,18	2157,18
175	Estação 2	342,22			

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
176	Estação 2		574,43	574,43	574,43
177	Estação 2	468,80			
178	Estação 2	456,00			
179	Estação 2	339,02			
180	Estação 2		553,48	242,40	
181	Estação 2				969,03
182	Estação 2				937,60
183	Estação 2	102,43			
184	Estação 2	895,41	895,41	895,41	895,41
185	Estação 2	389,36			
186	Estação 2	326,50			
187	Estação 2	274,70			
188	Estação 2	700,73			
189	Estação 2	509,54	509,54	509,54	509,54
190	Estação 2			339,02	
191	Estação 2				540,97
192	Estação 2		339,02		
193	Estação 2	342,22			
194	Estação 2				540,97
195	Estação 2		339,02	339,02	
196	Estação 2			490,92	
197	Estação 2			490,92	
198	Estação 2	475,79	475,79	475,79	
199	Estação 2		112,91		112,91
200	Estação 2	509,25	509,25	509,25	509,25
201	Estação 2	342,22			
202	Estação 2			214,18	
203	Estação 2	112,91	112,91	112,91	112,91
204	Estação 2	238,33			
205	Estação 2			139,10	
206	Estação 2		210,98		210,98
207	Estação 2			485,10	
208	Estação 2	854,67			
209	Estação 2	854,67			
210	Estação 2	854,67			
211	Estação 2	873,58			
212	Estação 2	873,58			
213	Estação 2	339,02			
214	Estação 2	339,02			
215	Estação 2	453,96			
216	Estação 2	230,76			
217	Estação 3	2182,50	2182,50	2182,50	2182,50
218	Estação 3	711,79	711,79		711,79
219	Estação 3			378,59	

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
220	Estação 3	635,25			
221	Estação 3	485,10			
222	Estação 3	622,16	622,16		622,16
223	Estação 3	806,65			
224	Estação 3		1092,41		1092,41
225	Estação 3			1100,85	
226	Estação 3			797,05	
227	Estação 3	407,40	407,40	407,40	407,40
228	Estação 3		1092,41		1092,41
229	Estação 3	2793,02	2793,02		2793,02
230	Estação 3	485,10			
231	Estação 3	806,65			
232	Estação 3			1948,25	
233	Estação 3			1100,85	
234	Estação 3	806,65			
235	Estação 3	217,67	217,67	217,67	217,67
236	Estação 3	217,67	217,67	217,67	217,67
237	Estação 3	447,27			447,27
238	Estação 3	744,38	744,38	744,38	111,16
239	Estação 3	1024,90	1024,90	1024,90	
240	Estação 3	99,52	99,52	99,52	99,52
241	Estação 3	977,18	977,18	977,18	977,18
242	Estação 3	1593,52	1593,52	1593,52	1593,52
243	Estação 3	1593,52	1593,52	1593,52	1593,52
244	Estação 3	291,00	291,00	291,00	291,00
245	Estação 3		1659,28		1659,28
246	Estação 3		598,88		
247	Estação 3		491,79		491,79
248	Estação 3		491,79		491,79
249	Estação 3	1693,62	1693,62	1693,62	1693,62
250	Estação 3	1819,04	1819,04	1819,04	1819,04
251	Estação 3	1819,04	1819,04	1819,04	1819,04
252	Estação 3	1819,04	1819,04	1819,04	
253	Estação 3			155,10	
254	Estação 3	484,81	484,81	484,81	484,81
255	Estação 3			155,10	
256	Estação 3		240,37		
257	Estação 3			946,62	
258	Estação 3	174,89	174,89	281,40	174,89
259	Estação 3		598,88		598,88
260	Estação 4	3492,00	3492,00	3492,00	3783,00
261	Estação 4	3492,00	3492,00	3492,00	3783,00
262	Estação 4	1987,82	1987,82	1987,82	1987,82
263	Estação 4	3492,00	3492,00	3492,00	3783,00

Tarefa	Estação	Tempos de Montagem (UT)			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
264	Estação 4	3718,98	3718,98	3718,98	
265	Estação 4				3718,98
266	Estação 4	1865,02	1865,02	1865,02	1865,02
267	Estação 4	1532,12	1201,25	1201,25	1201,25
268	Estação 4	2365,25	1119,77	1119,77	1119,77
269	Estação 4	473,75			
270	Estação 4		2509,29	2509,29	
271	Estação 4	341,34			
272	Estação 4	1285,06	1285,06	1285,06	1285,06
273	Estação 4	2059,99	1998,88	1998,88	1998,88
274	Estação 4	3072,67	1998,88	1998,88	1998,88
275	Estação 4	1861,53	3350,87	3350,87	3350,87
276	Estação 4	439,99			
277	Estação 4	231,64	231,64	231,64	231,64
278	Estação 4	1288,55	1288,55	465,89	1288,55
279	Estação 4	662,32	662,32	662,32	
280	Estação 4	640,78	640,78	640,78	640,78
281	Estação 4	838,08	838,08	838,08	838,08
282	Estação 4	169,36	169,36	169,36	169,36
283	Estação 4	236,87	236,87	236,87	236,87
284	Estação 4	282,85	282,85	282,85	282,85
285	Estação 4	970,19	1479,44	1479,44	1479,44
286	Estação 4		163,54	163,54	163,54
287	Estação 4	144,63	144,63	144,63	144,63
288	Estação 4	169,36	169,36	169,36	
289	Estação 4	169,36	169,36	169,36	169,36
290	Estação 4	343,38			
291	Estação 4	291,00	291,00	291,00	291,00
292	Estação 4	1913,91	1913,91	1913,91	2418,50
293	Estação 4	649,51	649,51	649,51	649,51
294	Estação 4	291,00			291,00
295	Estação 4	262,48			
296	Estação 4		97,19	97,19	
297	Estação 4	150,74	150,74	150,74	150,74
298	Estação 4	463,56	463,56	463,56	463,56
299	Estação 4	117,86	117,86	117,86	117,86
300	Estação 4	291,00	291,00	291,00	291,00
301	Estação 4	291,00	291,00	291,00	291,00
302	Estação 4	194,39	194,39	194,39	194,39
303	Estação 4	669,30	669,30	669,30	669,30
304	Estação 4	291,00	291,00	291,00	291,00
305	Estação 4				937,60
306	Estação 4				504,59
307	Estação 4				194,39



## APÊNDICE C

Famílias de Variantes	Variante	Prioridade	Máximo diário	Linha de Montagem	Fornecedores Internos
1	A		5	1/4	
	B				
2	A	x			
	B				
3	A				
	B				
	C				
	D			1/7	
4	A	x			
	B				
	C				
5	A				1/4
	B				
	C				
	D			1/5	
6	A				
	B				agrupar iguais
	C				agrupar iguais
	D				agrupar iguais
	E				agrupar iguais
	F				agrupar iguais
	G				agrupar iguais
	H		25%		agrupar iguais
	I				agrupar iguais
	J		25%		agrupar iguais
	K		25%		agrupar iguais
	L		25%		agrupar iguais
	M		25%		agrupar iguais
	N		25%		agrupar iguais
	O		25%		agrupar iguais
	P		25%		agrupar iguais
	Q		25%		agrupar iguais
	R				agrupar iguais
7	A				
	B	x			
	C				
8	A	x			
	B				

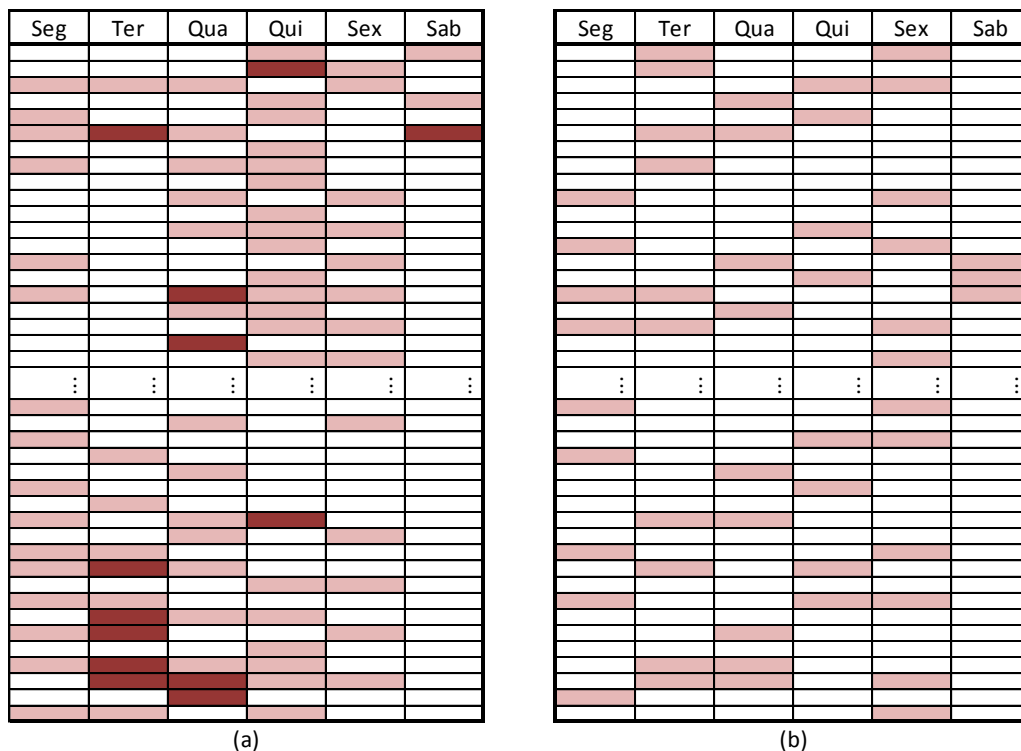
Famílias de Variantes	Variante	Prioridade	Máximo diário	Linha de Montagem	Fornecedores Internos
9	A		14		1/2
	B				
10	A			1/2	
	B				
	C				
	D				
11	A		50		
	B				
12	A			1/3	
	B				
13	A				
	B				
	C	x			
14	A	x			
	B				
15	A		1		
	B				
16	A				1/3 (F)
	B				1/3 (F)
	C				1/3 (F)
	D				1/3 (F)
	E				1/3 (F)
	F				
17	A				
	B				
	C				
	D				
	E				
	F				
	G				
	H			1/2	

continua

Famílias de Variantes	Variante	Prioridade	Máximo diário	Linha de Montagem	Fornecedores Internos	
18	A					
	B					
	C					
	D					
	E					
	F					
	G					
	H					
	I				1/5 (G ou menor)	
	J				1/5 (G ou menor)	
	K				1/5 (G ou menor)	
19	A			1/4		
	B					
20	A					
	B	x				
	C					
	D					
	E					
21	A	x				
	B					



FIGURA 31 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 2 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



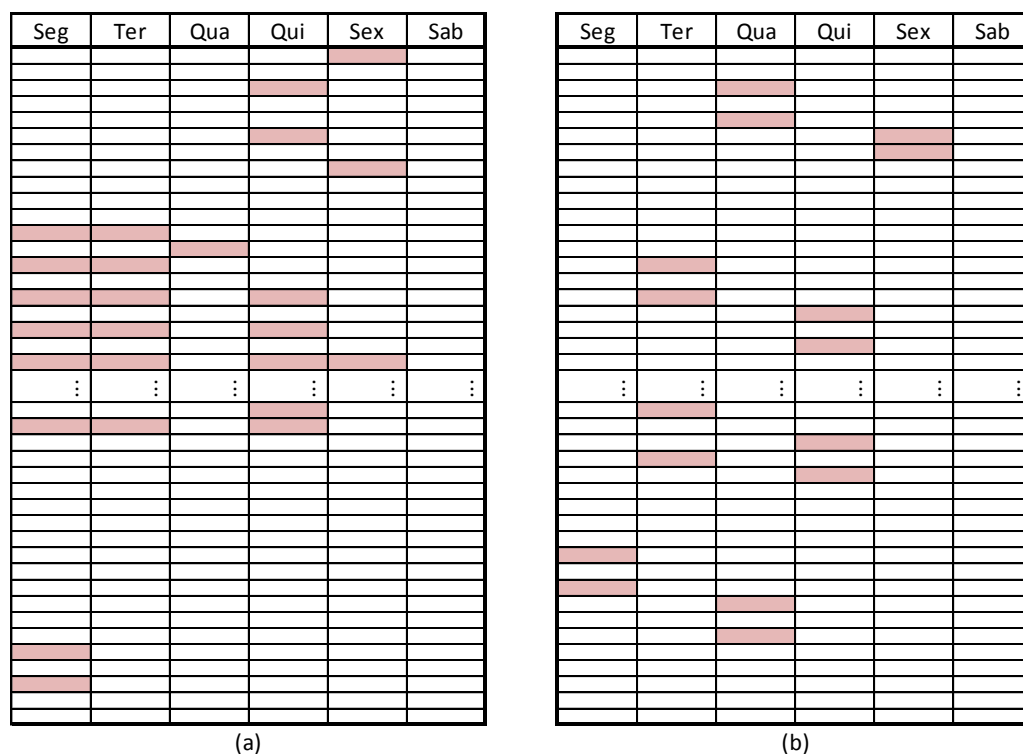
Fonte: O autor (2013).

FIGURA 32 -- VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 3 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



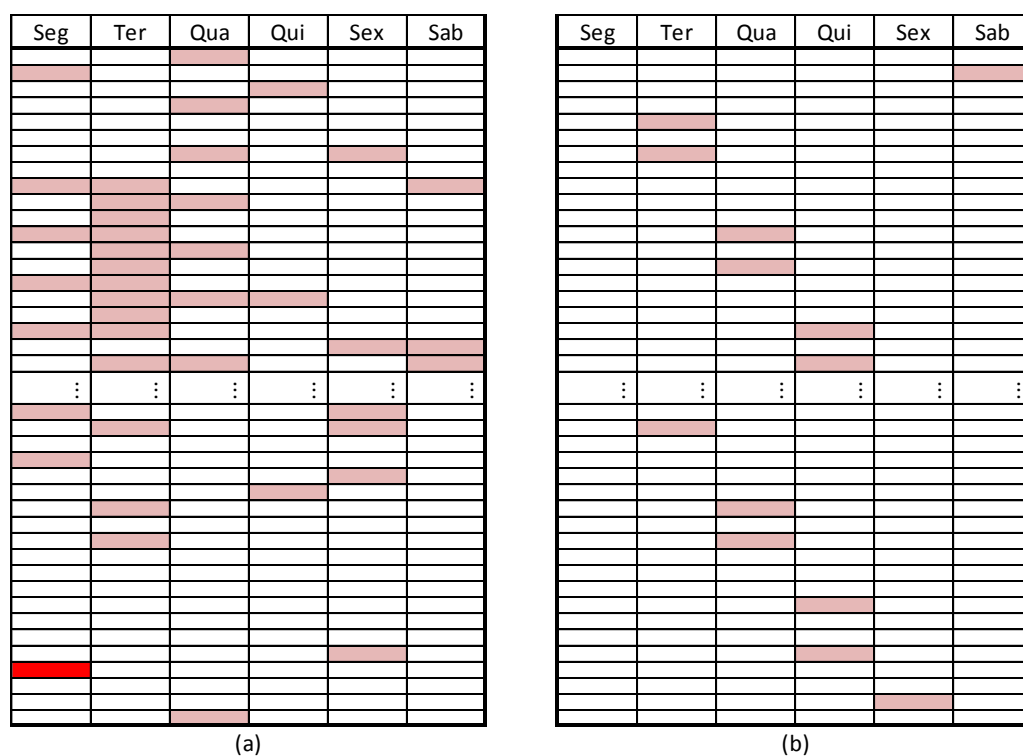
Fonte: O autor (2013).

FIGURA 33 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 4 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



Fonte: O autor (2013).

FIGURA 34 – VEÍCULOS COM QUEBRAS DE RESTRIÇÕES DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 5 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



Fonte: O autor (2013).

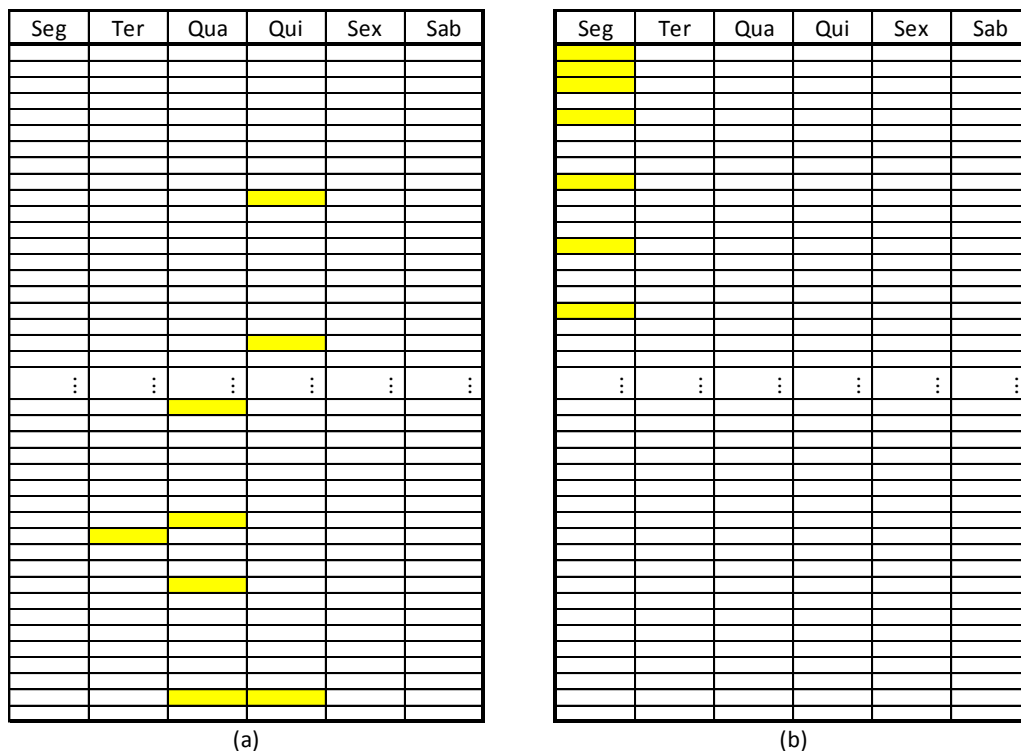






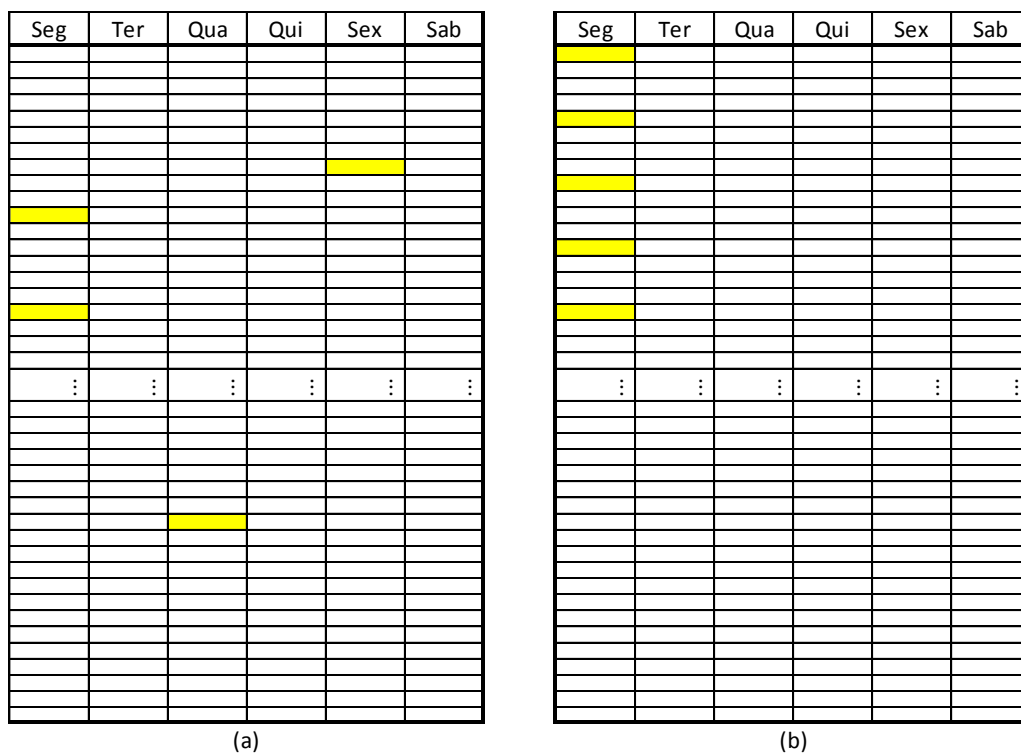


FIGURA 39 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 4 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



Fonte: O autor (2013).

FIGURA 40 – VEÍCULOS COM PRIORIDADES DE PRODUÇÃO DE PARTE DA SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO DA SEMANA 5 PARA SEQUENCIAMENTO (A) REALIZADO E (B) PROPOSTO.



Fonte: O autor (2013).

