

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SISTEMÁTICA PARA APLICAÇÃO DE
PROCEDIMENTOS DE BALANCEAMENTO EM
LINHAS DE MONTAGEM MULTI-MODELOS

Melissa Petry Gerhardt

Porto Alegre, 2005

MELISSA PETRY GERHARDT

**SISTEMÁTICA PARA APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE BALANCEAMENTO EM
LINHAS DE MONTAGEM MULTI-MODELOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – Área de Concentração: Gerência da Produção.

Orientador: Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.

Porto Alegre
2005

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.

PPGEP / UFRGS

Orientador

Prof. Luis Antonio Lindau, Ph.D.

Coordenador PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Francisco José Kliemann Neto, Dr.

Prof. PPGEP / UFRGS

Sérgio Eduardo Gouvêa da Costa, Dr.

Prof. PPGEPS / PUCPR

Tarcisio Abreu Saurin, Dr.

Prof. PPGEP / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar meu agradecimento a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor Flávio Fogliatto, orientador deste trabalho, pelo conhecimento, dedicação e entusiasmo transmitidos ao longo de todo o curso de Pós-Graduação.

Agradeço aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pela constante contribuição à minha formação profissional, bem como pelo esclarecimento de dúvidas e direcionamento do caminho a ser seguido.

Agradeço de forma especial a colega Carla Ruppenthal Neumann, pela atenção e ajuda dispensadas.

Agradeço a CAPES que financiou este estudo e possibilitou o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao Rafael pelo apoio e compreensão durante a realização deste trabalho, sendo uma fonte constante de carinho e motivação.

Finalmente, agradeço aos meus pais por acreditarem e incentivarem minhas escolhas em todos os momentos, tornando possível a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos do Trabalho.....	14
1.1.1 Objetivo Principal.....	14
1.1.2 Objetivos Especificos	15
1.2 Justificativa do Trabalho.....	15
1.3 Método de Pesquisa	16
1.4 Estrutura do Trabalho.....	18
1.5 Delimitações do Trabalho	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Customização em Massa.....	20
2.1.1 Conceitos Gerais.....	21
2.1.2 Categorias da Customização em Massa	22
2.1.3 Flexibilidade	23
2.2 Estudo do <i>Layout</i>	25
2.2.1 Objetivo de Estudo do Layout.....	26
2.2.2 Tipos Básicos de Layout	28
2.3 Linhas de Montagem Uni-Modelo.....	32
2.3.1 Dimensionamento e Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-Modelo....	36
2.4 Linhas de Montagem Multi-Modelos	42
2.4.1 Formas de União dos Diagramas de Precedência.....	44
2.4.2 Balanceamento Horizontal	49
2.4.3 Procedimentos de Balanceamento de Linhas Multi-Modelos.....	50
2.4.4 Detalhamento dos Procedimentos	59

CAPÍTULO 3 - SISTEMÁTICA PARA APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE BALANCEAMENTO EM LINHAS DE MONTAGEM MULTI-MODELOS	75
3.1 Etapa I – Identificação e Caracterização do Sistema Produtivo a ser Balanceado	77
3.1.1 Contextualização inicial do sistema produtivo a ser balanceado	77
3.1.2 Pré-coleta dos tempos de processamento das tarefas de montagem.....	79
3.1.3 Contextualização final do sistema produtivo a ser balanceado	80
3.2 Etapa II – Escolha do Procedimento para o Balanceamento da Linha de Montagem	82
3.3 Etapa III – Definição das Informações e Indicadores de Desempenho a serem Coletados.....	82
3.3.1 Definição das informações sobre produtos e fluxos da linha	82
3.3.2 Definição dos indicadores de desempenho.....	83
3.4 Etapa IV – Coleta das Informações Necessárias para a Realização do Balanceamento e Obtenção dos Indicadores de Desempenho.....	84
3.5 Etapa V – Realização do Balanceamento.....	89
3.6 Etapa VI – Coleta das Informações Necessárias para Obtenção dos Indicadores de Desempenho Após o Balanceamento.....	90
3.7 Etapa VI – Avaliação do Balanceamento Através da Comparação dos Indicadores Obtidos Antes e Após a sua Realização	90
 CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO	 92
4.1 Etapa I – Identificação e Caracterização do Sistema Produtivo a ser Balanceado	93
4.1.1 Contextualização inicial do sistema produtivo a ser balanceado	93
4.1.2 Pré-Coleta dos Tempos de Processamento das Tarefas de Montagem	93
4.1.3 Contextualização Final do Sistema Produtivo a ser Balanceado.....	95
4.2 Etapa II – Escolha do Procedimento para o Balanceamento da Linha de Montagem	96
4.3 Etapa III – Definição das Informações e Indicadores de Desempenho a serem Coletados.....	96
4.3.1 Definição das informações sobre produtos e fluxos da linha	96
4.3.2 Definição dos indicadores de desempenho.....	97
4.4 Etapa IV – Coleta das Informações Necessárias para a Realização do Balanceamento e Obtenção dos Indicadores de Desempenho.....	97
4.5 Etapa V – Realização do Balanceamento.....	103
4.6 Etapa VI – Coleta das Informações Necessárias para Obtenção dos Indicadores de Desempenho Após o Balanceamento.....	106
4.7 Etapa VII – Avaliação do Balanceamento Através da Comparação dos Indicadores Obtidos Antes e Após a sua Realização	106
 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	 108
5.1 Conclusões	108
5.2 Recomendações para Futuras Pesquisas	110
 REFERÊNCIAS	 111

APÊNDICE 1 118

APÊNDICE 2 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Impacto da competência de uma manufatura flexível na sua capacidade e satisfação do consumidor	24
Figura 2	Tipos de <i>layout</i> : volume × variedade	28
Figura 3	Exemplo de <i>layout</i> fixo	29
Figura 4	Exemplo de <i>layout</i> por processo.....	30
Figura 5	Exemplo de <i>layout</i> celular	31
Figura 6	Exemplo de <i>layout</i> por produto	32
Figura 7	Linha de montagem com configuração em U.....	35
Figura 8	Linha de montagem <i>two-sided</i>	35
Figura 9	Exemplo de diagrama de precedência	36
Figura 10	Matriz de precedência.....	37
Figura 11	Classificação dos procedimentos de balanceamento para linhas uni-modelo ..	42
Figura 12	Diagramas de precedência para (a) modelo A e (b) modelo B.....	45
Figura 13	Matriz de precedência para (a) modelo A e (b) modelo B	46
Figura 14	Matriz de precedência equivalente	46
Figura 15	Diagrama de precedência equivalente	46
Figura 16	Classificação dos procedimentos de balanceamento para linhas multi-modelos 52	
Figura 17	Procedimento em dois passos para o balanceamento de linhas multi-modelos	63
Figura 18	Distribuição das formigas em um conjunto de caminhos alternativos	67
Figura 19	Notação utilizada no procedimento	69
Figura 20	Estratégias para seleção das tarefas	71
Figura 21	Funções objetivo para seleção das tarefas	74
Figura 22	Fluxograma da sistemática proposta.....	78
Figura 23	Classificação da linha de montagem	81
Figura 24	Informações necessárias para a aplicação de cada procedimento	83

Figura 25	Informações necessárias para mensuração dos indicadores de desempenho ...	84
Figura 26	Identificação dos modelos produzidos pela linha de montagem	85
Figura 27	Identificação das tarefas executadas pela linha de montagem	85
Figura 28	Demanda diária por cada modelo produzido na linha	87
Figura 29	Custo unitário dos equipamentos utilizados nas estações de trabalho.....	88
Figura 30	Indicadores de desempenho.....	91
Figura 31	Identificação dos modelos produzidos pela linha de montagem	98
Figura 32	Diagrama de precedência equivalente	102
Figura 33	Soluções inicial e final do primeiro passo	105
Figura 34	Solução final.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tempos de processamento das tarefas de montagem	80
Tabela 2	Cálculo do <i>CV</i> para cada tarefa de montagem.....	94
Tabela 3	Identificação das tarefas executadas pela linha de montagem	98
Tabela 4	Demanda por cada modelo produzido na linha	100
Tabela 5	Percentagem de cada modelo produzido pela linha.....	101
Tabela 6	Cálculo do Tempo de Processamento equivalente	103
Tabela 7	Indicadores de desempenho antes e após o balanceamento	107

RESUMO

Em sistemas produtivos onde a diversificação da produção é vista como estratégia competitiva, a customização torna-se uma ferramenta importante, pois possibilita a produção de itens diferenciados a custos similares aos de produtos padronizados. No entanto, sua implementação requer certa flexibilidade no processo produtivo, sendo esta adquirida através da adoção de linhas de montagem capazes de alternar diferentes modelos de um mesmo produto, denominadas como linhas de montagem multi-modelos. Neste tipo de sistema produtivo, a distribuição das tarefas de montagem entre as estações de trabalho tende a ser mais complexa, devido às características de cada modelo produzido pela linha. Dessa forma, o estudo do problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos é necessário ao desejar-se obter uma melhor distribuição da carga de trabalho entre as estações e, conseqüentemente, um aumento de produtividade. Esta dissertação propõe uma sistemática para realização de balanceamento em linha de montagem multi-modelos. Para tanto, são classificados quanto às suas características e aplicabilidade procedimentos de balanceamento de linhas multi-modelos desenvolvidos por diversos autores. Um desses procedimentos, inserido na sistemática proposta, tem sua aplicação ilustrada através de um estudo de caso em uma indústria de manufatura.

Palavras-chave: *layout*; otimização; balanceamento de linhas multi-modelos.

ABSTRACT

In productive systems where the production diversification is seen as a competitive strategy, customization becomes an important tool, once it makes the production of different items with similar costs to the ones of standardized products possible. However, its implementation requires flexibility on the productive process, and this is achieved through the use of assembly lines, denominated multi-models assembly lines, that are able to alternate different models of a same product. In this kind of productive system, the distribution of the assembly tasks between the workstations tends to be more complex because of each model features that are produced by the line. This way, the study of the problem of multi-models assembly lines balancing is necessary to obtain a better distribution of the work between stations and consequently, a productivity increase. This dissertation suggests a methodology to develop multi-models assembly lines balancing. So, they are classified considering their features and the applicability of multi-models assembly lines balancing procedures developed by several authors. One of these procedures, used in the proposed methodology, has its use shown through the study case of a manufacture industry.

Key words: layout; optimization; multi-models assembly line balancing.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A crescente competitividade observada entre as empresas de manufatura, aliada a um consumidor cada vez mais exigente, vem obrigando as indústrias a realizarem modificações em seu sistema produtivo. Com o objetivo de atingir novas estratégias de diferenciação de seus produtos, as empresas passaram a investir na diversificação da produção, aumentando o número de modelos e recursos opcionais.

Para atender a demanda por produtos diferenciados, um novo sistema de produção, denominado customização em massa foi concebido por Davis (1989). Segundo autores como Gilmore e Pine II (1997); Da Silveira; Borestein e Fogliatto (2001); Frutos e Borenstein (2004), a customização em massa (CM) consiste em um novo conceito na indústria, com o objetivo de fornecer produtos e serviços diferenciados através de processos flexíveis, em diferentes volumes e a baixo custo.

Desse modo, a customização da produção torna-se uma estratégia importante para as empresas de manufatura, visto que produtos diferenciados apresentam melhor potencial de aceitação pelo mercado consumidor (DA SILVEIRA; BORESTEIN; FOGLIATTO, 2001). O objetivo é produzir itens que atendam às preferências individuais dos clientes, a preços similares aos de produtos padronizados. Para tanto, existe uma necessidade de sistemas flexíveis, capazes de produzir diversas versões de um mesmo produto. No entanto, a utilização desses sistemas não deve aumentar os custos de produção excessivamente; esta é a razão porque, mesmo nessas situações, a configuração de linha de produção continua a ser utilizada, com a adoção de medidas específicas capazes de tornar estes sistemas apropriados para fabricação de diferentes modelos, surgindo com isso as linhas de montagem multi-modelos (MERENGO; NAVA; POZZETTI, 1999).

Para a correta implementação e utilização de uma linha de montagem, alguns aspectos operacionais devem ser definidos *a priori* (SARKER; PAN, 1998): (i) determinação do tempo de ciclo, (ii) determinação do número de estações de trabalho, e (iii) determinação da seqüência de modelos que maximizará a utilização dos operadores. A partir dessas definições, é possível balancear a linha, isto é, distribuir as tarefas em estações de trabalho de maneira que cada estação utilize aproximadamente o mesmo tempo para realizar as tarefas nela alocadas.

O balanceamento de linhas de montagem multi-modelos tem se apresentado como um problema clássico nas indústrias. Formalmente, o problema de balanceamento de uma linha de montagem multi-modelos pode ser definido da seguinte maneira. Dado o número de modelos, as suas tarefas associadas, o tempo para realização de cada tarefa e suas relações de precedência, o problema consiste em alocar as tarefas a uma determinada seqüência de estações de modo que as relações de precedência sejam satisfeitas e a capacidade otimizada (EREL; GOKCEN, 1999).

O presente trabalho propõe primeiramente uma classificação dos procedimentos desenvolvidos para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos quanto às suas características e aplicabilidade. A partir do estudo dos procedimentos, é proposta uma sistemática referente às etapas necessárias para realização do balanceamento em linhas multi-modelos, a qual abrange desde a identificação da linha a ser balanceada, diretrizes para escolha de um determinado procedimento de balanceamento, sua aplicação à linha, e avaliação, através de indicadores de desempenho, da solução obtida. Finalmente, como forma de ilustrar a realização do balanceamento, é apresentado um estudo de caso em uma indústria de manufatura.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 *Objetivo Principal*

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver uma sistemática referente às etapas necessárias para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

Constituem os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Revisar e contextualizar o estado da arte do problema de balanceamento de linhas de montagem uni-modelo e multi-modelos na literatura;
- b) Ilustrar a utilização de um procedimento de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos em um estudo de caso, a partir de dados obtidos em uma empresa de manufatura; e
- c) Avaliar a sistemática proposta e o procedimento aplicado através da utilização de indicadores de desempenho específicos.

1.2 **JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

A diminuição do ciclo de vida dos produtos e a expansão da competitividade entre as empresas ocasionaram a falência de muitas indústrias de produção em massa, aumentando a necessidade de estratégias de produção focadas nos consumidores (DA SILVEIRA; BORESTEIN; FOGLIATTO, 2001). Desse modo, a customização da produção vem sendo identificada por um número cada vez maior de organizações como uma importante estratégia competitiva.

De acordo com Royer (2001), a crescente demanda por produtos customizados e de baixo custo conflita diretamente com o grau de rigidez apresentado pela maioria das empresas de manufatura. Assim, constata-se como uma das características da customização da produção a necessidade, para sua implementação, de ferramentas que venham a flexibilizar o processo produtivo. Considerações econômicas tornaram necessária a utilização da linha de montagem para fabricação de produtos com diferentes modelos. Como consequência, surgiram linhas de montagem capazes de produzir produtos com diferentes modelos; tais linhas passaram a ser designadas como linhas de montagem multi-modelos.

As linhas multi-modelos são geralmente utilizadas para montagem de dois ou mais modelos diferentes de um mesmo produto simultaneamente, onde os itens de produção se alteram de modelo para modelo continuamente na linha de montagem. A quantidade de cada modelo produzido pela linha é usualmente baixa, devido ao desejo do cliente por modelos

exclusivos. Esse tipo de linha de montagem ocorre em diversas áreas de manufatura; como exemplo, podem ser citadas as indústrias de vestuário, automobilística e aparelhos eletrônicos (SARKER; PAN, 1998).

Em uma linha de montagem multi-modelos, vários modelos de um mesmo produto são alternados na linha. Como cada modelo requer um tempo diferente para execução de suas tarefas de montagem, a quantidade de trabalho designada a cada operador depende do modelo que está sendo produzido pela linha. Desse modo, nesse tipo de sistema produtivo pode ocorrer que o operador de uma determinada estação complete seu trabalho antes do término do tempo de ciclo, ficando ocioso até a chegada do próximo produto. Em outras vezes, ele pode não conseguir completar o trabalho na estação dentro do tempo de ciclo determinado, necessitando da ajuda de outro operador. Nos dois casos, a linha está desbalanceada e a taxa de produção será baixa (SARKER; PAN, 1998).

Desta forma, justifica-se o estudo do problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, objetivo dessa dissertação. Uma linha de montagem balanceada proporcionará uma otimização do sistema produtivo, aumentando a produção. Em conjunto, proporcionará um sistema de manufatura flexível, capaz de atender a demanda por produtos diversificados sem um aumento nos custos de produção.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa desta dissertação, do ponto de vista de sua natureza, enquadra-se na categoria de pesquisa aplicada, sendo utilizada uma abordagem quantitativa.

A pesquisa aplicada consiste na aplicação da pesquisa básica a problemas do mundo real, e refere-se à discussão de um problema com a utilização de um referencial teórico. Seu propósito inclui uma preocupação teórica, seja no refinamento ou na criação de uma nova teoria ou método que possibilite intervir ou solucionar problemas. O tema da pesquisa deve ser tão generalizável no tempo e no espaço quanto possível, porém limitado ao contexto de sua aplicação (PATTON *apud* ROESCH, 1994).

Em relação aos seus objetivos, o trabalho enquadra-se na classe de pesquisa exploratória, visando proporcionar uma maior familiaridade com o problema através de levantamento bibliográfico e análise de exemplos.

Do ponto de vista de seus procedimentos técnicos, segundo Gil (1991), o presente trabalho utilizará a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso, sendo a pesquisa elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente por livros e artigos de periódicos. Já o estudo de caso é o método de pesquisa indicado quando se colocam questionamentos do tipo “como?” e “por quê?”, quando o pesquisador tem pouco controle sobre o evento estudado e quando o foco é sobre um fenômeno contemporâneo inserido em algum contexto da vida real (YIN, 2001).

Segundo Eisenhardt (1989), o estudo de caso pode ser utilizado para atingir, principalmente, dois objetivos: descrever uma situação e testar teorias. Em relação à descrição de uma situação, utiliza-se uma experimentação prática com o objetivo de explicar como ocorre a inter-relação de seus fatores na construção de uma realidade específica. O objetivo de testar teorias pressupõe a utilização de um referencial teórico inicial para o qual se deseja comprovar a validade prática. O estudo de caso, então, é planejado e conduzido de modo a criar um cenário capaz de dar subsídios para refutar ou validar as hipóteses iniciais, ou seja, rejeitar ou aceitar teorias.

A realização de um estudo de caso como método de pesquisa, apresenta etapas distintas de trabalho: (i) planejamento, onde o projeto de pesquisa é estruturado; (ii) coleta de dados, que visa a obtenção de evidências para o estudo proposto; (iii) análise e interpretação dos dados, que consiste em examinar, categorizar e classificar as evidências coletadas; e (iv) elaboração de relatório e apresentação dos resultados (YIN, 2001).

O método de desenvolvimento da pesquisa realizada nesta dissertação consta das seguintes etapas:

- a) Realização de uma revisão bibliográfica a respeito dos procedimentos de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, bem como de assuntos pertinentes à realização do trabalho;
- b) Desenvolvimento de uma sistemática referente às etapas necessárias para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-

modelos, compreendendo desde a escolha da linha a ser balanceada, bem como a escolha do procedimento de balanceamento e indicadores de desempenho;

- c) Realização do estudo de caso, através do levantamento dos dados necessários, e aplicação dos mesmos ao procedimento utilizado para o balanceamento da linha de montagem;
- d) Avaliação crítica da sistemática através dos indicadores de desempenho; e
- e) Considerações finais e recomendações críticas a partir da análise efetuada.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo estes apresentados a seguir.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre o tema abordado, as justificativas para a escolha do mesmo, os objetivos a serem alcançados com o trabalho, bem como o método escolhido para atingi-los. No final deste capítulo são descritas as delimitações do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes ao tema da dissertação. Através da revisão, procura-se apresentar de forma clara e detalhada o conhecimento adquirido e as pesquisas realizadas na área de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos.

O terceiro capítulo descreve a sistemática proposta para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos.

No quarto capítulo do trabalho é apresentada, através de um estudo de caso, a aplicação da sistemática proposta em uma empresa de manufatura, além da análise dos resultados obtidos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões decorrentes do desenvolvimento do trabalho, bem como sugestões para estudos futuros sobre o tema.

1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho pretende desenvolver uma sistemática referente às etapas necessárias para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos. Além disso, é proposta uma aplicação prática, em forma de estudo de caso, em uma empresa de manufatura. No entanto, é importante ressaltar algumas delimitações existentes no projeto proposto, listadas a seguir.

A revisão bibliográfica procura enfatizar os procedimentos para balanceamento de linhas de montagem multi-modelos desenvolvidos mais recentemente. Desse modo, a revisão não abrange todos os procedimentos de balanceamento existentes na literatura.

A sistemática proposta se aplica somente a linhas de montagem (*layout* por produto) focadas na produção de diversos modelos de um mesmo produto. Além disso, não abrange todas as configurações possíveis às linhas multi-modelos, somente as apresentadas pelos procedimentos classificados.

O estudo de caso limita-se a ilustrar e avaliar teoricamente a sistemática proposta em uma determinada linha de montagem, não sendo implementado o balanceamento obtido para a linha analisada.

A inclusão de novos modelos à linha de montagem, bem como qualquer alteração nos tempos de processamento e precedências das tarefas realizadas na linha, exigirá um novo balanceamento da mesma, visto que esses dados influem diretamente no resultado obtido.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes ao tema desta dissertação. Primeiramente aborda-se a customização em massa, apresentando seus conceitos básicos, categorias e flexibilidade. A seguir, é apresentada uma introdução ao estudo do *layout* em relação aos seus objetivos e tipos básicos. Finalmente, é abordado o balanceamento de linhas de montagem uni-modelo e multi-modelos, bem como os procedimentos mais difundidos na literatura para solucionar ambos os problemas.

2.1 CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA

Nas últimas décadas tem-se observado entre as empresas de manufatura profundas transformações em seus ambientes econômicos e tecnológicos. Em termos econômicos, estão inseridas em um processo de globalização e unificação de mercados. Nesse contexto, de concorrência acirrada e batalha por preços competitivos, as organizações estão enfrentando novos desafios, como o de atender rapidamente as necessidades apresentadas pelos clientes. Fatores como esses levam as empresas a um ambiente onde a mudança é permanente, exigindo flexibilidade e adaptação às exigências de mercado (DA SILVA; RENTES, 2002).

Em face deste novo ambiente, as empresas têm sido pressionadas a reavaliar suas estratégias básicas de manufatura, de forma a encontrar uma posição de mercado competitiva (FRUTOS; BORENSTEIN, 2004; JIAO; MA; TSENG, 2003). Nessa nova realidade, a produção de produtos customizados e economicamente viáveis tem-se destacado como uma ferramenta importante para diferenciação dos produtos. Produtos customizados podem ser descritos como aqueles que atendem a demandas específicas do cliente.

2.1.1 *Conceitos Gerais*

A customização em massa consiste em um novo paradigma para que as indústrias forneçam produtos e serviços que melhor atendam as necessidades dos clientes, ao mesmo tempo em que mantém a mesma eficiência obtida através da produção em massa. Do ponto de vista econômico, a CM possibilita a melhor relação entre a capacidade de produção e as necessidades dos clientes (JIAO; MA; TSENG, 2003).

O conceito de CM pode ser definido de uma forma ampla ou estreita. A forma ampla foi primeiramente concebida por Davis (1989), e promove à CM a habilidade de desenvolver produtos e serviços personalizados através de um processo ágil, flexível e integrado. Muitos autores também propuseram conceitos similares, mas de uma forma mais estreita e prática. Eles definem a CM como um sistema que utiliza a tecnologia da informação, a flexibilidade nos processos e uma estrutura organizacional para produzir uma gama de diferentes produtos e serviços que vão de encontro às necessidades específicas de cada cliente, a um custo próximo ao dos obtidos na produção em massa (DA SILVEIRA; BORESTEIN; FOGLIATTO, 2001).

Segundo Da Silveira; Borestein e Fogliatto (2001), a justificativa para o desenvolvimento da CM é baseada em três idéias principais. A primeira, diz respeito à introdução de ferramentas como a flexibilidade na manufatura e a tecnologia de informação, que possibilitaram aos sistemas de produção proporcionarem alta variedade a um baixo custo. A segunda se refere ao aumento da demanda por variedade e conseqüente customização dos produtos por parte dos clientes. Finalmente, a terceira enfoca a diminuição do ciclo de vida dos produtos e o aumento da competitividade entre as empresas de manufatura que têm causado a falência de diversas empresas de produção em massa, aumentando a necessidade de estratégias de produção focadas nos clientes.

A principal característica de um produto ou serviço elaborado em um sistema de CM é o número de opções de escolha oferecido aos clientes. O número de opções proporcionadas, assim como a forma como estas opções serão oferecidas aos clientes, determinarão o nível de customização a ser praticado em um produto ou serviço, bem como a conseqüente demanda por flexibilidade dentro da organização.

2.1.2 *Categorias da Customização em Massa*

Lampel e Mintzberg (1996) classificaram a CM dentro de cinco categorias distintas. Essa classificação envolve diferentes configurações de processos, produtos e formas de relacionamentos com clientes. As categorias são classificadas em:

- a) Customização Pura: obtida através da encomenda individual, onde as características do produto são definidas pelo cliente junto com a empresa. Aqui todas as etapas de produção (projeto, fabricação, montagem e distribuição) são direcionadas para a customização. Como exemplo pode-se citar a produção de uma casa, onde cada cliente exige um projeto diferenciado.
- b) Customização Adaptada: a empresa fornece um produto padrão que pode ser adaptado às necessidades individuais de cada cliente. Um exemplo é a venda de tapetes padronizados, onde o cliente pode acrescentar um logotipo ou mensagem personalizada.
- c) Customização Padronizada: o sistema de produção é padronizado, sendo incluída a possibilidade do cliente definir ou acrescentar algumas características ao produto. Isto pode ocorrer durante a etapa de fabricação, na montagem final ou ainda em uma etapa adicional que venha a contemplar as características definidas pelo cliente. Como exemplo, cita-se as indústrias de automóveis que oportunizam ao cliente definir os acessórios do seu carro.
- d) Padronização Segmentada: essa forma de customização trabalha com uma variedade de produtos padronizados. Isto proporciona à empresa trabalhar dentro de uma estrutura de produção em massa e oferecer aos seus clientes um conjunto de opções de escolha. Como exemplo, cita-se as indústrias de cereais que trabalham dentro de um projeto básico que é expandido dentro de um conjunto de vários produtos.
- e) Padronização Pura: nesse tipo de estratégia existe um projeto dominante que atinge as necessidades de um grupo grande de compradores, é produzido em grande escala e distribuído de forma comum a todos. Como exemplo, cita-se o antigo *Model T*, produzido pela *Ford Motor Company*.

No entanto, a determinação do nível de customização a ser oferecido ao cliente não é o único determinante do sucesso da implementação da CM em uma organização. Fatores

internos e externos também são decisivos para o sucesso da customização a ser implementada. Esses fatores são (DA SILVEIRA; BORESTEIN; FOGLIATTO, 2001): (i) a disponibilidade de tecnologias habilitadoras; (ii) o compartilhamento de informações e conhecimentos; (iii) a necessidade de o produto apresentar características customizáveis; (iv) existência de uma demanda pela customização do produto; (v) o desenvolvimento de uma eficiente cadeia de suprimentos e; (vi) condições de mercado incentivadoras.

2.1.3 *Flexibilidade*

Para a implementação da CM em uma organização, são necessários diversos habilitadores que venham a viabilizá-la. Entre estes habilitadores, um dos principais consiste na flexibilidade na manufatura.

De acordo com Slack (1993), as vantagens em manufatura são obtidas quando a empresa desenvolve formas de satisfazer as necessidades do seu cliente de uma forma melhor que a concorrência. Segundo o autor, a vantagem competitiva da manufatura pode ser desdobrada em cinco dimensões:

- a) Vantagem da qualidade – significa fazer certo.
- b) Vantagem de velocidade – significa fazer rápido.
- c) Vantagem da confiabilidade – significa fazer pontualmente.
- d) Vantagem na flexibilidade – significa mudar o que está sendo feito.
- e) Vantagem de custo – significa fazer mais barato.

Dentre as cinco vantagens relacionadas acima, a flexibilidade vem a ser a mais requisitada para habilitar sistemas de manufatura à customização em massa. Para que a flexibilidade promova um diferencial competitivo para a organização como um todo, deve contribuir para a redução de custos, além de gerar maior rapidez, confiabilidade e qualidade.

Segundo Bengtsson e Olhager (2002), a flexibilidade consiste em uma ferramenta de grande importância para as empresas como forma de responder as mudanças no ambiente, ciclo de vida dos produtos, a demanda por produtos customizados a custo de padronizados exigidos pelos consumidores e a globalização do mercado.

Em termos de manufatura, pode-se entender flexibilidade como a capacidade que o processo produtivo apresenta de se adaptar a diferentes entradas que poderão ocorrer no sistema, objetivando a produção de itens diferentes ou realização de diferentes tarefas.

Já para Upton (1995), a flexibilidade em uma organização pode ser interna, descrita como o que a empresa pode fazer através de seu sistema produtivo (competências), e externa, descrita como o que os consumidores vêem (capacidades). Dessa forma, sistemas flexíveis que se focam somente na criação de competências não conseguem alcançar a satisfação do consumidor. A satisfação aumenta no momento em que a empresa constrói competências que forneçam valor final aos consumidores (flexibilidade de produtos e volumes) (ZHANG; VONDEREMBSE; LIM, 2003).

A Figura 1 fornece uma visão da relação entre a competência de uma manufatura flexível, a flexibilidade de produtos, a flexibilidade de volumes e a satisfação dos consumidores. As competências de uma manufatura flexível possuem um impacto direto e positivo na flexibilidade de produtos e volumes, sendo estes elementos externos de competitividade, os quais aumentam a satisfação dos clientes.

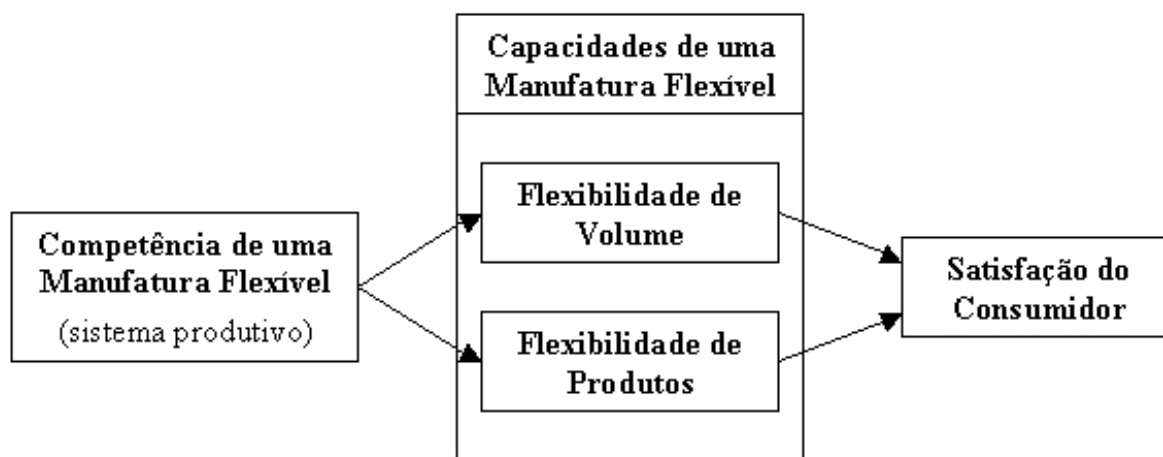


Figura 1 Impacto da competência de uma manufatura flexível na sua capacidade e satisfação do consumidor

Fonte: Zhang; Vonderembse e Lim (2003)

Analisando sob o ponto de vista estratégico, constata-se a grande importância da flexibilidade na manufatura como habilitador para que as empresas encontrem a CM. O aumento das exigências dos clientes fez com que as empresas se vissem obrigadas a produzir uma grande variedade de produtos com uma alta qualidade e a baixos custos. A flexibilidade

de produtos ajuda as organizações a fornecerem produtos que melhor atendam as necessidades dos consumidores e a flexibilidade de volume fornece às empresas a capacidade e eficiência da produção em massa.

Zhang; Vonderembse e Lim (2003) salientam que para encontrar as vantagens da CM e a satisfação dos clientes, os gerentes devem planejar e gerenciar a flexibilidade da manufatura em termos de vantagens de capacidades e competências de suporte.

Desta forma, constata-se que o futuro econômico da indústria aponta na direção de sistemas flexíveis de produção, técnicas avançadas de manufatura e habilidade intensiva para a fabricação de produtos customizados (GERWIN, 1993). A flexibilidade é um habilitador para o baixo custo de produtos customizados, a maior oferta de produtos diferenciados e a fabricação de produtos de tecnologia superior direcionados a nichos de mercado.

Neste novo cenário, o arranjo físico surge como um importante fator que pode tornar-se a diferença entre uma manufatura flexível ou não. Um *layout* apropriado é fundamental para que as organizações obtenham uma configuração flexível na manufatura, melhorando a sua *performance* no mercado.

2.2 ESTUDO DO LAYOUT

O arranjo físico de uma operação produtiva preocupa-se com a localização física dos recursos de transformação. Colocando de forma simples, definir o arranjo físico é decidir onde colocar todas as instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção. O arranjo físico é uma das características mais evidentes de uma operação produtiva, pois determina sua forma e aparência, além da maneira segundo a qual os recursos transformados – materiais, informações, clientes – fluem através da operação (SLACK *et al.*, 1996).

Todo assunto relativo à instalação de uma operação produtiva defronta-se com problemas de *layout*. Ao realizar-se uma análise dos métodos de trabalho, deve-se sempre considerar a possibilidade de aumentar o rendimento através de uma nova disposição dos recursos utilizados na produção. De acordo com Slack *et al.* (1996), mudanças relativamente pequenas na localização de uma máquina em uma fábrica ou dos bens em um supermercado

podem afetar o fluxo de materiais e pessoas através da operação, proporcionando diminuição nos custos e aumento na eficácia geral da produção.

Segundo Krajewski e Ritzman (1999), a escolha de um *layout* apropriado pode proporcionar uma melhora na comunicação e organização das empresas de manufatura, além de ir ao encontro das prioridades competitivas desejadas. Desse modo, observa-se que o desenvolvimento do *layout* de uma empresa possui implicações práticas e estratégicas, e que o seu estudo e planejamento podem gerar vantagens no que diz respeito a: (i) fluxo de materiais e informações, (ii) eficiência na utilização dos equipamentos e mão-de-obra, (iii) conveniência ao consumidor, (iv) riscos dos trabalhadores, (v) moral dos trabalhadores e (vi) comunicação.

2.2.1 *Objetivo de Estudo do Layout*

Em relação aos objetivos que se deseja alcançar através de um bom *layout* de planta, estes são enumerados por Borba (1998), como sendo:

- a) Melhorar a utilização do espaço disponível, diminuindo a quantidade de material em processo, minimizando as distâncias de movimentação de materiais e pessoas, e racionalizando a disposição das seções;
- b) Aumentar a satisfação e a moral no trabalho, ordenando e limpando os ambientes;
- c) Incrementar a produção racionalizando o fluxo;
- d) Reduzir o manuseio melhorando a movimentação no processo produtivo;
- e) Reduzir o tempo de manufatura diminuindo esperas e distâncias;
- f) Reduzir os custos indiretos diminuindo os congestionamentos, manuseio e danos materiais.

Planejar o arranjo físico de uma instalação significa tomar decisões sobre a forma como serão dispostos, nessa instalação, os centros de trabalho que nela devem permanecer. Pode-se conceituar como centro de trabalho qualquer coisa que ocupe espaço: um departamento, uma sala, uma pessoa ou grupo de pessoas, máquinas, equipamentos, bancadas e estações de trabalho. Em todo o planejamento de arranjo físico, irá existir sempre uma

preocupação básica: tornar mais fácil e contínuo o movimento do trabalho através do sistema, quer esse movimento se refira ao fluxo de pessoas ou de materiais (MOREIRA, 1996).

De acordo com Slack *et al.* (1996), há algumas razões práticas que justificam a importância do planejamento do arranjo físico na maioria dos tipos de produção:

- a) O re-arranjo físico é frequentemente uma atividade difícil e de longa duração devido às dimensões físicas dos recursos de transformação movidos;
- b) O re-arranjo físico de uma operação existente pode interromper seu funcionamento, levando à insatisfação do cliente ou a perdas na produção;
- c) Se o arranjo físico (examinado *a posteriori*) estiver errado, pode levar a padrões de fluxo excessivamente longos e confusos, estoque de materiais, filas de clientes, inconveniências para os clientes, tempos de processamento longos, operações inflexíveis, fluxos imprevisíveis e alto custo.

Existem decisões que possuem um impacto significativo na eficiência de um *layout*, pois determinam as necessidades de espaço, equipamentos e mão-de-obra para a operacionalização do sistema produtivo, assim como o grau de proximidade entre as atividades. Essas decisões devem ser tomadas em conjunto ao planejamento do *layout*, pois o afetam diretamente: (i) centralização ou descentralização dos estoques de *work-in-process*, ferramentas e fornecedores; (ii) adoção de roteiros de produção fixos ou variáveis; (iii) carga unitária planejada para o sistema; (iv) grau de automação a ser utilizado no manuseio, e (v) nível de controle do inventário, do controle físico e controle informatizado dos materiais (TOMPKINS *et al.*, 1996).

Dentre os procedimentos propostos para o planejamento do *layout* de uma empresa, um dos mais referenciados na literatura é o desenvolvido por Muther *apud* Tompkins (1996), denominado de Planejamento Sistemático do *Layout* (SLP). O SLP utiliza procedimentos, convenções e fases, auxiliando o projetista a entender o que fazer ao longo do projeto, proporcionando economia de tempo e esforço.

De acordo com Tompkins *et al.* (1996), o procedimento SLP deve ser utilizado sequencialmente, desenvolvendo inicialmente um *layout* macro, e após, utilizado para o desenvolvimento do *layout* de cada departamento envolvido.

2.2.2 Tipos Básicos de Layout

Antes de utilizar um procedimento para o planejamento do *layout* de uma empresa, deve-se primeiramente decidir o tipo de *layout* a ser utilizado. Pode-se identificar 4 tipos básicos de *layout*, os quais são dispostos em um gráfico correspondendo a diferentes níveis de volume e variedade de produtos ou serviços, conforme a Figura 2. A seguir, será feita uma breve descrição de cada um deles, os quais estão apresentados em ordem crescente de complexidade.

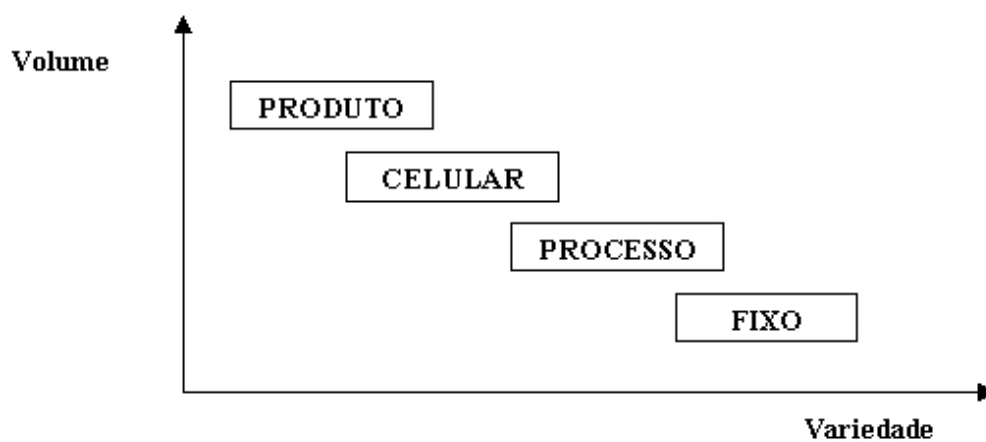


Figura 2 Tipos de *layout*: volume \times variedade
Fonte: Silveira *apud* Trein (2001)

2.2.2.1 Layout Fixo

O *layout* fixo difere-se em conceito dos demais. Nesse tipo de arranjo físico, os recursos transformados não se movem entre os recursos transformadores; o contrário ocorre. As estações de trabalho são posicionadas e seqüenciadas ao redor do material ou produto produzido, o qual possui uma posição fixa, como mostra a Figura 3.

Segundo Krajewski e Ritzman (1999), este tipo de *layout* é geralmente utilizado na montagem de aviões, navios, construção civil, geradores turbinas, ou seja, quando o produto é particularmente volumoso ou de difícil movimentação.

Como vantagens da utilização do *layout* fixo, pode-se citar (TOMPKINS *et al.*, 1996): (i) a redução na movimentação dos materiais em processo; e (ii) a alta flexibilidade, permitindo mudanças no projeto e quantidade do produto produzido.

Já como suas limitações, de acordo com Tompkins *et al.* 1996, o *layout* fixo apresenta: (i) uma grande movimentação de pessoas e equipamentos; e (ii) a necessidade de supervisão constante, tanto na produção quanto no cronograma das atividades.

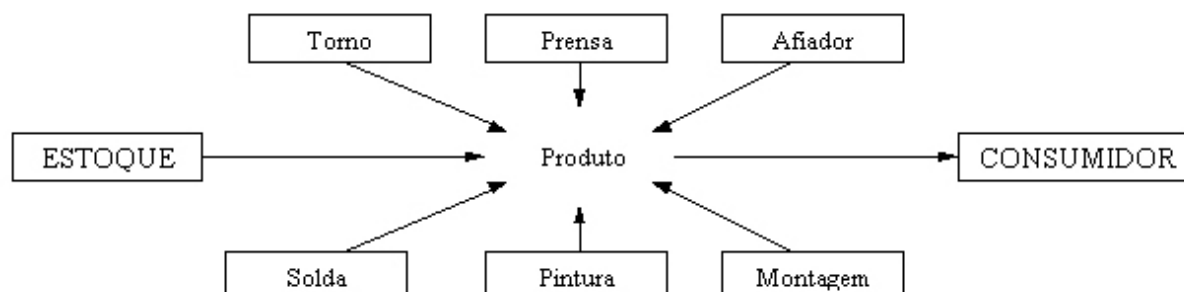


Figura 3 Exemplo de *layout* fixo
Fonte: Tompkins *et al.* (1996)

2.2.2.2 *Layout* por Processo

De acordo com Tompkins *et al.* (1996), esse tipo de *layout* é obtido através do agrupamento de processos similares em áreas específicas, formando departamentos de processos, como mostra a Figura 4. Tipicamente, esse tipo de arranjo possui um alto fluxo de informações e materiais dentro dos departamentos, e um baixo fluxo entre os departamentos.

O *layout* por processo se caracteriza por aplicar-se a sistemas produtivos com um baixo volume e uma alta variedade de produção, sendo particularmente utilizado como uma estratégia de fluxo flexível. Além disso, este *layout* é comum onde uma mesma operação deve produzir de maneira contínua diferentes produtos ou servir a diferentes clientes.

A utilização de um *layout* por processo, segundo Krajewski e Ritzman (1999), apresenta as seguintes vantagens: (i) o *layout* é menos vulnerável a mudanças no *mix* de produção ou a novas estratégias de mercado; (ii) permite uma alta utilização dos equipamentos, sendo estes utilizados para produção de diversos produtos; e (iii) permite uma supervisão da produção mais detalhista, fator importante quando a tarefa realizada requer um grande conhecimento técnico.

Como desvantagens da utilização de um *layout* por processo pode-se citar (KRAJEWSKI; RITZMAN, 1999): (i) a taxa de produção tende a ser mais baixa, e (ii) o planejamento e controle da produção são mais difíceis.

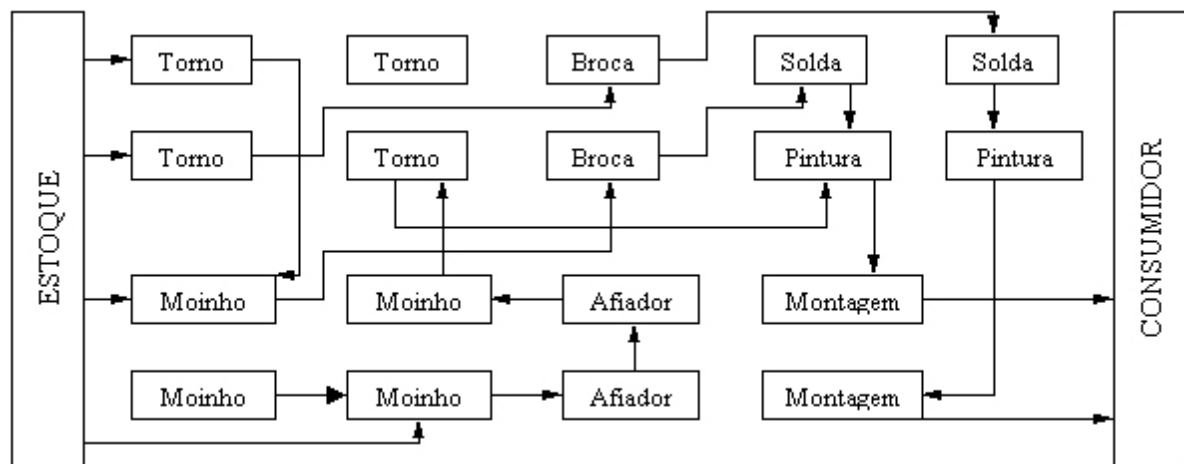


Figura 4 Exemplo de *layout* por processo
 Fonte: Tompkins *et al.* (1996)

2.2.2.3 *Layout* Celular

O arranjo físico celular é aquele em que os recursos transformados, entrando na operação, são pré-selecionados a partir de atividades comuns no processo de montagem. A partir desta classificação os recursos transformados são designados a uma parte específica da operação (ou célula), na qual se encontram todos os recursos transformadores necessários para atender suas necessidades de processamento (SLACK *et al.*, 1996).

O *layout* celular consiste no agrupamento de tarefas com o objetivo de formar famílias de produtos. Tarefas diferentes podem ser agrupadas em famílias devido a seqüências comuns de operações, materiais que as compõem, equipamentos necessários, ou similaridade de manuseio, estoque e controle. A Figura 5 apresenta um exemplo de *layout* celular.

Como vantagens de um *layout* celular, pode-se destacar (TOMPKINS *et al.*, 1996): (i) a alta utilização dos equipamentos, gerando uma baixa ociosidade, e (ii) o melhor fluxo da produção e utilização do espaço.

Dentre as limitações existentes na aplicação de um *layout* celular pode-se citar (TOMPKINS *et al.*, 1996): (i) o alto custo com treinamento da mão-de-obra, pois esta deve desempenhar todas as operações existentes na célula, e (ii) a necessidade de um bom balanceamento da célula, para que não haja ociosidade.

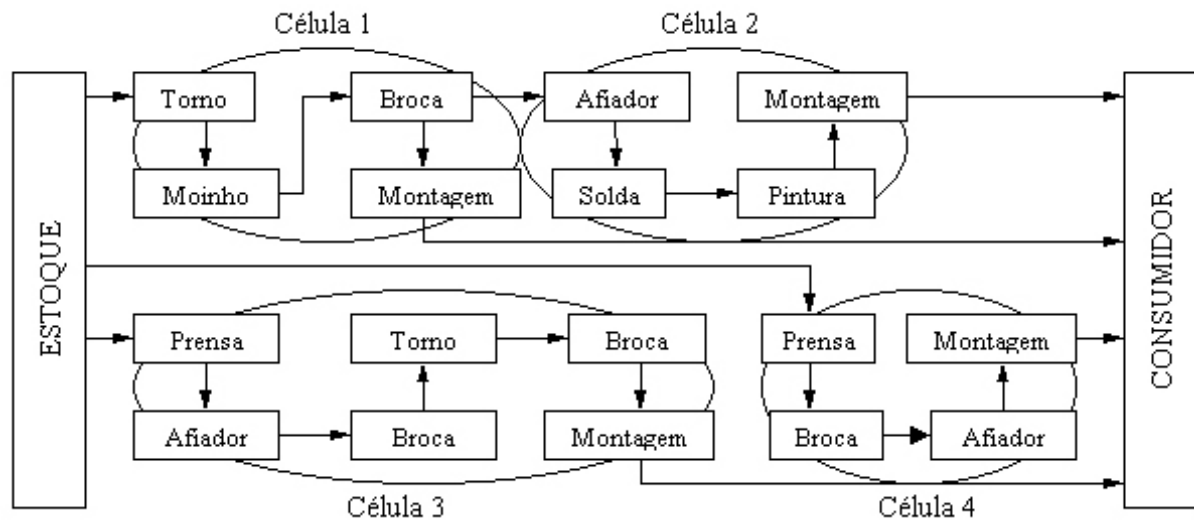


Figura 5 Exemplo de *layout* celular
Fonte: Tompkins *et al.* (1996)

2.2.2.4 *Layout* por Produto

O *layout* por produto possui a melhor configuração para a produção contínua e repetitiva, onde a estratégia da empresa está focada na produção de um único produto. Nesse tipo de arranjo físico, as estações de trabalho são seqüenciadas, de modo que os produtos são montados de acordo com a sua movimentação pelas estações, sendo cada uma delas responsável pela execução de uma parcela parcial do trabalho. Este tipo de *layout* pode ser observado na Figura 6.

Conforme Krajewski e Ritzman (1999), os materiais fluem diretamente de uma estação para a próxima adjacente, proporcionando um alto volume de produção. Os recursos necessários para montagem do produto são arranjados ao longo da linha de montagem. Embora a maioria dos *layouts* em linha esteja disposta em linha reta, são possíveis os formatos em L, O, S ou U. O *layout* por produto é comumente designado por linha de produção ou linha de montagem.

As vantagens de se utilizar um *layout* por produto, segundo Tompkins *et al.* (1996), são: (i) o planejamento e controle simplificado da produção; (ii) os baixos estoques intermediários; (iii) o tempo de produção unitária curto, e (iv) as tarefas realizadas costumam ser relativamente simples, requerendo pouco treinamento para sua execução.

Já as desvantagens apresentadas pelo *layout* por produto, de acordo com Tompkins *et al.* (1996), são: (i) as mudanças no *design* do produto produzem mudanças em toda a linha de produção; (ii) a ocorrência de gargalos na linha afeta o sistema como um todo, e (iii) a parada de uma das estações ocasiona a parada de todo o sistema.

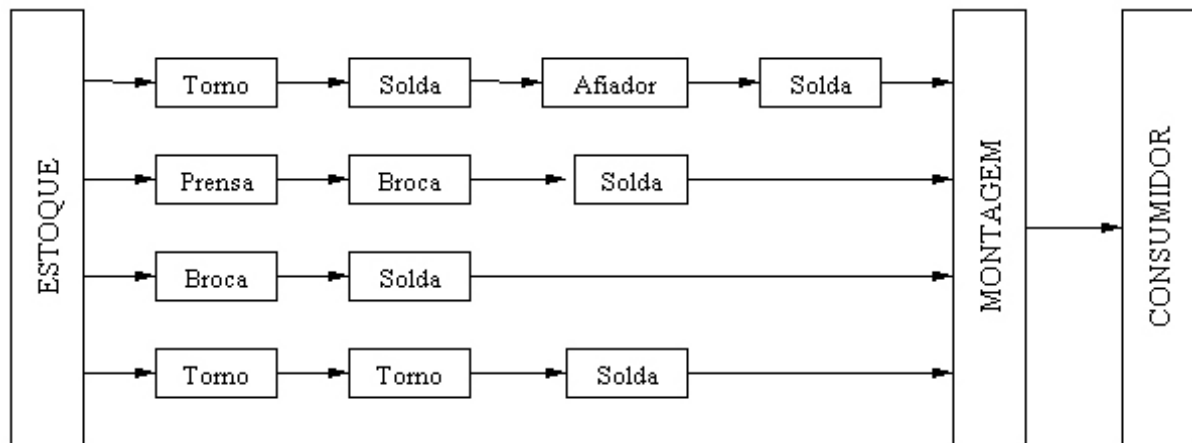


Figura 6 Exemplo de *layout* por produto
Fonte: Tompkins *et al.* (1996)

A partir da apresentação dos tipos básicos de *layout* é possível identificar o *layout* por produto como foco deste trabalho, onde será introduzida a particularidade de linhas de montagem para produção de diversos modelos, ao contrário da produção contínua e repetitiva descrita na seção 2.2.2.4. No entanto, antes de introduzir as linhas de montagem multi-modelos à revisão bibliográfica, será apresentada a seguir uma breve discussão sobre linhas de montagem para produção de modelo único.

2.3 LINHAS DE MONTAGEM UNI-MODELO

Uma linha de montagem é uma linha de produção formada por estações de trabalho sequenciadas, onde tarefas de montagem de um produto são realizadas. Os produtos são montados de acordo com a sua movimentação pela linha, sendo cada estação responsável pela execução de uma parcela do trabalho total (GOKCEN; BAYKOC, 1999; GROOVER, 2000; BUKCHIN; TZUR, 2000).

A tarefa de montagem representa o menor elemento de trabalho em relação a todo o processo de construção de um produto. As tarefas são designadas às estações de trabalho,

onde são executadas através da adição de peças ou realização de operações. As estações de trabalho são alocadas ao longo da linha de produção, podendo ser classificadas como abertas ou fechadas. Nas estações fechadas, não é permitido que o operador viole os limites da sua estação para terminar as tarefas a ela designadas. Nas estações abertas existe uma maior flexibilidade em relação aos tempos de execução das tarefas, pois o operador pode utilizar a próxima estação para terminá-las, desde que não interfira no trabalho do operador que a ocupa.

A prática mais utilizada em uma linha de montagem é a colocação de uma carcaça ou parte básica do produto, pronta para receber outros materiais à medida em que o processamento ocorre, no início da linha em intervalos regulares. Cada carcaça passa por sucessivas estações onde trabalhadores realizam operações até a construção total do produto.

Um sistema de transporte é normalmente utilizado para mover o produto ao longo da linha, à medida em que esse se transforma em produto acabado (GROOVER, 2000). Segundo Merengo; Nava e Pozzetti (1999), os sistemas de transporte utilizados nas linhas de produção podem ser separados em três categorias: transporte contínuo, onde a velocidade da linha é constante; transporte sincronizado, onde o dispositivo transportador movimenta-se em intervalos de tempo pré-determinados, e transporte não sincronizado, onde o dispositivo transportador se move de acordo com a velocidade do trabalhador para realizar determinada tarefa.

De acordo com Becker e Scholl (2003), uma das principais características de uma linha de produção diz respeito aos tempos de execução das tarefas de montagem. Quando a variação existente entre os tempos de execução de uma determinada tarefa é relativamente pequena, como em casos onde as tarefas são simples de serem realizadas ou há uma alta automação das estações de trabalho, os tempos de execução das tarefas são considerados determinísticos. Variações consideráveis nos tempos, as quais são atribuídas a instabilidade dos trabalhadores em relação à taxa de trabalho e a motivação, assim como a falta de sensibilidade para processos complexos, requer que se considere tempos estocásticos para a execução das tarefas. Além dos tempos de execução das tarefas, outras características podem ser atribuídas a uma linha de montagem:

- a) Formato da linha: tradicionalmente, uma linha de montagem é organizada como uma linha em série, sendo desta forma pouco flexível. Como forma de suprir esta

e outras desvantagens, pode-se utilizar uma linha de montagem com configuração em U. Nessa configuração o início e o fim da linha estão juntos, o que possibilita que a mesma estação de trabalho realize tanto a primeira quanto a última tarefa. Um exemplo é apresentado na Figura 7.

- b) Paralelismo: um recurso que também pode fornecer maior flexibilidade a uma linha de montagem é a introdução de algum tipo de paralelismo. A instalação de linhas paralelas, cada uma designada para um produto ou família de produtos, geralmente permite um melhor balanceamento e aumento de produtividade. Já a introdução de estações de trabalho paralelas pode reduzir o tempo de ciclo global do sistema, no caso de tarefas com tempo de execução maior de que o tempo de ciclo calculado.
- c) Linhas *two-sided*: geralmente utilizada para montagem de grandes produtos, como caminhões e ônibus. Nesse tipo de configuração são utilizados os dois lados da linha, direito e esquerdo, em paralelo, proporcionando uma diminuição no tamanho da linha, no número de equipamentos, na movimentação de materiais e de trabalhadores. Um exemplo é apresentado na Figura 8.

A montagem de um produto consiste em uma atividade de valor estratégico para a empresa, por isso a importância de utilizar e desenvolver uma linha de montagem com a máxima eficiência. As atividades de montagem realizadas pelo sistema produtivo não determinam somente a qualidade final do produto, mas também os prazos de entrega, o tempo de mercado, etc. Desse modo, a maneira como a linha de produção é projetada, controlará futuramente sua eficiência e qualidade (REKIEK *et al.*, 2002).

Dentre os aspectos operacionais que devem ser definidos *a priori* para se obter uma linha de montagem eficiente, o balanceamento é o que tem se apresentado como grande problema nas empresas de manufatura nos últimos anos. Uma linha de produção balanceada significa uma melhor utilização dos recursos produtivos e, conseqüentemente, custos de produção menores, pois o investimento em equipamentos, o fluxo de materiais, o número de trabalhadores, entre outros, com certeza estarão melhor dimensionados.

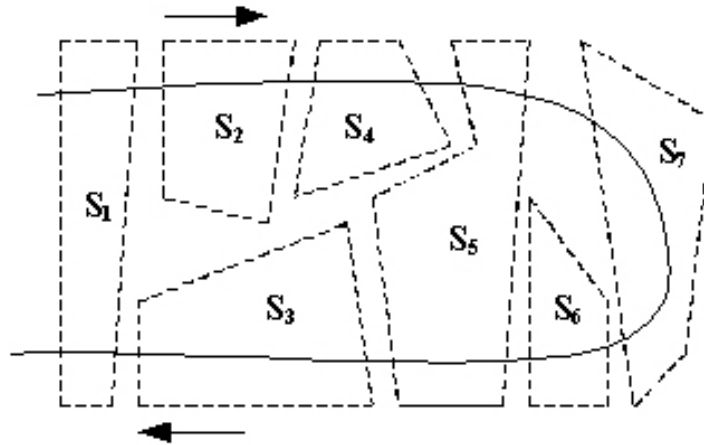


Figura 7 Linha de montagem com configuração em U
Fonte: Scholl e Klein (1999)



Figura 8 Linha de montagem *two-sided*
Fonte: Lee; Kim e Kim (2001)

O problema de balanceamento de uma linha de montagem consiste na determinação de tarefas a uma determinada seqüência de estações de trabalho, tal que relações de precedência entre tarefas sejam satisfeitas e a capacidade da linha otimizada (EREL; SARIN, 1998; GOKCEN; BAYKOC, 1999).

De acordo com Johnson (1983); Rekiek *et al.* (2002), para um determinado tempo de ciclo, o problema clássico de balanceamento de linha consiste em alocar cada tarefa a uma estação de trabalho, de modo que o tempo ocioso nas estações seja minimizado e as relações de precedência entre as tarefas sejam satisfeitas.

Para a realização do balanceamento de uma linha de montagem, deve-se primeiramente construir um diagrama das tarefas envolvidas na montagem do produto, seus tempos característicos e relações de precedência. A partir de uma demanda desejada, um tempo de ciclo é calculado. O problema principal consiste em agrupar e alocar as tarefas às estações de trabalho de modo que se preserve a precedência, isto é, nenhuma tarefa pode ser

iniciada até que suas tarefas precedentes estejam realizadas. Além disso, o tempo de processamento em cada estação não deve ultrapassar o tempo de ciclo (CHOW, 1990).

De acordo com Sprecher (1999), são considerados tradicionalmente dois tipos de problema de balanceamento em linhas de montagem. O primeiro corresponde ao Tipo 1, o qual tem como objetivo minimizar o número de estações de trabalho ao longo da linha de produção. Se a estação for ocupada por um trabalhador, o objetivo pode ser interpretado como minimizar os custos relativos à mão-de-obra. O segundo, chamado de Tipo 2, parte de um número de estações de trabalho fixo e tem como objetivo maximizar a taxa de produção, ou de forma equivalente, minimizar o tempo de ciclo.

2.3.1 Dimensionamento e Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-Modelo

São apresentadas a seguir as principais informações, formulações e restrições para resolução de problemas de balanceamento de linhas de montagem uni-modelo (EREL; SARIN, 1998).

Na formulação de um problema de balanceamento de linhas de montagem, um recurso de grande importância é o diagrama de precedência, que consiste na descrição gráfica da ordem na qual as tarefas devem ser realizadas para montagem total do produto. Um exemplo de diagrama de precedências é apresentado na Figura 9, onde os números existentes nos círculos representam as tarefas, e as flechas que unem os círculos especificam as relações de precedência.

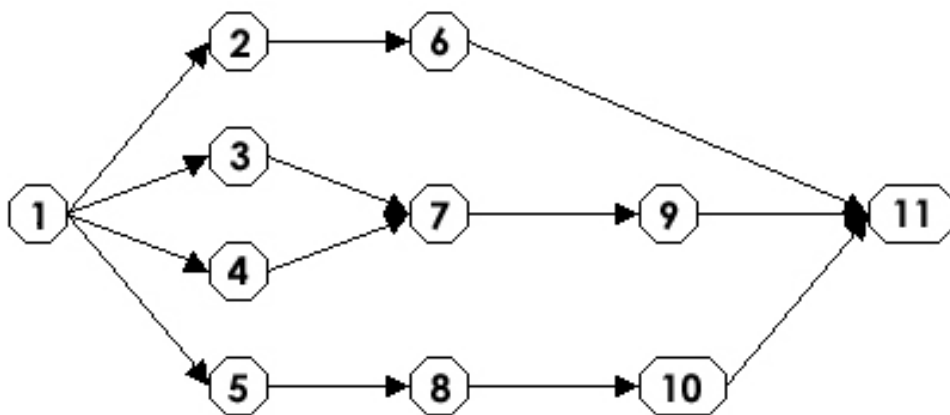


Figura 9 Exemplo de diagrama de precedência

A matriz de precedência traz uma representação alternativa das informações no diagrama de precedência. Trata-se de uma matriz triangular com valores iguais a 0 ou 1. Uma célula (i, j) da matriz representa a precedência entre as tarefas i e j na linha de produção; tal precedência é dada pelo valor a_{ij} . Quando $a_{ij} = 1$, a realização da tarefa j só pode acontecer após a realização da tarefa i . Caso a dependência não exista, $a_{ij} = 0$. A precedência sinalizada por $a_{ij} = 1$ pode ou não ser imediata. A matriz de precedência na Figura 10 corresponde ao diagrama na Figura 9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2			0	0	0	1	0	0	0	0	1
3				0	0	0	1	0	1	0	1
4					0	0	1	0	1	0	1
5						0	0	1	0	1	1
6							0	0	0	0	1
7								0	1	0	1
8									0	1	1
9										0	1
10											1
11											

Figura 10 Matriz de precedência

A partir da matriz de precedência é possível determinar a Relação de Flexibilidade (*F-ratio*) do problema, que avalia a estrutura de precedência entre as tarefas. Sendo H o número de 0 existente na matriz de precedência e N o número total de tarefas necessárias à montagem do produto, a Relação de Flexibilidade é definida da seguinte maneira:

$$F - ratio = \frac{2H}{N(N-1)}. \quad (1)$$

Quanto maior o valor obtido através da expressão, menor é o número de restrições de precedência existente entre as tarefas e maior a flexibilidade em gerar diferentes grupos de tarefas a serem alocados às estações de trabalho.

O tempo de ciclo (C) de uma linha de produção é definido como o tempo disponível para cada estação realizar a sua respectiva carga de trabalho. As seguintes definições permitem definir os limites de variação de C :

S_j - tempo total de trabalho da estação j , correspondente à soma dos tempos de realização das tarefas designadas a ela, sendo dado em unidades de tempo;

j - identifica a estação de trabalho alocada na linha de montagem, tal que $j = 1, \dots, K$;

t_i - tempo necessário para execução da i -ésima tarefa, sendo dado em unidades de tempo;

i - identifica a tarefa, tal que $i = 1, \dots, N$;

D - taxa de demanda do produto.

Os seguintes limites podem ser impostos a C :

$$\max t_i \leq \max S_j \leq C \leq \frac{1}{D}. \quad (2)$$

O tempo ocioso de uma linha de montagem corresponde à diferença entre o tempo de ciclo determinado e o tempo total de trabalho alocado em cada estação. Convencionalmente, se faz a soma dos tempos ociosos existentes em cada estação de trabalho, como forma de avaliar a eficiência da linha de montagem; esta soma é chamada de tempo ocioso total. Uma avaliação da eficiência da linha é obtida pelo cálculo do Atraso de Balanceamento, o qual fornece um percentual do tempo total em que a linha permanece ociosa. A expressão consiste na divisão do tempo ocioso total da linha pelo tempo total gasto pelo produto para atravessar a linha de montagem, do início ao fim:

$$\text{Atraso de balanceamento} = \frac{100(KC - \sum_{i=1}^N t_i)}{KC}. \quad (3)$$

De acordo com Dessouki *et al.* (1995), um balanceamento perfeito é obtido quando cada operador (estação de trabalho) da linha recebe a mesma carga de trabalho, resultando em um atraso de balanceamento igual a zero.

Outro valor relacionado à eficiência da linha de montagem é o Índice de Suavidade da linha, onde S_{max} representa o tempo total máximo de operação existente entre todas as estações de trabalho, sendo expresso da seguinte forma:

$$\text{Índice de Suavidade} = \sqrt{\sum_{j=1}^K (S_{\max} - S_j)^2}. \quad (4)$$

O valor obtido através do Índice de Suavidade fornece a variação existente entre o tempo total máximo de trabalho obtido entre as estações, e os tempos totais de trabalho do restante das estações alocadas na linha de produção. Quanto maior o índice, maior a variação dos tempos totais de operação entre as estações, evidenciando a baixa eficiência e a necessidade de um balanceamento mais eficaz.

Os objetivos mais comuns ao se balancear uma linha de produção podem ser classificados em duas categorias, sendo estas já descritas anteriormente como Tipo 1 e Tipo 2. A primeira categoria busca minimizar o tempo ocioso total, dado um determinado tempo de ciclo. A segunda categoria tem como objetivo minimizar o tempo de ciclo, dado um determinado número de estações de trabalho. No entanto, a maioria dos procedimentos desenvolvidos para o balanceamento procura minimizar o número de estações de trabalho, dado um determinado tempo de ciclo. Observa-se que este objetivo é equivalente a minimizar o tempo ocioso total, como será demonstrado a seguir. A função objetivo que minimiza o tempo ocioso total é expressa como:

$$\text{Min } z = KC - \sum_{i=1}^N t_i. \quad (5)$$

A função objetivo na expressão (5) pode ser reduzida a uma das duas alternativas apresentadas a seguir:

$$\text{Min } z = K, \text{ dado } C; \text{ ou} \quad (6)$$

$$\text{Min } z = C, \text{ dado } K \quad (7)$$

A redução é possível devido ao fato de $\sum_{i=1}^N t_i$ ter seu valor constante, ao contrário de K e C que são variáveis a serem minimizadas. Na maioria dos casos, o tempo de ciclo é pré-determinado de acordo com a taxa de produção necessária para atender a demanda, ou por um limite superior de produção imposto por exigências do equipamento. Desse modo, o problema é reduzido a encontrar o número mínimo de estações de trabalho, obedecendo às seguintes restrições: (i) todas as tarefas devem ser realizadas; (ii) o trabalho total contido em cada estação não pode exceder o tempo de ciclo determinado; (iii) as relações de precedência devem ser satisfeitas.

Apesar da facilidade em se formular o problema, a geração e agrupamento das possíveis seqüências de tarefas que minimizam o número de estações de trabalho pode não ser uma tarefa trivial. Problemas de balanceamento podem gerar um grande número de soluções possíveis. Essa complexidade, aliada a restrições que podem emergir no balanceamento, resulta em grandes dificuldades computacionais.

Diversos autores têm apresentado soluções para o balanceamento de linhas de montagem de um único modelo, adequadas à produção em alta escala. O primeiro autor a construir um modelo matemático para o problema, sugerindo um procedimento para sua solução, foi Salveson *apud* Erel e Gokcen (1999), em 1955.

A partir deste desenvolvimento seminal, diversos algoritmos e procedimentos heurísticos para o balanceamento de linhas foram desenvolvidos. Talbot e Peterson (1984) desenvolveram um modelo com o objetivo de minimizar o tempo de ciclo da linha, dado um determinado número de estações de trabalho. Klein (1963) apresentou a primeira abordagem baseada na determinação da rota mais curta para balanceamento de linhas de montagem; tal abordagem foi posteriormente aprimorada Gutjar e Nemhauser (1964). Gunther, Johnson e Peterson (1983) foram os primeiros a desenvolverem um modelo computacional para o balanceamento de linhas de montagem utilizando o método do *branch-and-bound*.

Muitos dos algoritmos desenvolvidos para resolução de problemas de balanceamento de linhas são baseados em métodos heurísticos. Isso ocorre devido à ineficiência dos métodos exatos do ponto de vista computacional, pois o tempo de processamento necessário para obtenção da solução ótima é muito alto. No entanto, muitos dos métodos heurísticos existentes possibilitam encontrar soluções próximas da ótima em tempos de processamento relativamente baixos (SMIDERLE; VITO; FRIES, 1997).

Como forma de apresentar os principais e mais recentes procedimentos desenvolvidos para o balanceamento de linhas de montagem nos últimos anos, será utilizada a classificação proposta por Ghosh e Gagnon (1989) na qual, após a divisão entre linhas de montagem uni-modelo e multi-modelos, os procedimentos são classificados de acordo com os tempos de realização das tarefas, determinísticos ou estocásticos. O último passo da classificação é feito segundo a circunstância do problema ser simples ou genérica. Os casos genéricos podem incluir fatores como paralelismo de estações de trabalho, restrições de zoneamento e o formato da linha. O esquema de classificação para linhas de montagem uni-

modelo, bem como seus respectivos procedimentos, é apresentado na Figura 11. Por não se tratar do foco deste trabalho, os procedimentos de balanceamento de linhas uni-modelo são apenas referenciados na figura, sem detalhamento suplementar.

O problema de balanceamento de linhas de montagem em sua forma determinística pode ser definido da seguinte maneira: dado um determinado número de tarefas, cada uma com seu respectivo tempo fixo de realização e um diagrama com as relações de precedência entre elas, o problema consiste em determinar as tarefas a uma determinada seqüência de estações de trabalho, de forma que as relações de precedência sejam satisfeitas e a capacidade da linha otimizada (EREL; SARIN, 1998). Essa é a forma original e mais simples do problema de balanceamento de linhas de montagem. Introduzindo outros fatores como estações de trabalho paralelas, restrições de zoneamento ou forma da linha de montagem ao problema, tem-se os casos genéricos de balanceamento de linhas de montagem.

Já o problema de balanceamento de linhas de montagem na sua forma estocástica pode ser definido da seguinte maneira: dado um número determinado de tarefas, cada uma tendo o seu respectivo tempo de realização seguindo uma distribuição de probabilidade, e um diagrama de relações de precedência, o problema consiste em determinar as tarefas a uma determinada seqüência de estações de trabalho, de forma que as relações de precedência sejam obedecidas e a capacidade da linha otimizada (EREL; SARIN, 1998). Essa versão é mais realista em linhas de montagem manuais, onde o tempo de execução das tarefas raramente é constante. Com a introdução de tempos estocásticos outros pontos se tornam relevantes ao problema, como o trabalhador exceder o tempo de ciclo determinado, a instalação de estoques intermediários e o comprimento das estações de trabalho.

A partir da discussão a respeito do balanceamento de linhas de produção para montagem de modelo único, é possível apresentar o assunto para linhas de produção focadas na montagem de diversos modelos de um mesmo produto. A seguir, são abordadas as linhas de montagem multi-modelos em relação as suas principais características e procedimentos de balanceamento.

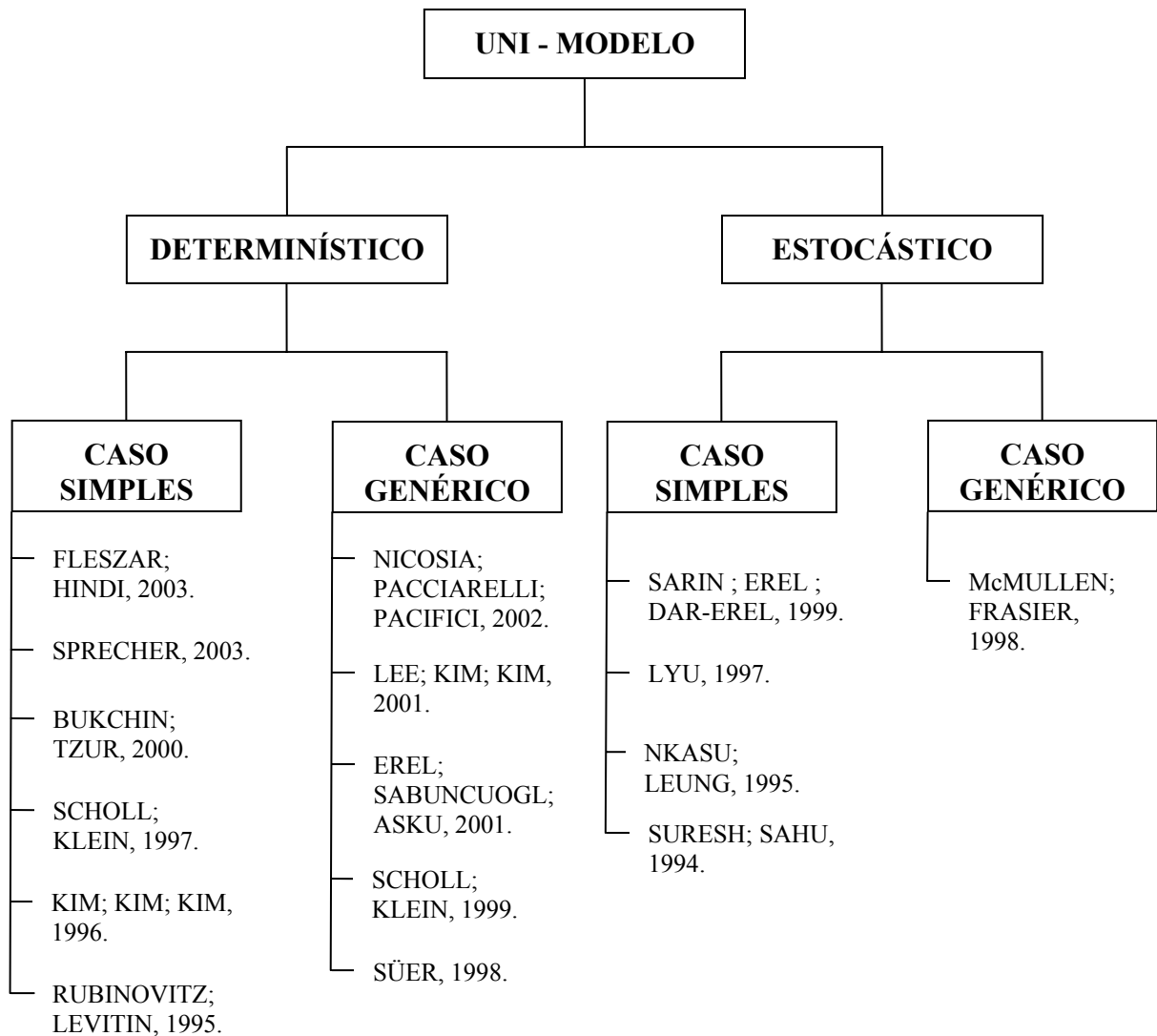


Figura 11 Classificação dos procedimentos de balanceamento para linhas uni-modelo

2.4 LINHAS DE MONTAGEM MULTI-MODELOS

Linhas de montagem organizadas com vistas à produção de um único modelo de produto, conforme proposto acima, não se adequam à atual realidade do mercado. A fim de buscar novas estratégias capazes de diferenciar seus produtos, as empresas passaram a investir em variedade de produção. A oferta de uma maior gama de opções de produto passou a ser encarada como uma característica desejada pelos clientes (DA SILVEIRA; BORESTEIN; FOGLIATTO, 2001).

Além disso, de acordo com Bukchin; Dar-El e Rubinovitz (2002), em um ambiente de mercado onde o ciclo de vida dos produtos é cada vez menor e a demanda por variedade é

grande, diversos modelos de um mesmo produto devem ser produzidos em lotes relativamente pequenos, ao alcance dos consumidores em curtos prazos de entrega. Nessa situação, a utilização de uma configuração flexível na manufatura surge como ponto chave para produção de produtos diferenciados. A flexibilidade torna-se uma característica essencial para responder aos pequenos ciclos de vida dos produtos, a pequenos a médios volumes de produção, a mudanças no padrão de demanda e a grande variedade de modelos e opções de cada produto.

Flexibilidade no *design* e na configuração do sistema produtivo assegura uma alta capacidade de utilização à planta, mesmo na presença de incertezas relativas à demanda de produtos e volumes. No entanto, a utilização desse tipo de configuração produtiva não deve aumentar de forma excessiva os custos de produção. Por esta razão é que, mesmo em alguns sistemas flexíveis, a configuração de linha continua a ser adotada, em conjunto a medidas específicas capazes de tornar esses sistemas apropriados para produção de diferentes modelos. Conseqüentemente, linhas de montagem uni-modelo estão sendo transformadas em linhas de montagem multi-modelos, onde um conjunto de modelos similares de um produto pode ser montado simultaneamente (VILARINHO; SIMARIA, 2002).

Segundo Sarker e Pan (1998), linhas multi-modelos são geralmente utilizadas para montagem de dois ou mais modelos diferentes de um mesmo produto, onde os itens de produção se alteram de modelo para modelo continuamente na linha de montagem. A quantidade de cada modelo produzido pela linha é usualmente baixa, devido ao desejo do cliente por modelos variados e sua correspondente demanda. Esse tipo de linha de montagem vem sendo utilizada em diversas áreas de manufatura; como exemplo podem ser citadas as indústrias de vestuário, automobilística e aparelhos eletrônicos.

Na maioria dos casos, cada um dos modelos produzidos pela linha requer um tempo diferente para execução de suas tarefas de montagem, fazendo com que a quantidade de trabalho designada a cada operador dependa do modelo que está sendo produzido pela linha. Dessa forma, nesse tipo de sistema produtivo pode ocorrer que o operador de uma determinada estação complete seu trabalho antes do término do tempo de ciclo, ficando ocioso até a chegada do próximo produto. Outras vezes, ele pode não conseguir completar o trabalho na estação dentro do tempo de ciclo determinado, necessitando da ajuda de outro

operador. Nos dois casos, a linha pode estar desbalanceada e a taxa de produção será baixa (SARKER; PAN, 1998; HEIKE *et al.*, 2001).

O objetivo do balanceamento de uma linha de montagem multi-modelos é o mesmo das linhas de montagem uni-modelo: distribuir a carga de trabalho entre as estações da forma mais equilibrada possível (GROOVER, 2000). Formalmente, o problema de balanceamento de uma linha de montagem multi-modelos pode ser definido da seguinte maneira: dado o número de modelos, as suas tarefas associadas, o tempo para realização de cada tarefa e suas relações de precedência, o problema consiste em determinar as tarefas a uma determinada seqüência de estações de modo que as relações de precedência sejam satisfeitas e a capacidade otimizada (EREL; GOKCEN, 1999).

De uma forma geral, pode-se observar que os problemas de balanceamento de linha de montagem uni-modelo e multi-modelos possuem diversas similaridades, tanto em relação às características atribuídas a uma linha de produção, quanto aos objetivos do problema. Dessa forma, é possível considerar as informações, formulações e restrições apresentadas anteriormente para a versão uni-modelo, em um ambiente de balanceamento multi-modelos.

De acordo com van Zante-de Fokket e de Kok (1997), a diferença básica entre um problema de balanceamento de linha de montagem uni-modelo para um multi-modelos, está nos diagramas de precedência. Em uma linha de montagem multi-modelos, todos os modelos possuem o seu próprio diagrama de precedência, e o balanceamento não deve violar as suas respectivas restrições. Em uma linha uni-modelo, no entanto, somente um diagrama de precedências é gerado, sendo mais simples de se obter o balanceamento.

2.4.1 *Formas de União dos Diagramas de Precedência*

Como forma de simplificar o problema de balanceamento de linhas multi-modelos, muitos autores ao desenvolverem metodologias as transformam em uni-modelo, através da utilização de dois métodos desenvolvidos para este fim. O primeiro método propõe combinar os diagramas de precedências dos diferentes modelos em um único, chamado de diagrama equivalente; já o segundo utiliza tempos ajustados no processamento das tarefas. Devido a sua grande utilização, os dois métodos serão brevemente apresentados a seguir.

2.4.1.1 Método do Diagrama de Precedência Equivalente

Um dos primeiros autores a estudar o balanceamento de linhas multi-modelos, Thomopoulos (1970), propôs combinar os diagramas de precedência dos diferentes modelos através da união dos nós e das relações de precedência de seus respectivos diagramas. O autor parte do pressuposto de que em uma linha de montagem multi-modelos existem diversas tarefas comuns aos vários modelos produzidos, com relações de precedência similares entre as tarefas. Desse modo, propõem a utilização das similaridades entre as relações de precedência referentes aos diferentes modelos. Deve-se observar que não é permitida a existência de conflitos nas relações de precedência entre os modelos; por exemplo, se um modelo requer a realização da tarefa A antes da B, então nenhum outro modelo deve demandar a conclusão da tarefa B antes da A.

A construção do diagrama equivalente se dá a partir de matrizes de precedência, feitas para cada modelo e combinadas posteriormente. A matriz de precedência traz uma representação alternativa das informações no diagrama de precedência, sendo a sua execução já explicada anteriormente. Um exemplo é apresentado na Figura 12, que mostra os diagramas de precedência de cada modelo e na Figura 13, a qual mostra suas respectivas matrizes de precedência. Nos diagramas, os números existentes nos círculos representam as tarefas, e as flechas que unem os círculos especificam as relações de precedência. Na montagem de uma matriz de precedência equivalente, a entrada do valor é igual a 1 se em qualquer matriz de precedência dos modelos considerados o valor de entrada para as respectivas tarefas for igual a 1. A Figura 14 e a Figura 15 ilustram o processo de construção da matriz de precedência equivalente e seu respectivo diagrama de precedências.

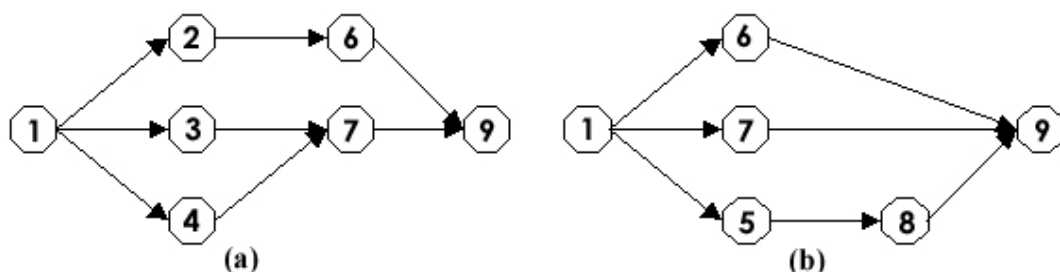


Figura 12 Diagramas de precedência para (a) modelo A e (b) modelo B

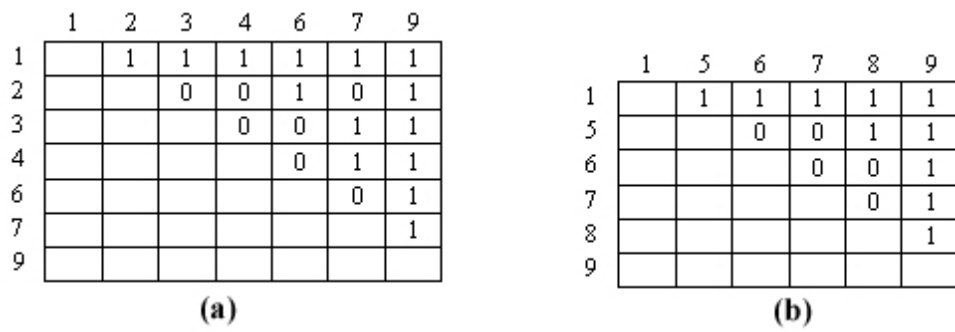


Figura 13 Matriz de precedência para (a) modelo A e (b) modelo B

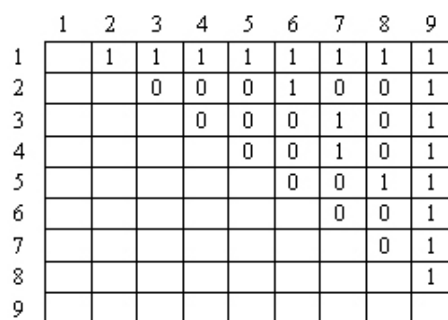


Figura 14 Matriz de precedência equivalente

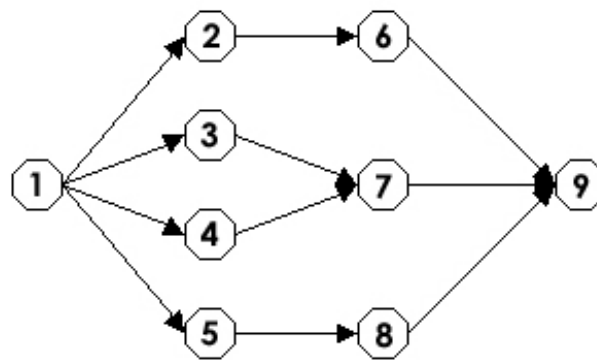


Figura 15 Diagrama de precedência equivalente

Em relação aos tempos de execução das tarefas equivalentes, estes são calculados a partir da taxa de produção de cada modelo em um determinado período de tempo T , necessária para atender a sua respectiva demanda. Desse modo, o tempo total de execução de cada tarefa (tt_i), para todos os modelos nos quais ela é necessária é dado pela expressão (8).

$$tt_i = \sum_{m=1}^M RP_m t_{i,m}, \tag{8}$$

Na expressão (8), tem-se:

RP_m – taxa de produção do modelo m necessária para atender a sua respectiva demanda em um determinado período de tempo;

$t_{i,m}$ – tempo necessário para execução da tarefa i no modelo m ;

i – identifica a tarefa, tal que $i = 1, \dots, N$;

m – identifica o modelo, tal que $m = 1, \dots, M$.

A partir da utilização do procedimento descrito acima, é possível comparar o balanceamento de uma linha de montagem multi-modelos ao balanceamento de uma linha uni-modelo. No entanto, deve-se perceber que a determinação das tarefas as estações de trabalho passa a ser feita com base no período de tempo T , e não no tempo de ciclo, que é utilizado como base para o balanceamento de linhas uni-modelo.

Segundo van Zante-de Fokket e de Kok (1997), diversas vantagens e desvantagens podem ser observadas na utilização do diagrama de precedências equivalente. Uma das principais vantagens é o fato de que cada tarefa é alocada somente a uma estação de trabalho, independente da quantidade de modelos que a necessita, o que resulta em um baixo custo com o aprendizado das tarefas por parte dos operadores.

Em relação às desvantagens pode-se citar: (i) a cada novo *mix* de modelos produzido na linha é necessário refazer o diagrama equivalente, e então balancear a linha novamente; (ii) o método proposto pode ser aplicado somente se o diagrama de precedência equivalente for acíclico e; (iii) a distribuição desigual da carga de trabalho total de cada modelo entre as estações (van ZANTE-de FOKKET; de KOK, 1997).

2.4.1.2 Método de Ajuste do Tempo de Processamento das Tarefas

O segundo método proposto para a transformação de um problema de balanceamento de linha multi-modelos para um uni-modelo, consiste na estimativa do tempo de processamento de cada uma das tarefas comuns aos diferentes modelos. O valor estimado para o tempo de processamento da tarefa i , denominado \bar{t}_i , é calculado de acordo com a expressão (9) (JOHNSON, 1983).

$$t_i = \sum_{m=1}^M p_m t_{i,m}, \quad (9)$$

Na expressão (9):

$t_{i,m}$ – tempo necessário para execução da tarefa i no modelo m , tal que $i = 1, \dots, N$;

p_m – probabilidade do modelo ser o modelo m , tal que $m = 1, \dots, M$.

De acordo com van Zante-de Fokket e de Kok (1997), uma vantagem desta técnica de transformação é de que o procedimento de balanceamento é baseado no tempo de ciclo, ao contrário do método do diagrama de precedência equivalente, onde o balanceamento se dá a partir de um determinado período de tempo T .

Entre as desvantagens da utilização desta técnica de transformação, a principal se refere ao método não levar em consideração as diferenças existentes entre os diagramas dos modelos, fazendo com que a sua utilização se restrinja a modelos derivados de um mesmo produto, onde a mudança nos diagramas de precedência se dá somente no aumento ou diminuição do tempo de processamento das tarefas do modelo básico (van ZANTE-de FOKKET; de KOK, 1997).

Adicionalmente, Becker e Scholl (2003) salientam que a utilização de qualquer um dos dois métodos pode acarretar em ineficiências no momento em que a linha é operacionalizada. Isso ocorre devido à diferença nos tempos de processamento das estações de trabalho, que variam de acordo com o modelo que está sendo produzido. Essa falha no balanceamento gera as seguintes ineficiências no desempenho de uma linha multi-modelos:

- a) Sobrecarga de trabalho: ocorre quando o operador da estação não consegue completar as tarefas determinadas antes que a peça básica do produto siga para a próxima estação (em estações de trabalho fechadas). A sobrecarga de trabalho pode ser compensada através de operadores temporários habilitados a executarem qualquer uma das tarefas envolvidas na montagem do produto, outra saída é parar a linha para que o operador termine seu trabalho. Em qualquer uma das soluções, a sobrecarga de trabalho é uma ineficiência que gera custos, e deve ser minimizada. Infelizmente, não se consegue computar *a priori* a quantidade de sobrecarga de trabalho que ocorrerá na linha, pois ela depende do modelo que

está sendo produzido. No entanto, é essencial que se gere balanceamentos onde as situações com potencial sobrecarga de trabalho sejam minimizadas.

- b) Tempo ocioso: como em linhas uni-modelo, o tempo ocioso ocorre quando o operador da estação completa suas tarefas antes do fim do tempo de ciclo e precisa esperar que a próxima peça básica chegue à estação. O tempo ocioso por ciclo é considerado constante quando somente um modelo é produzido na linha. No caso onde diversos modelos são montados, o tempo ocioso difere e depende do modelo. De forma similar à sobrecarga de trabalho, não se consegue antecipar a quantidade de tempo ocioso, mas as situações em que ele pode ocorrer devem ser minimizadas.

2.4.2 *Balanceamento Horizontal*

De forma a melhorar o desempenho na produção de multi-modelos, diversos autores passaram a se preocupar com o balanceamento horizontal da linha, o qual busca reduzir as ineficiências descritas acima. Para realização desse balanceamento são propostos na literatura funções objetivo auxiliares, utilizadas em conjunto com uma das funções objetivo principais (Tipo 1 e Tipo 2), sendo as mais referenciadas apresentadas a seguir.

Thomopoulos (1970) propôs uma função objetivo auxiliar que busca minimizar o somatório das diferenças absolutas existentes entre o tempo total de trabalho estimado nas estações para cada modelo (\bar{S}_m), e o tempo total de trabalho nas estações referente a cada modelo obtido através do balanceamento ($S_{m,j}$). A partir das seguintes definições é possível definir a função objetivo:

S_j – conjunto de tarefas alocadas a estação de trabalho j ;

$t_{i,m}$ – tempo necessário para execução tarefa i no modelo m ;

i – identifica a tarefa, tal que $i = 1, \dots, N$;

j – identifica a estação de trabalho, tal que $j = 1, \dots, K$;

m – identifica o modelo, tal que $m = 1, \dots, M$.

$$\bar{S}_m = \frac{\sum_{i=1}^N t_{i,m}}{K}, \quad (10)$$

$$S_{m,j} = \sum_{i \in S_j} t_{i,m}. \quad (11)$$

A função objetivo auxiliar proposta por Thomopoulos (1970) é expressa da seguinte forma:

$$\text{Min}\Psi_1 = \sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^M |S_{m,j} - \bar{S}_m|. \quad (12)$$

Domschke *et al.* (1996) *apud* Becker e Scholl (2003) apresentaram uma função objetivo que minimiza o somatório das violações do tempo de ciclo (C) que possam ocorrer em todas as estações para todos os modelos. A função considera somente a sobrecarga de trabalho, conforme a expressão (13):

$$\text{Min}\Psi_2 = \sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^M \max\{0, S_{m,j} - C\}. \quad (13)$$

De posse dos recursos acima citados, diversos autores vêm desenvolvendo procedimentos para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, sendo alguns apresentados a seguir.

2.4.3 *Procedimentos de Balanceamento de Linhas Multi-Modelos*

A fim de introduzir os primeiros e mais referenciados autores a discutir procedimentos para o balanceamento de linha de montagem multi-modelos, esses serão listados e terão seus trabalhos brevemente apresentados na seqüência.

Um dos primeiros autores a estudar o problema, Thomopoulos (1967; 1970) desenvolveu um trabalho de significativa importância. Em seu primeiro artigo, o autor propõe uma adaptação da heurística de balanceamento uni-modelo desenvolvida por Kilbridge e Wester (1961) para o balanceamento de linhas multi-modelos. Já em seu segundo trabalho, Thomopoulos (1970) procura facilitar o balanceamento através de uma seqüência de passos padronizados para determinação das tarefas às estações de trabalho. Para cada estação, o algoritmo gera um número finito de possíveis combinações de tarefas, respeitando as relações

de precedência e o tempo de ciclo, selecionando a combinação que gera a distribuição de trabalho mais equilibrada entre as estações. A contribuição mais importante de Thomopoulos (1970) diz respeito ao fato de que, ao se alocar tarefas às estações separadamente para cada modelo, gera-se uma quantidade de trabalho desigual ao longo da linha. A seqüência de passos padronizada é possível somente através da união dos diagramas de precedências referentes a cada modelo em um diagrama de precedência equivalente.

Após este desenvolvimento inicial, diversos procedimentos para o balanceamento de linhas multi-modelos foram desenvolvidos. Lehman (1969) apresentou uma formulação baseada em programação linear para o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, com o objetivo de minimizar o custo total associado ao atraso no balanceamento, atraso no seqüenciamento e aprendizado das tarefas. Robert e Villa (1970) *apud* Ghosh e Gagnon (1989) apresentaram uma formulação baseada em programação inteira que minimiza o excesso de trabalho existente nas estações. Os autores usaram o algoritmo da rota mais curta desenvolvido por Gutjar e Nemhauser (1964) para encontrar uma solução ótima para o problema. Macaskill (1972) propôs uma implementação computacional para determinar tarefas à estações de trabalho, utilizando o algoritmo proposto por Helgeson e Birnie (1961) para linhas uni-modelo. O autor utilizou o diagrama de precedência equivalente como forma de transformar o ambiente multi-modelos em um uni-modelo.

Ao longo dos últimos anos, procedimentos vêm sendo propostos para resolver o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos. A maioria dos algoritmos exatos busca uma solução ótima baseado em programação dinâmica ou no método *branch-and-bound*, porém esses algoritmos têm-se mostrado extremamente ineficientes do ponto de vista computacional, devido ao tempo de processamento necessário para a obtenção de uma solução (SMIDERLE; VITO; FRIES, 1997).

Deste modo, tem-se adotado procedimentos heurísticos que, apesar de não proporcionarem uma solução matematicamente ótima, possibilitam que se encontre uma solução próxima da ideal em um tempo de processamento relativamente baixo. Mais recentemente, tem-se obtido bons resultados através da utilização de algoritmos genéticos.

Como forma de apresentar os principais e mais recentes procedimentos desenvolvidos para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, será utilizada a classificação proposta por Ghosh e Gagnon (1989), já utilizada anteriormente para a

classificação dos procedimentos desenvolvidos para linhas uni-modelo. A introdução do conceito de uma linha de montagem que produz múltiplos modelos de um produto, sendo estes modelos lançados na linha a qualquer momento, introduz vários fatores que não estão presentes no caso uni-modelo, como: (i) seqüenciamento dos modelos a serem lançados na linha, e (ii) taxa de lançamento modelo. O esquema de classificação para linhas de montagem multi-modelos, bem como seus respectivos procedimentos, é apresentado na Figura 16.

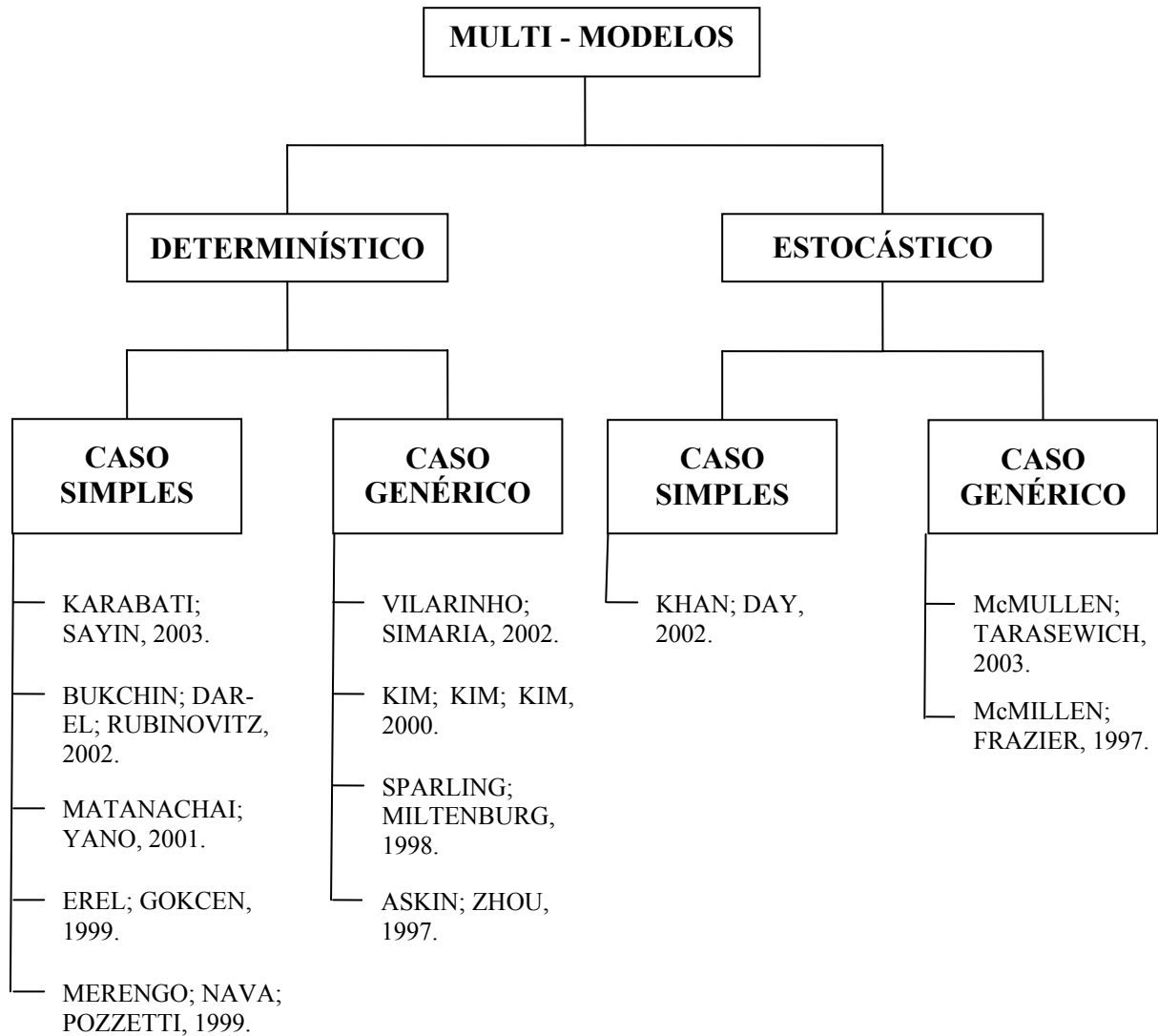


Figura 16 Classificação dos procedimentos de balanceamento para linhas multi-modelos

2.4.3.1 Procedimentos com Tempo determinístico – Caso simples

Esta classificação identifica os procedimentos de balanceamento de linhas multi-modelos específicos para situações onde os tempos de execução das tarefas de montagem de

um produto são considerados constantes, ou seja, não variam de forma considerável a cada realização da tarefa. Isso ocorre em casos onde as tarefas são simples de serem realizadas, ou há uma alta automação das estações de trabalho. Aliado ao tempo determinístico para execução das tarefas, os procedimentos apresentados nessa seção são específicos para linhas simples, não admitindo fatores como paralelismo ou formato diferente para a linha de produção.

Os procedimentos classificados nesta seção, conforme a Figura 16, são brevemente apresentados na seqüência.

- a) A solução para o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos apresentada por Karabati e Sayin (2003) se aplica especificamente a ambientes onde o transporte de materiais pela linha é feito de forma sincronizada, isto é, onde o dispositivo transportador movimenta-se periodicamente de acordo com uma quantidade de tempo pré-determinada. Em conjunto com o problema de balanceamento, os autores consideram a seqüência na qual os diferentes modelos são introduzidos na linha, integrando a determinação das tarefas às estações de trabalho às decisões de seqüenciamento dos modelos. A formulação matemática desenvolvida pelos autores tem como objetivo minimizar o tempo total de ciclo, dada uma seqüência de modelos inicial, sendo operacionalizada pela combinação dos vários modelos em um único através do método de ajuste dos tempos de processamento das tarefas.
- b) O problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos em um ambiente *make-to-order* foi introduzido por Bukchin; Dar-El e Rubinovitz (2002). Os autores admitem que, nesse ambiente, os trabalhadores devem ser mais versáteis do que os trabalhadores das linhas tradicionais, o que possibilita determinar o mesmo elemento de trabalho para diferentes estações. Considerando esse fato, as tarefas de montagem são divididas em dois conjuntos: o primeiro contém as tarefas que devem ser determinadas a uma estação específica, independente do modelo o qual a necessita; o segundo é formado pelas tarefas que podem ser determinadas a qualquer estação. Conseqüentemente, a heurística desenvolvida pelos autores, com o objetivo de minimizar o número de estações de trabalho ao longo da linha, tem o seu procedimento desenvolvido em três estágios. No primeiro, a partir da união dos

diagramas de precedência dos diferentes modelos em um diagrama equivalente, é determinado o primeiro conjunto de tarefas as estações. Após, o balanceamento de cada modelo é feito separadamente, designando as tarefas do segundo conjunto às estações, considerando as tarefas já alocadas. No último estágio, a solução é melhorada através de um estudo dos vizinhos, realizando mudanças na locação das tarefas do primeiro conjunto.

- c) O algoritmo utilizado por Matanachai e Yano (2001) tem como foco principal os seguintes objetivos: (i) que o balanceamento da carga de trabalho entre as estações seja razoável, e (ii) que seja relativamente fácil construir seqüências diárias de modelos que forneçam uma carga de trabalho estável na linha de montagem. A solução é obtida através da construção de diferentes conjuntos de tarefas para cada estação de trabalho; a estação que apresentar o conjunto de tarefas que gere o melhor valor na função objetivo é utilizada como base para gerar os conjuntos das estações subseqüentes. Depois que a solução inicial é encontrada, implementa-se um processo para melhoria do resultado através da transferência de tarefas de estação a estação, a fim de melhorar o valor da função objetivo. Os autores consideram estações fechadas, um sistema de transporte sincronizado e uma combinação dos diagramas de procedências dos diferentes modelos.
- d) O trabalho desenvolvido por Erel e Gokcen (1999) apresenta a determinação da rota mais curta a fim de encontrar a solução ótima para o problema de balanceamento de linhas multi-modelos. O modelo assume que existem tarefas comuns entre os modelos, no entanto, como os tempos de realização das tarefas podem variar de acordo com o modelo, elas devem ser alocadas na mesma estação de trabalho. A versão para o problema de linhas multi-modelos é transformada em uma versão de problema de linha com um único produto a partir da união dos diagramas de precedência. A formulação é baseada no algoritmo de Gutjahr e Nemhauser (1964), desenvolvido para solucionar balanceamentos de linhas de modelo único.
- e) A metodologia proposta por Merengo, Nava e Pozzetti (1999) pode ser aplicada a linhas de montagem que utilizem como sistema de transporte de materiais umas das três alternativas: transporte contínuo, onde a velocidade da linha é

constante; transporte sincronizado, onde o dispositivo transportador movimentase periodicamente, e transporte não sincronizado, onde o dispositivo transportador se move de acordo com a velocidade do trabalhador para realizar determinada tarefa. O algoritmo apresentado pelos autores possui os seguintes objetivos: minimizar a taxa de trabalhos incompletos (linhas com transporte contínuo ou sincronizado), minimizar a probabilidade de eventos de obstrução da linha (linhas com transporte não sincronizado), além de diminuir o número de estações ao longo da linha. A operacionalização do algoritmo exige a união dos diagramas de precedência dos diferentes modelos em um diagrama equivalente.

2.4.3.2 Procedimentos com Tempo determinístico – Caso genérico

Esta classificação identifica os procedimentos de balanceamento de linhas multi-modelos específicos para situações onde os tempos de execução das tarefas de montagem de um produto são considerados constantes, ou seja, não variam de forma considerável a cada realização da tarefa. Aliado ao tempo determinístico para execução das tarefas, os procedimentos apresentados nesta seção podem incluir fatores como paralelismo de estações de trabalho, restrições de zoneamento e diferentes formatos de linha, incluindo o tradicional.

Os procedimentos classificados nesta seção, conforme a Figura 16, são brevemente apresentados na seqüência.

- a) Vilarinho e Simaria (2002) apresentam um modelo de programação matemática para o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, o qual admite estações de trabalho paralelas e restrições de zoneamento. O modelo permite que se defina *a priori* o número máximo de réplicas das estações de trabalho, além das condições para que esta réplica ocorra. O algoritmo apresenta dois objetivos específicos: minimizar o número de estações de trabalho ao longo da linha e dividir a carga de trabalho entre as estações da melhor forma possível. Devido à natureza combinatória do problema, um procedimento em dois passos é desenvolvido, sendo o primeiro passo responsável pela solução do primeiro objetivo, e o segundo passo, pela solução do segundo objetivo. O modelo é operacionalizado pela união dos diagramas de precedência dos diferentes modelos.

- b) O algoritmo apresentado por Kim; Kim e Kim (2000) procura unir o balanceamento ao seqüenciamento dos modelos a serem lançados na linha. A metodologia é aplicada a linhas de montagem que possuam o formato em U. O algoritmo utilizado pelos autores consiste em uma técnica de procura que simula o processo evolutivo da natureza, onde as espécies possuem influência umas sobre as outras na interação e adaptação com o meio-ambiente. Os autores consideram que esse processo é similar a situações onde diversos problemas estão relacionados entre si, de tal forma que uma pequena mudança na solução de um problema isolado possa vir a afetar a solução dos outros problemas envolvidos.
- c) O problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos que possuem o formato em U é abordado por Sparling e Miltenburg (1998). O objetivo proposto consiste em alocar as tarefas necessárias à produção de todos os modelos a um número mínimo de estações de trabalho. Para isso, os autores apresentam um algoritmo de quatro passos, baseado no algoritmo desenvolvido por Thomopoulos (1970) para o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos. Os primeiros dois passos transformam o problema multi-modelos em um problema uni-modelo equivalente. O terceiro passo encontra a solução ótima para este problema utilizando um algoritmo de *branch-and-bound*. O quarto passo ajusta o balanceamento obtido para o problema original multi-modelos.
- d) Askin e Zhou (1997) propõem um programa inteiro não linear para modelar o problema de balanceamento de linhas multi-modelos quando estações de trabalho paralelas são admitidas. A função objetivo desenvolvida busca eliminar o tempo ocioso nas estações de trabalho a partir da duplicação dos equipamentos necessários a execução das tarefas. Observa-se que a decisão de duplicar uma estação é feita não somente baseada no tempo de execução das tarefas alocadas à estação, mas também comparando o custo relativo à compra dos equipamentos necessários com o custo de se deixar uma estação ociosa durante alguns períodos de tempo. Uma heurística é desenvolvida para criar as estações paralelas e determinar as tarefas, sendo operacionalizada pela união dos diagramas de precedência.

2.4.3.3 Procedimentos com Tempo estocástico – Caso simples

Esta classificação identifica os procedimentos de balanceamento de linhas multi-modelos específicos para situações onde existem variações consideráveis nos tempos de execução das tarefas, as quais são atribuídas à instabilidade dos trabalhadores em relação à taxa de trabalho e à motivação, assim como a falta de sensibilidade para processos complexos. Nessa situação, assume-se que os tempos para realização das tarefas seguem uma distribuição de probabilidade, no entanto, todos os fatores pertinentes ao problema de balanceamento na sua forma determinística também são pertinentes ao problema na sua forma estocástica. Aliado ao tempo estocástico para execução das tarefas, os procedimentos apresentados nesta seção são específicos para linhas simples, não admitindo fatores como paralelismo ou formato diferente para a linha de produção.

O procedimento classificado nesta seção, conforme a Figura 16, é brevemente apresentado na seqüência.

Khan e Day (2002) introduzem uma metodologia baseada no conhecimento obtido, chamada de *Knowledge Based Design Methodology* (KBDM), para o balanceamento de linhas. A metodologia pode ser utilizada tanto para linhas manuais, onde os trabalhadores executam as tarefas de montagem, quanto para linhas automáticas, onde são as máquinas que realizam as tarefas. O primeiro passo do algoritmo consiste na seleção do sistema de montagem a ser utilizado, para, a partir disso, determinar tempos de ciclo e a necessidade ou não de estações paralelas. O objetivo é determinar um número econômico de estações de trabalho, além de um *design* detalhado da linha de montagem. A metodologia é puramente baseada em uma avaliação inicial, a qual fornece os dados necessários para o *design* apropriado da linha de montagem.

2.4.3.4 Procedimentos com Tempo estocástico – Caso genérico

Esta classificação identifica os procedimentos de balanceamento de linhas multi-modelos específicos para situações onde existem variações consideráveis nos tempos de execução das tarefas, assumindo que os tempos para realização das tarefas seguem uma distribuição de probabilidade. Aliado ao tempo estocástico para execução das tarefas, os procedimentos apresentados nesta seção podem incluir fatores como paralelismo de estações de trabalho, restrições de zoneamento e diferentes formatos de linha, incluindo o tradicional.

Os procedimentos classificados nesta seção, conforme a Figura 16, são brevemente apresentados na seqüência.

- a) O balanceamento de linhas multi-modelos com tempos de duração das tarefas estocásticos e com a possibilidade de utilizar estações de trabalho paralelas foi introduzido por McMullen e Frazier (1997). A técnica apresentada pelos autores é uma adaptação da heurística desenvolvida por Gaither (1996), a qual utilizava tempos determinísticos e linhas uni-modelo. O objetivo dos autores consiste em minimizar o número de estações de trabalho dado um determinado tempo de ciclo para linhas com altas taxas de produção. A operacionalização do algoritmo consiste em primeiramente reduzir o problema multi-modelos a um uni-modelo; então são examinados os efeitos de se determinar tarefas a cada estação de acordo com regras de seleção de tarefas pré-estabelecidas.
- b) O algoritmo desenvolvido por McMullen e Tarasewich (2003) utiliza a técnica da formiga a fim de tratar o problema de balanceamento de linhas de montagem com fatores como estações de trabalho paralelas, atividades com duração estocástica e modelos mistos. Os autores apresentam uma heurística que utiliza conceitos da técnica Ant Colony Optimization (ACO), ou seja, a Otimização da Colônia de Formigas, a qual utiliza formigas artificiais para resolver problemas de otimização combinatória. A metodologia é inspirada no comportamento social dos insetos como forma de alocar tarefas às estações de trabalho de forma a otimizar o desempenho da linha.

Devido à quantidade de procedimentos classificados, torna-se difícil descrever a metodologia operacional de todos. Dessa forma são escolhidos dois procedimentos, os quais terão detalhadas suas metodologias de solução para o problema de balanceamento de linhas multi-modelos. Para escolha dos procedimentos utilizou-se como critério primeiramente, este apresentar a classificação genérica, a qual não restringe a metodologia de solução a uma única configuração específica, e o ano em que o procedimento foi desenvolvido, dando preferência aos mais recentes. Em conjunto, optou-se que um dos procedimentos deve trabalhar com tempos determinísticos para as tarefas de montagem, e o outro com tempos estocásticos.

2.4.4 *Detalhamento dos Procedimentos*

2.4.4.1 Procedimento de Vilarinho e Simaria (2002)

O trabalho desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002) introduz um modelo de programação matemática para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos onde são permitidas estações de trabalho paralelas e restrições de zoneamento. O modelo introduz dois objetivos: o primeiro consiste em minimizar o número de estações de trabalho para um determinado tempo de ciclo; o segundo busca balancear a carga de trabalho entre as estações (isto é, para cada modelo do produto, o tempo ocioso é distribuído entre as estações da forma mais equilibrada possível) e no interior das estações (isto é, o tempo ocioso total de cada estação é distribuído entre os modelos do produto da forma mais equilibrada possível), assegurando com isso que todos os trabalhadores da linha executem aproximadamente a mesma quantidade de trabalho em cada modelo, ao mesmo tempo em que a mesma quantidade de trabalho é executada em cada estação independente do modelo que está sendo produzido.

O procedimento para o balanceamento de linhas multi-modelos desenvolvido pelos autores considera as seguintes características:

- a) o objetivo principal é minimizar o número de estações de trabalho para um dado tempo de ciclo;
- b) os objetivos adicionais, balancear a carga de trabalho entre e no interior das estações, também são enfrentados;
- c) pode-se definir um valor máximo para o número de réplicas de estações de trabalho;
- d) restrições de zoneamento são consideradas; e
- e) pode-se definir o tempo mínimo para realização de uma tarefa, expresso como uma porcentagem do tempo de ciclo (C), que ativa a duplicação da estação que executa esta tarefa (este tempo é chamado de *minimum replication time* – MRT). Por *default*, este valor é 100% de C , o que significa que somente estações que executam tarefas as quais possuem duração maior do que o tempo de ciclo, para pelo menos um dos modelos, podem ser duplicadas.

O modelo de programação matemática proposto pelos autores para o balanceamento de linhas multi-modelos com estações de trabalho paralelas e restrições de zoneamento leva em consideração os seguintes fatores:

- a) o horizonte de planejamento possui uma duração fixa, P ;
- b) um conjunto de modelos similares $m = 1, \dots, M$ pode ser montado simultaneamente;
- c) a previsão de demanda durante o horizonte de planejamento para o modelo m é D_m , gerando um tempo de ciclo definido pela expressão (14).

$$C = P \left/ \sum_{m=1}^M D_m \right.; \quad (14)$$

- d) a proporção total do número de unidades do modelo m que estão sendo produzidos é determinada pela expressão (15).

$$q_m = D_m \left/ \sum_{p=1}^M D_p \right.; \quad (15)$$

- e) cada modelo possui suas próprias relações de precedência, mas existe um subconjunto de tarefas comuns a todos os modelos. Desse modo, os diagramas de precedência de todos os modelos podem ser combinados, resultando em um diagrama de precedência equivalente com N tarefas;
- f) as tarefas $i = 1, \dots, N$ são realizadas em estações de trabalho $j = 1, \dots, K$;
- g) o tempo necessário para executar a tarefa i no modelo m , t_{im} , pode variar entre os modelos (quando $t_{im} = 0$, o modelo m não necessita da tarefa i para ser produzido);
- h) cada tarefa pode ser alocada somente a uma estação de trabalho; então, as tarefas comuns aos diferentes modelos são executadas na mesma estação;
- i) o conjunto de tarefas que não podem ser realizadas antes que a tarefa i esteja executada, F_i (sucessoras da tarefa i), são dadas pelas restrições de precedência, derivadas do diagrama de precedência equivalente;
- j) as restrições de zoneamento são definidas pelo processo de montagem – ZP é o conjunto de pares de tarefas que devem ser executadas na mesma estação (tarefas compatíveis), e ZN é o conjunto de pares de tarefas que não podem ser executadas na mesma estação (tarefas incompatíveis);

- k) uma estação de trabalho pode ser duplicada até um máximo de $MAXP$ réplicas, mas somente se o tempo de execução de uma das tarefas alocadas a ela exceder um valor pré-determinado (α % do tempo de ciclo) para pelo menos um dos modelos.

As variáveis de decisão são definidas da seguinte maneira: $x_{ji} = 1$, se a tarefa i é determinada para a estação j ; 0 caso contrário; e $r_j = 1$, se a estação de trabalho j pode ser duplicada; 0 caso contrário. Da mesma forma, S_{jm} é igual ao tempo ocioso na estação j referente ao modelo m .

Desta forma, o problema de balanceamento de linhas multi-modelos com estações de trabalho paralelas e restrições de zoneamento que, para um dado tempo de ciclo, minimiza o número de estações e faz o balanceamento da carga de trabalho, pode ser expresso como o modelo de programação matemática apresentado na expressão (16).

$$MinZ = \sum_{j=1}^K j \cdot x_{Nj} + \frac{K'}{K'-1} \sum_{m=1}^M q_m \sum_{j=1}^{K'} \left(\frac{S_{jm}}{\sum_{j=1}^{K'} S_{jm}} - \frac{1}{K'} \right)^2 + \frac{M}{K'(M-1)} \sum_{j=1}^{K'} \sum_{m=1}^M \left(\frac{q_m S_{jm}}{S_k} - \frac{1}{M} \right)^2. \quad (16)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^K x_{ij} = 1; \quad i = 1, \dots, N. \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^K x_{aj} - \sum_{j=1}^K x_{bj} \leq 0; \quad a \in N; b \in F_a. \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^K x_{aj} - \sum_{j=1}^K x_{bj} = 0; \quad (a, b) \in ZP. \quad (19)$$

$$x_{aj} + x_{bj} \leq 1; \quad (a, b) \in ZN; j = 1, \dots, K. \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{im} \cdot x_{ij} + S_{jm} = C [1 + r_j (MAXP - 1)]; \quad j = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M. \quad (21)$$

$$r_j \leq \sum_{i: \exists t_{im} > \alpha C; m=1, \dots, M} x_{ij}; \quad j = 1, \dots, K; 0 \leq \alpha \leq 100\%. \quad (22)$$

$$M \cdot r_j \geq \sum_{i: \exists t_{im} > \alpha C; m=1, \dots, M} x_{ij}; \quad j = 1, \dots, K; 0 \leq \alpha \leq 100\%. \quad (23)$$

$$S_{jm} \geq 0; \quad j = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M. \quad (24)$$

$$x_{ij} \in [0,1]; \quad j = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N. \quad (25)$$

$$r_j \in [0,1]; \quad j = 1, \dots, K. \quad (26)$$

O primeiro termo da função objetivo busca minimizar o índice da estação de trabalho na qual a última tarefa é determinada, minimizando o número total de estações. O segundo termo faz o balanceamento da carga de trabalho entre as estações (nesse termo, K' é o número atual de estações necessárias para atender a demanda na linha de montagem; $K' = j$ se $x_{Nj} = 1$). O terceiro termo da função objetivo faz o balanceamento da carga de trabalho dentro de cada estação (neste termo, $S_k = \sum_{m=1}^M q_m \cdot S_{jm}$). Pode-se observar que tanto o segundo quanto o terceiro termo da função objetivo não são calculados para $K' \leq 1$, devido à inexistência de estações para se fazer o balanceamento da carga de trabalho. Para situações onde $K' > 2$, o que geralmente ocorre em aplicações reais, o primeiro termo da função objetivo é dominante sobre os demais. Dessa forma, o modelo minimiza o número de estações antes de ativar o balanceamento da carga de trabalho.

As restrições do modelo podem ser interpretadas da seguinte maneira. A restrição na expressão (17) assegura que cada tarefa seja determinada a somente uma estação de trabalho. A restrição na expressão (18) assegura que nenhuma sucessora de uma determinada tarefa seja determinada a uma estação antecessora a da tarefa. A expressão (19) define um conjunto de restrições de zoneamento compatíveis; já a expressão (20) define um conjunto de restrições de zoneamento incompatíveis. O conjunto de restrições nas expressões (21), (22) e (23) assegura que (a) a capacidade de tempo de processamento de cada estação não é excedida, (b) o número máximo de réplicas das estações não é excedido e (c) somente estações onde o tempo de processamento das tarefas determinadas a ela, para pelo menos um modelo, excede uma certa proporção do tempo de ciclo pode ser duplicada (M é um inteiro positivo muito grande). Por fim, o conjunto de restrições nas expressões (24), (25) e (26) define os domínios das variáveis de decisão.

Devido à complexidade do modelo proposto, os autores sugerem um procedimento em dois passos para encontrar a solução do problema. Os dois passos do procedimento são apresentados na Figura 17. No primeiro passo o procedimento busca por uma solução sub-

ótima para o objetivo principal do problema. No segundo passo, os objetivos adicionais são cumpridos. A descrição dos dois passos é apresentada a seguir.

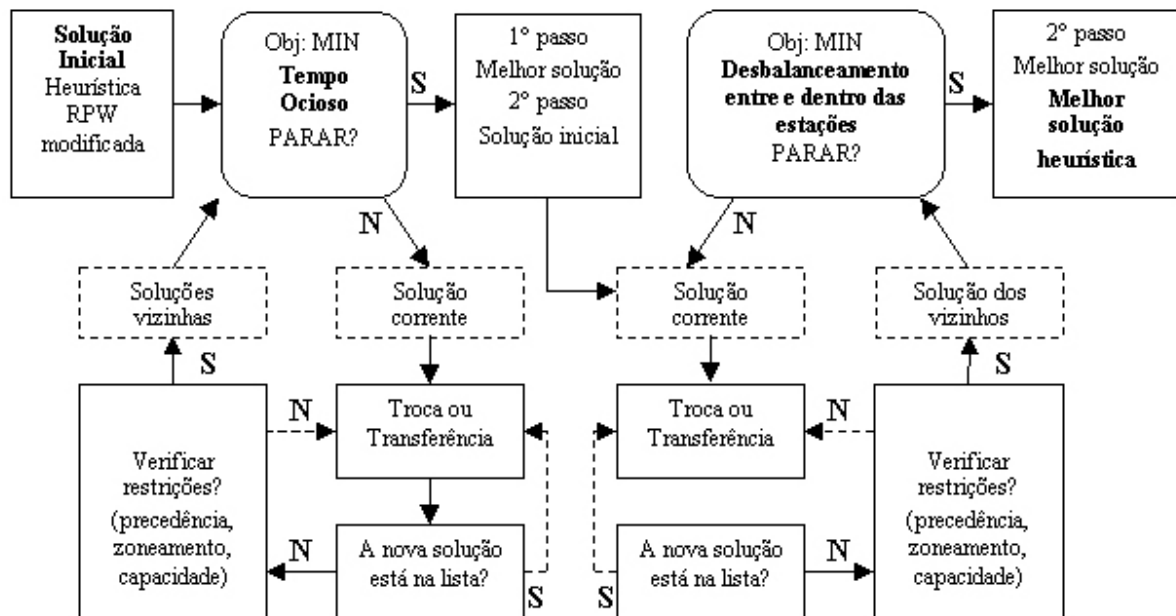


Figura 17 Procedimento em dois passos para o balanceamento de linhas multi-modelos
Fonte: Vilarinho e Simaria (2002)

Primeiro Passo

Solução Inicial: A solução inicial é obtida através da heurística *Rank Positional Weight* (RPW), proposta por Helgeson e Birnie em 1961. Na versão original, somente problemas de balanceamento de linhas uni-modelo sem estações de trabalho paralelas são resolvidos. O peso de uma tarefa no ambiente de linhas multi-modelos consiste na soma dos tempos equivalentes de processamento da própria tarefa e de suas sucessoras. O tempo equivalente de processamento da tarefa é determinado pelo somatório dos tempos de execução da tarefa para cada modelo, multiplicado pela respectiva proporção de demanda do modelo. As tarefas são determinadas às estações de trabalho por ordem decrescente do seu peso, considerando seus tempos de processamento individuais para cada modelo.

Na versão original da heurística RPW, a soma dos tempos de processamento das tarefas alocadas as estações não podem exceder o tempo de ciclo; dessa forma, não são permitidas estações de trabalho paralelas. A versão da heurística RPW utilizada para obter a solução inicial redefine esse conceito: se uma estação de trabalho possui uma tarefa com um

tempo de processamento maior do que MRT, para pelo menos um modelo, sua capacidade de tempo é $C \times MAXP$, ao contrário de C .

A versão implementada da heurística RPW também checa se a tarefa a ser determinada é incompatível com qualquer uma das tarefas já alocadas a estação de trabalho. Além disso, une tarefas que precisam ser processadas na mesma estação, tratando-as como uma só tarefa.

Critério de avaliação da solução: No primeiro passo, o procedimento busca por uma solução que minimize o número de estações de trabalho na linha de montagem. Como o tempo ocioso total da linha diminui em conjunto com o número global de estação de trabalho, pode-se atingir o objetivo do primeiro passo minimizando o atraso de balanceamento, o qual é definido pela expressão (27).

$$BDT = \sum_{m=1}^M \sum_{j=i}^K q_m \cdot \left(SP_j \cdot C - \sum_{i \in O_j} t_{im} \right), \quad (27)$$

Na expressão (27), SP_j representa o número de réplicas da estação j e O_j , o conjunto de tarefas determinadas a estação j . Esse objetivo é equivalente ao expresso no primeiro termo da função objetivo do modelo de programação matemática apresentada pelos autores.

Soluções Vizinhas: As soluções vizinhas podem ser geradas através das seguintes ações: (i) troca de duas tarefas alocadas em estações diferentes ou (ii) transferência de uma tarefa para outra estação. As tarefas a serem trocadas, bem como a tarefa e a estação para a transferência, são escolhidas ao acaso. Para que qualquer uma dessas ações resulte em uma solução vizinha, as restrições de precedência, zoneamento e capacidade da estação devem ser satisfeitas.

Somente movimentos de transferência podem contribuir na redução do número de estações de trabalho e, da mesma forma, minimizar o atraso de balanceamento. Entretanto, procedimentos de troca são necessários para que se gere movimentos de transferência eficazes.

Segundo passo

Neste passo do procedimento, o objetivo é balancear simultaneamente a carga de trabalho entre e no interior das estações, de acordo com o resultado obtido anteriormente. A

solução inicial para o segundo passo é igual à solução final encontrada no primeiro passo. O critério utilizado para avaliar as soluções vizinhas geradas nesse estágio provém diretamente do segundo e terceiro termo da função objetivo do modelo de programação matemática apresentado na expressão (16).

Soluções Vizinhas: A geração das soluções vizinhas no segundo estágio do procedimento também emprega movimentos de troca e transferência, mas as tarefas e estações de trabalho envolvidas são selecionadas para promover uma melhora nas soluções. Como o objetivo no segundo passo é balancear a carga de trabalho, movimentos de troca são mais eficazes.

Nos dois passos do procedimento utiliza-se uma lista com as informações sobre as soluções vizinhas geradas, a fim de evitar o ciclismo dos resultados.

Movimentos de Troca

Passo 1. Assume-se Z como uma estação de trabalho selecionada aleatoriamente e, X como o modelo produzido com maior ou menor tempo ocioso nessa estação.

Passo 2. Seleciona-se na estação de trabalho Z a tarefa com menor tempo de processamento para o modelo X .

Passo 3. Do conjunto de tarefas necessárias a fabricação do modelo X , seleciona-se aleatoriamente uma que não esteja alocada a estação de trabalho Z e que possua o tempo de processamento maior do que a tarefa selecionada anteriormente. Vá para o *Passo 6*.

Passo 4. Seleciona-se na estação de trabalho Z a tarefa com maior tempo de processamento para o modelo X .

Passo 5. Do conjunto de tarefas necessárias a fabricação do modelo X , seleciona-se aleatoriamente uma que não esteja alocada a estação de trabalho Z e que possua o tempo de processamento menor do que a tarefa selecionada anteriormente.

Passo 6. Caso as restrições de precedência, zoneamento e capacidade sejam atendidas, troca-se as tarefas selecionadas de estação de trabalho.

Movimentos de Transferência

Passo 1. Assume-se Z como uma estação de trabalho selecionada aleatoriamente e, X como o modelo produzido com maior ou menor tempo ocioso nessa estação.

Passo 2. Do conjunto de tarefas necessárias a fabricação do modelo X , seleciona-se aleatoriamente uma que não esteja alocada a estação de trabalho Z e que possua o tempo de processamento maior do que para os outros modelos produzidos.

Passo 3. Caso as restrições de precedência, zoneamento e capacidade sejam atendidas, transfere-se a tarefa selecionada de estação de trabalho.

Passo 4. Seleciona-se na estação de trabalho Z a tarefa com maior tempo de processamento para o modelo X .

Passo 5. Seleciona-se aleatoriamente uma estação em que a carga de trabalho referente ao modelo X seja menor do que o tempo ocioso médio da estação.

Passo 6. Caso as restrições de precedência, zoneamento e capacidade sejam atendidas, transfere-se a tarefa selecionada de estação de trabalho.

2.4.4.2 Procedimento de McMullen e Tarasewich (2003)

O trabalho desenvolvido por McMullen e Tarasewich (2003) busca solucionar problemas de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos com tempos estocásticos e estações de trabalho paralelas através de uma heurística que utiliza como base a técnica das formigas. O método desenvolvido produz boas soluções em tempos razoáveis, através da utilização dos conceitos obtidos em pesquisas na área de Otimização da Colônia de Formigas.

A Otimização da Colônia de Formigas utiliza o comportamento de formigas artificiais como forma de obter soluções para problemas de otimização combinatória. O comportamento das formigas artificiais é baseado em formigas reais, com a adição de características adicionais, como memória de ações passadas. A seguir será explicado de forma resumida a técnica das formigas utilizada para resolver o problema de balanceamento.

Muitos aspectos das atividades coletivas de insetos sociais são auto-organizados. Isso significa que o comportamento do grupo surge através da interação do comportamento individual de cada participante da colônia. Como exemplos dessas atividades coletivas entre as formigas estão a procura por comida e a construção das colônias.

Comunicando-se através do *pheromone*, substância química que atrai outras formigas e depositada por elas por onde passam, as formigas conseguem estabelecer a rota mais curta entre uma fonte de comida e a sua colônia. Ao encontrar um rastro de *pheromone*, as formigas decidem se devem segui-lo ou não. Caso escolham a primeira alternativa, a quantidade de *pheromone* no caminho é reforçada, pois a nova formiga também o deposita. A probabilidade da formiga seguir ou não um determinado caminho é proporcional à quantidade de *pheromone* presente. Quanto maior o número de formigas utilizando um determinado rastro, mais atraente aquele rastro se torna às formigas subseqüentes.

Existindo caminhos longos e curtos, primeiramente as formigas utilizarão ambos, depositando o *pheromone* conforme passam por eles. No entanto, a formiga que segue o caminho curto voltará antes à colônia, marcando-o duplamente com *pheromone*. Além disso, com o passar do tempo o rastro de *pheromone* evapora, tornando o caminho longo menos perceptível às formigas. Dessa forma, o caminho curto torna-se mais atraente para o restante das formigas que voltam à fonte de comida. Isso é ilustrado na Figura 18, a qual mostra a distribuição das formigas sobre um conjunto de caminhos entre a colônia e a fonte de comida. Porém, sempre há a chance da formiga não seguir o rastro mais nítido, proporcionando a descoberta de caminhos mais curtos ou alternativos, além de novas fontes de comida.

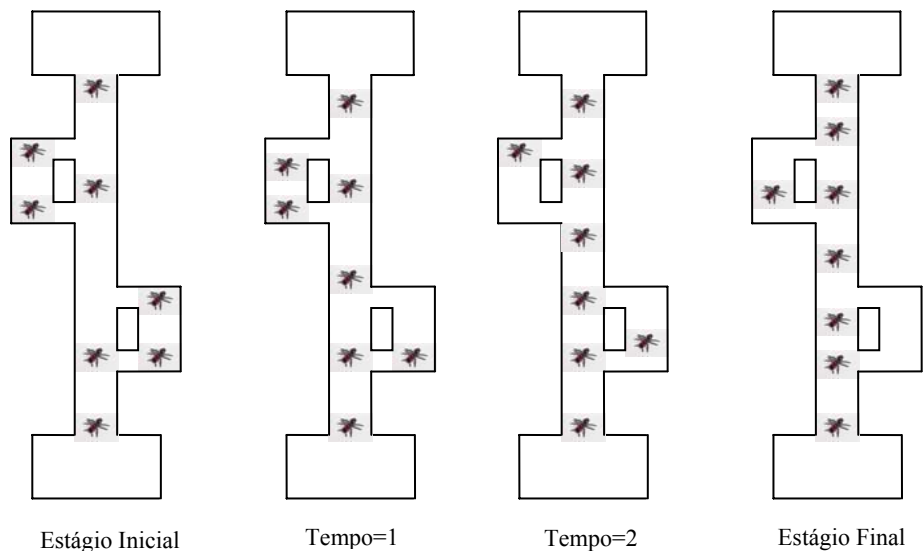


Figura 18 Distribuição das formigas em um conjunto de caminhos alternativos
Fonte: McMullen e Tarasewich (2003)

A heurística de balanceamento apresentada pelos autores funciona através da simulação de viagens de formigas artificiais às tarefas de montagem existentes no problema. A formiga seleciona a tarefa a ser alocada a estação de trabalho através de um mecanismo probabilístico. A probabilidade de uma tarefa ser selecionada por uma formiga depende do nível de *pheromone* existente no caminho da tarefa candidata à alocação.

Depois de determinada a tarefa, a abertura ou não de uma nova estação de trabalho é dada de forma probabilística. O procedimento continua até que todas as tarefas estejam alocadas às estações de trabalho. Nesse ponto, o balanceamento da linha está completo, possibilitando a obtenção de indicadores de desempenho.

Segundo os autores, para solucionar o problema de balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, a heurística parte dos seguintes dados de entrada:

- a) número de modelos, $m = 1, \dots, M$, montados pela linha;
- b) demanda por cada um dos modelos, D_m , em unidades;
- c) tarefas necessárias, $i = 1, \dots, N$, para montagem de cada um dos modelos;
- d) tempo de execução estimado da tarefa i no modelo m , $t_{i,m}^*$, e seu respectivo desvio padrão $\sigma_{i,m}^*$;
- e) diagramas de precedência de cada um dos modelos;
- f) tempo de ciclo, C , determinado pelo fabricante; e
- g) um fator para a probabilidade de se abrir uma nova estação, α , determinado pelo fabricante.

Antes de detalhar os passos do procedimento proposto, é importante definir a notação a ser utilizada, sendo esta apresentada na Figura 19. A seguir são apresentados os passos do procedimento para o balanceamento de linhas multi-modelos com tempos estocásticos de processamento.

Variável	Descrição
σ_i^*	Desvio padrão estimado para tarefa i
σ_j	Desvio padrão estimado para estação de trabalho j
$Cost_L$	Custo anual da mão-de-obra por pessoa
$Cost_M$	Custo dos equipamentos por ano
cv	Coeficiente de variação especificado pelo fabricante
D_T	Demanda total, referente a todos os produtos
I_i	Notação de precedência da tarefa i (relação de precedência)
M	Matriz de ligação $n \times n$ utilizada para detalhar as relações de precedência
$metric_i$	Métrica utilizada para a geração do <i>pheromone</i> referente a tarefa i
n_j	Número de tarefas alocadas a estação de trabalho j
ph_i	Nível de <i>pheromone</i> associado a tarefa i
R	Número de estações de trabalho obtido na solução final
$tasks_j$	Número de tarefas alocadas a cada estação obtido na solução final
t_i^*	Tempo de execução estimado para a tarefa i
t_j	Tempo de processamento estimado para a estação de trabalho j
w_j^0	Valor de ajuste para o número de trabalhadores necessários à estação de trabalho j
w_j	Número de trabalhadores necessários à estação de trabalho j

Figura 19 Notação utilizada no procedimento
 Fonte: McMullen e Tarasewich (2003)

Passo 1: Por se tratar de um ambiente multi-modelos com tempos estocásticos de processamento, o primeiro passo do procedimento consiste em estimar a duração de cada tarefa e seu respectivo desvio-padrão a partir das expressões (28) e (29).

$$t_i^* = \sum_{m=1}^M \left(\frac{D_m}{D_T} \right) t_{i,m}^* \quad (28)$$

$$\sigma_i^* = cv \times \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\frac{D_m}{D_T} \right)^2 (\sigma_{i,m}^*)^2} \quad (29)$$

Onde:

$$D_T = \sum_{m=1}^M D_m \quad (30)$$

Passo 2: Quando a estação de trabalho corrente está vazia (sem tarefas alocadas), não existe a necessidade de se criar uma nova estação. Caso contrário, a probabilidade de se criar uma nova estação de trabalho (P) é determinada da seguinte maneira:

$$P = \frac{\alpha}{n_j}, \quad (31)$$

onde j representa uma estação de trabalho já existente.

Na formulação acima o fabricante deve determinar um valor para o fator referente à criação de uma nova estação de trabalho (α), como forma de controlar a probabilidade de se criar uma nova estação. O parâmetro está contido em um intervalo entre (0,1), sendo que valores de α próximos a 1 indicam uma probabilidade maior de se criar uma nova estação de trabalho. O valor de α especificado provê ao fabricante algum controle sobre o número de estações de trabalho.

Caso se crie uma nova estação, todas as estatísticas relevantes são reinicializadas como forma de refletir uma estação de trabalho vazia. Caso contrário, a estação de trabalho atual permanece aberta para acomodar tarefas adicionais.

Passo 3: Completada a fase inicial do problema, as tarefas podem ser determinadas às estações de trabalho. No entanto, deve-se elaborar previamente uma lista L , a qual contém as tarefas possíveis de serem alocadas. Uma tarefa i deve ser adicionada à lista L somente se seguir as seguintes condições: (i) todas as tarefas que precedem a tarefa i já foram alocadas e; (ii) a tarefa i não foi alocada a nenhuma estação de trabalho anterior.

Para cada tarefa contida em L , são determinados valores temporários de u_j e p_j . A utilização da estação de trabalho, u_j , caso a tarefa i seja determinada a ela, é dada por:

$$u_j = \frac{w_j}{w_j^*}, \quad (32)$$

Onde:

$$w_j = \frac{1}{C} (t_j + t_i^*), \quad (33)$$

$$w_j^* = 1 + \text{int}(w_j). \quad (34)$$

A probabilidade de que todas as tarefas sejam completadas *on-time*, p_j , respeitando o número de trabalhadores disponíveis, caso a tarefa i seja alocada a estação de trabalho j é dada por:

$$p_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Y \exp(-0.5z^2) dz. \quad (35)$$

Onde:

$$Y = \frac{(w_j^* - w_j)C}{\sigma_j}, \quad (36)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_i^{*2}}. \quad (37)$$

Supõe-se que se existe mão-de-obra disponível suficiente na estação de trabalho para executar as tarefas dentro do tempo de processamento estimado, então o trabalho deve ser realizado *on-time*. Caso contrário, o trabalho não será terminado.

Após o cálculo das estatísticas u_j e p_j para cada uma das tarefas contidas em L , uma métrica é calculada e utilizada para construir o caminho de *pheromone*. A métrica é determinada a partir da estratégia escolhida pelo fabricante, a qual é baseada em objetivos definidos com a intenção de otimizar indicadores de desempenho como: (i) eficiência, (ii) realização das tarefas *on-time* e, (iii) custos de *design* (soma dos custos relativos à mão de obra e equipamentos). As quatro métricas definidas para cada estratégia são apresentadas na Figura 20.

Estratégia	Métrica i
ANT-1	u_i
ANT-2	p_i
ANT-3	$u_i \times p_i$
ANT-4	$u_i \times (1-p_i)$

Figura 20 Estratégias para seleção das tarefas
Fonte: McMullen e Tarasewich (2003)

O nível de *pheromone* associado a tarefa i é determinado da seguinte maneira:

$$ph_i = \left(\frac{metric_i}{\sum_i^n metric_i} \right) + \left(\frac{M_{(i,I_i)}}{\sum_i^n M_{(i,I_i)}} \right). \quad (38)$$

O primeiro componente da equação acima compara o valor da métrica referente à tarefa i ao das outras tarefas contidas em L . O segundo componente requer uma explicação mais detalhada. A matriz de ligação M consiste em uma representação histórica da frequência com que a tarefa i tem sido escolhida pelas formigas para entrar na estação de trabalho corrente depois da sua tarefa imediatamente predecessora, sendo que I_i representa a notação de precedência. A matriz de ligação M conta o número de vezes que as formigas artificiais escolheram viajar de uma tarefa a outra, determinando assim o nível de *pheromone* para cada tarefa.

O segundo componente da equação tem como função fornecer dados históricos para a determinação das tarefas. Dado Tarefa 1 e Tarefa 2, se a Tarefa 2 é escolhida para entrar na estação de trabalho corrente imediatamente após a Tarefa 1 com grande frequência, então devido ao comportamento histórico é adicionada uma grande quantidade de *pheromone* na Tarefa 2. A probabilidade dessa relação histórica é então ajustada pelo incremento do valor da matriz de ligação M da tarefa em questão. É importante ressaltar que quando a estação de trabalho corrente está vazia a segunda parte da equação é zero, pois não há nenhuma tarefa imediatamente antecessora.

O cálculo do nível de *pheromone* (ph_i) resulta em uma heurística que utiliza simultaneamente conceitos de balanceamento de linha e a técnica Otimização da Colônia de Formigas. O primeiro componente da equação assegura que medidas de desempenho tradicionais sejam levadas em conta (eficiência, conclusão *on-time*; custos de *design*). O segundo componente utiliza aspectos históricos para determinação das tarefas, ou seja, a preferência é dada às tarefas que foram selecionadas com uma maior frequência no passado.

Após o cálculo do nível de *pheromone* para cada tarefa, é utilizada a simulação de *Monte Carlo* para selecionar uma tarefa de L a estação de trabalho corrente. A simulação gera para cada tarefa a probabilidade de ser selecionada, sendo esta igual ao seu valor de ph_i dividido pela soma dos ph_i de todas as tarefas ($i \in L$). Esses valores são transformados em distribuições de probabilidade acumuladas, onde tarefas com níveis de *pheromone* mais altos têm uma probabilidade maior de serem selecionadas.

Passo 4: Terminada a determinação das tarefas contidas em L a estação de trabalho j , as seguintes estatísticas são atualizadas a fim de refletir a adição da tarefa i : t_j , σ_j , u_j e p_j .

Especificando:

$$t_j = \sum_{i=1}^{n_j} t_i^* , \quad (39)$$

$$\sigma_j = \frac{1}{C} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_j} \sigma_i^{*2}} , \quad (40)$$

sendo que i pertence ao conjunto de tarefas alocadas a estação de trabalho j .

Os valores para u_j e p_j são calculados segundo as expressões (32) e (35) apresentadas anteriormente. A diferença é que os valores de t_j e σ_j são obtidos através das expressões (39) e (40). A matriz de ligação M é sempre revisada a fim de refletir a adição da tarefa i a estação de trabalho j . Especificando, o valor de $M(i, I_j)$ recebe o incremento de uma unidade.

Passo 5: São refeitos os passos 2, 3 e 4 até que todas as tarefas estejam alocadas as estações de trabalho, resultando em um *layout* para a linha de montagem.

Passo 6: Completada a simulação do comportamento das formigas, as seguintes estatísticas relacionadas à qualidade do *design* da linha de montagem são coletadas:

U – utilização do *layout* da linha de montagem;

P – probabilidade de todas as estações completarem as tarefas *on-time*;

$Comp$ – valor composto da utilização do *layout* e probabilidade de todas as estações completarem suas tarefas *on-time*;

$Cost$ – custo de *design* associado com o *layout*.

A utilização (U) de um *layout* consiste na divisão do número mínimo de trabalhadores necessários pelo número atual de trabalhadores designados a linha, sendo descrita como:

$$U = \frac{\left(\frac{1}{C}\right) \sum_{i=1}^n t_i^*}{\sum_{j=1}^R w_j^*} . \quad (41)$$

A probabilidade de todas as estações de trabalho existentes no *layout* completarem suas tarefas *on-time* é estimada da seguinte forma:

$$P = \prod_{j=1}^R p_j. \quad (42)$$

O valor composto dos dois sistemas acima é:

$$Comp = U \times P. \quad (43)$$

O custo do *layout*, o qual considera a mão-de-obra e os equipamentos necessários, é obtido da seguinte forma:

$$Cost = Cost_L \times \sum_{j=1}^R w_j^* + Cost_M \times \sum_{j=1}^R (tasks_j \times w_j^*). \quad (44)$$

Passo 7: A partir dos seis passos descritos acima, é obtido o balanceamento da linha de montagem, além de calculados seus indicadores de desempenho. A cada novo *layout*, novos indicadores de desempenho são capturados e comparados entre si. A metodologia apresenta 4 funções objetivo análogas às quatro estratégias descritas na Passo 3, sendo estas apresentadas na Figura 21.

Função Objetivo	Objetivo
ANT-1	Max (U)
ANT-2	Max (P)
ANT-3	Max (Comp)
ANT-4	Min (Cost)

Figura 21 Funções objetivo para seleção das tarefas
Fonte: McMullen e Tarasewich (2003)

Caso o valor da função objetivo para o *layout* atual seja superior a todos que se encontram na memória, o *layout* corrente e seus respectivos indicadores se tornam os melhores. Este procedimento se repete por N interações, sendo utilizada a melhor solução em termos de valor para a função objetivo.

Neste capítulo fez-se a revisão bibliográfica pertinente ao assunto desta dissertação. No capítulo subsequente será apresentada a sistemática para seleção e aplicação de algoritmos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos a ser utilizada no estudo de caso.

CAPÍTULO 3 - SISTEMÁTICA PARA APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE BALANCEAMENTO EM LINHAS DE MONTAGEM MULTI-MODELOS

Neste capítulo propõem-se uma sistemática para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos. O balanceamento de uma linha multi-modelos consiste, na sua forma básica, em alocar as tarefas necessárias à montagem de todos os modelos de um produto fabricado pela linha a uma determinada seqüência de estações de trabalho, de modo que as relações de precedência sejam satisfeitas.

O principal objetivo do balanceamento de linhas multi-modelos é distribuir a carga de trabalho entre as estações da forma mais equilibrada possível, aumentando a capacidade de produção da linha. Além disso, a configuração multi-modelos proporciona um sistema produtivo flexível, conferindo às organizações a habilidade de se modificarem a cada novo modelo de produto de uma maneira rápida e econômica, o que se faz necessário no contexto de produção com flexibilidade de catálogo.

Os procedimentos desenvolvidos para o balanceamento de linhas multi-modelos variam consideravelmente quanto aos dados de entrada necessários e ao procedimento para obtenção da solução final. Cada procedimento é desenvolvido de acordo com características específicas da linha e com o objetivo que se pretende atingir, os quais devem ser considerados na escolha do algoritmo a ser utilizado.

De uma forma geral, a aplicabilidade do balanceamento de linhas de montagem multi-modelos está baseada nas seguintes condições principais:

- a) Fabricação de um produto com um número fixo e conhecido de modelos na linha de montagem;
- b) Alternância dos modelos do produto em fabricação na linha; e
- c) Baixa rotatividade entre os funcionários que operam na linha analisada.

Ao se balancear uma linha multi-modelos, é importante que o produto produzido por ela possua um número fixo e conhecido de modelos, visto que essa informação servirá como base para todo o processo de balanceamento. A mudança no número de modelos alterará os dados de entrada, demandando a realização de um novo balanceamento.

A necessidade de alternância dos modelos do produto em fabricação demanda a utilização dos procedimentos multi-modelos apresentados no Capítulo 2 para o balanceamento da linha. A produção de um mesmo modelo de produto na linha não justificaria a utilização da sistemática aqui proposta.

Ao se realizar o balanceamento em uma linha, é importante que a mesma apresente uma baixa rotatividade de trabalhadores, proporcionando a eles experiência nas operações realizadas. A troca freqüente de trabalhadores na linha pode alterar os tempos de execução das tarefas de montagem dos modelos, demandando a realização de um novo balanceamento para a linha.

A sistemática proposta para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos consiste na seqüência de etapas apresentadas abaixo:

Etapa I: Identificação e caracterização do sistema produtivo a ser balanceado.

Etapa II: Escolha do procedimento para o balanceamento da linha de montagem.

Etapa III: Definição das informações e indicadores de desempenho a serem coletados.

Etapa IV: Coleta das informações necessárias à realização do balanceamento e obtenção dos indicadores de desempenho.

Etapa V: Realização do balanceamento.

Etapa VI: Coleta das informações necessárias para obtenção dos indicadores de desempenho após o balanceamento.

Etapa VII: Avaliação do balanceamento através da comparação dos indicadores obtidos antes e após a sua realização.

O diagrama de fluxo apresentado na Figura 22 permite a visualização da sistemática através da apresentação seqüencial de suas etapas, sendo estas detalhadas nas seções que se seguem. A sistemática proposta foi concebida para aplicação em empresas de manufatura inseridas em um contexto de customização em massa, as quais apresentem customização do tipo padronizada e segmentada (para uma revisão sobre níveis de customização, ver seção 2.1).

3.1 ETAPA I – IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO A SER BALANCEADO

3.1.1 *Contextualização inicial do sistema produtivo a ser balanceado*

Nesta etapa, é importante que a empresa realize uma avaliação estratégica a respeito do produto fabricado pelo sistema a ser abordado no estudo. Tal produto deve apresentar relevância em termos de faturamento para a empresa, demanda relevante em todos os modelos do produto e importância estratégica para a empresa em seu mercado de atuação.

A análise do sistema produtivo a ser balanceado, em particular quanto a sua viabilidade técnica, deve ser realizada de acordo com as características apresentadas pelo mesmo, as quais determinarão a possibilidade ou não de se realizar o balanceamento. Parte-se do princípio de que o sistema deve possuir uma configuração em linha, a qual produza diversos modelos de um mesmo produto (para uma revisão sobre linhas multi-modelos, ver seção 2.4). Em conjunto, é desaconselhável que o sistema de transporte utilizado para movimentar o produto ao longo da linha seja constante, pois dificulta a determinação das estações de trabalho.

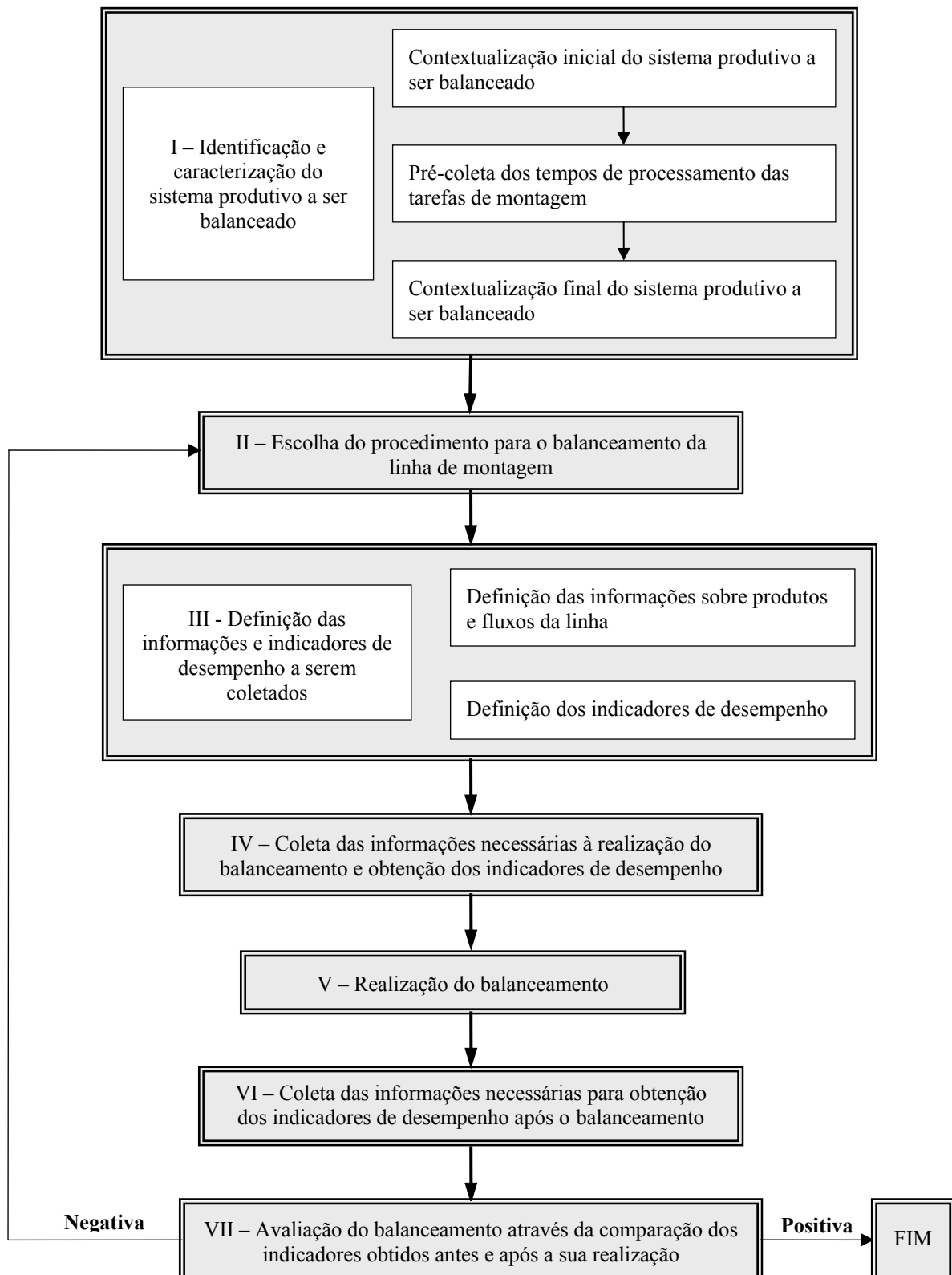


Figura 22 Fluxograma da sistemática proposta

3.1.2 *Pré-coleta dos tempos de processamento das tarefas de montagem*

O principal objetivo nesta etapa é determinar a natureza dos tempos em relação a sua variabilidade; isto é, se serão considerados estocásticos ou aproximadamente determinísticos.

Primeiramente, é essencial identificar a totalidade das tarefas realizadas pela linha de montagem, independente do modelo. Essa informação deve ser obtida através de entrevistas com o coordenador e operadores da linha de montagem analisada. As tarefas devem ser listadas e identificadas através de numeração, de acordo com a sua ordem de execução na linha. Após esta identificação é possível iniciar a coleta dos tempos.

O tempo de processamento de uma tarefa de montagem consiste no tempo necessário para uma pessoa qualificada e treinada, trabalhando em ritmo normal, executá-la (BARNES, 1999). Caso mais de uma pessoa execute a mesma tarefa, é importante analisar se os operadores estão utilizando o mesmo método para sua execução e se há uma diferença na velocidade com a qual eles executam a tarefa.

Entretanto, ligeiras variações nos tempos de execução das tarefas podem ocorrer a cada coleta, mesmo que o operador trabalhe a um ritmo constante. As variações podem resultar de diferenças na posição das peças e ferramentas utilizadas pelo operador, de variações na leitura do cronômetro e de possíveis diferenças na determinação do ponto exato de início e término da tarefa (BARNES, 1999).

É importante ressaltar que leituras suspeitas devem ser analisadas, e sendo certificado de que sua ocorrência se deve a causas especiais esporádicas, devem ser descartadas da amostra. Além disso, é importante analisar possíveis particularidades na execução das tarefas, como o número de equipamentos disponíveis para realização das mesmas, as quais possam influenciar no tempo de processamento obtido.

A coleta dos tempos é operacionalizada com o auxílio de planilha e cronômetro. A leitura no cronômetro deve ser repetitiva, ou seja, o observador começa a cronometrar no momento em que o operador inicia a tarefa de montagem e mantém o cronômetro em movimento durante todo seu processamento, verificando a leitura no cronômetro no momento em que o operador termina a tarefa. A operação deve ser repetida para o número de observações necessárias ao estudo.

No presente trabalho optou-se por uma coleta inicial de 10 observações para cada tarefa de montagem, sendo esse valor recomendado por diversos autores na literatura. A coleta dos tempos deve ser feita em segundos, de forma a facilitar a execução dos cálculos necessários ao procedimento.

Após a coleta da amostra, é possível determinar a natureza dos tempos em relação a sua variabilidade. Para isso, será utilizado o cálculo do coeficiente de variação, o qual consiste na divisão do desvio padrão pela média da amostra (SNEDECOR; COCHARAN, 1989). O coeficiente deve ser calculado para cada tarefa amostrada. Em termos práticos, a natureza dos tempos poderá ser considerada determinística quando o valor obtido para o coeficiente de variação for igual ou inferior a 10% para os tempos de todas as tarefas. Caso contrário, recomenda-se considerar os tempos como sendo estocásticos.

A Tabela 1 apresenta o arranjo em que os dados devem ser coletados, bem como o cálculo do coeficiente de variação. É importante ressaltar que, em casos onde a mesma tarefa é executada em mais de um modelo, deve-se verificar a existência de diferenças no tempo de processamento da tarefa de modelo para modelo. Existindo diferenças, é necessário coletar os tempos de processamento da tarefa em questão para cada modelo separadamente, identificando cada coleta na tabela. Recomenda-se utilizar planilha eletrônica para que os valores calculados sejam obtidos de maneira rápida e precisa, permitindo um fácil armazenamento.

Tabela 1 - Tempos de processamento das tarefas de montagem

Tarefas de montagem	Tempos de Processamento (segundos)										t_{med}	σ	CV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...			
Tarefa 1													
Tarefa 2													
...													
Tarefa n													

3.1.3 Contextualização final do sistema produtivo a ser balanceado

A partir da determinação da natureza dos tempos de processamento, aliada a verificações de campo na empresa, é possível contextualizar de forma final o sistema

produtivo a ser balanceado. Nesta etapa, é importante que seja identificada primeiramente a configuração da linha analisada, a qual pode apresentar formato tradicional, formato em U, linhas paralelas, estações de trabalho paralelas, entre outras. A descrição das configurações é realizada ao longo da seção 2.3.

Após estabelecer a configuração da linha de montagem, deve-se analisar a Figura 23, que relaciona as naturezas dos tempos de processamento com suas possíveis configurações de linha. Desse modo, a realização do balanceamento está condicionada ao fato de as informações a respeito da linha, obtidas nas Etapas II e III, estarem relacionadas na Figura 23. Isso ocorre devido ao esquema ter sido elaborado de acordo com os algoritmos classificados na Figura 16, restringindo a realização do balanceamento. Assim, estando as características do sistema produtivo relacionadas na Figura 23, esse é contextualizado de forma final; caso contrário, não é possível realizar o balanceamento da linha a partir da sistemática proposta no presente trabalho.

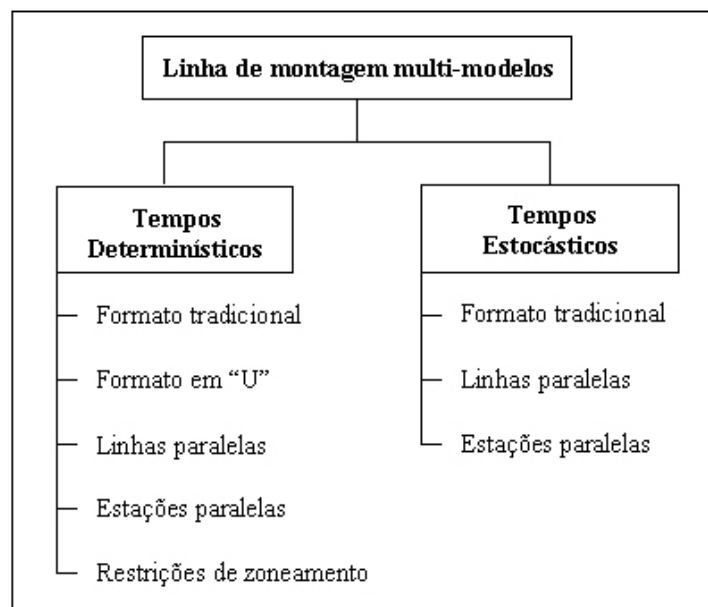


Figura 23 Classificação da linha de montagem

3.2 ETAPA II – ESCOLHA DO PROCEDIMENTO PARA O BALANCEAMENTO DA LINHA DE MONTAGEM

Devido à diversidade de características atribuídas às linhas multi-modelos, tornou-se necessário o desenvolvimento de procedimentos específicos para cada situação, visando proporcionar melhores resultados.

Para a escolha do procedimento, deve-se primeiramente, associar a linha analisada com alguma das situações apresentadas na Figura 16, na qual são classificados de uma forma inicial os mais recentes procedimentos desenvolvidos para o balanceamento de linhas multi-modelos. É importante ressaltar que, na Figura 16, a situação *Caso simples* refere-se somente ao formato de linha tradicional; já *Caso genérico* refere-se a todos os tipos de configurações. Após a identificação inicial, deve-se analisar a descrição dos procedimentos nas seções 2.4.4 a 2.4.7, nas quais resumidamente são apresentadas suas particularidades em relação a objetivos principais, procedimento para obtenção da solução final e características da linha, a fim de escolher a opção que melhor se enquadra na situação analisada.

3.3 ETAPA III – DEFINIÇÃO DAS INFORMAÇÕES E INDICADORES DE DESEMPENHO A SEREM COLETADOS

A fim de facilitar a definição das informações a serem coletadas, esta etapa foi dividida em dois passos, os quais são descritos a seguir.

3.3.1 *Definição das informações sobre produtos e fluxos da linha*

As informações sobre a linha necessárias à realização do balanceamento variam de acordo com o procedimento escolhido na etapa anterior. Dessa forma, a fim de definir os dados a serem coletados, deve-se analisar a Figura 24, a qual apresenta as informações necessárias para o balanceamento segundo cada procedimento. Os procedimentos abordados limitam-se àqueles constantes da Figura 16.

	Karabati e Sayin, 2003.	Bukchin <i>et al.</i> , 2002.	Matanachai e Yano, 2001.	Erel e Gokcen, 1999.	Merengo; Nava; Pozzetti, 1999.	Vilarinho e Simaria, 2002.	Kim; Kim; Kim, 2000.	Sparling, e Miltenburg, 1998.	Askin e Zhou, 1997.	Khan e Day, 2002.	McMullen e Tarasewich, 2003.	McMullen e Tarasewich, 1997.
Identificação dos modelos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identificação das tarefas de montagem	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identificação das estações de trabalho	✓		✓				✓					
Tempo de processamento das tarefas de montagem	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Diagrama de precedência de cada modelo	✓											
Diagrama de precedência equivalente		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tempo de ciclo		✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
Demanda diária por cada modelo	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Custo fixo para abrir uma nova estação de trabalho									✓			
Custo unitário dos equipamentos utilizados nas estações									✓			

Figura 24 Informações necessárias para a aplicação de cada procedimento

3.3.2 Definição dos indicadores de desempenho

De acordo com Slack *et al.* (1996), a quantificação de metas e indicadores de desempenho permite que eles sejam acompanhados e controlados de forma mais precisa, tornando mais fácil a implementação de planos estratégicos nas empresas. Não existe um sistema de medição absoluto; os indicadores de desempenho devem ser definidos de acordo com a natureza específica de cada cenário e de seus objetivos.

A partir da escolha dos indicadores é importante verificar quais são os dados necessários para obtenção dos mesmos. A Figura 25 apresenta uma relação das informações que devem ser coletadas a fim de obter cada um dos indicadores acima listados.

Deste modo, são propostos alguns indicadores que podem ser utilizados para avaliar a realização do balanceamento em linhas multi-modelos; são eles: (i) tempo de ciclo, (ii) percentual de utilização das estações de trabalho, (iii) produtividade da linha, (iv) atraso de balanceamento [ver expressão (3), seção 2.3] e (v) índice de suavidade [ver expressão (4), seção 2.3]. A escolha dos indicadores deve ser guiada pelas características específicas da linha, de forma a prover informações que sejam importantes para a linha analisada.

	Tempo de ciclo	Percentual de utilização das estações de trabalho	Produtividade da linha	Atraso de balanceamento	Índice de suavidade
Tempo de produção diário	√		√		
Demanda diária total	√				
Identificação das estações de trabalho		√			√
Tempo de processamento das tarefas de montagem		√		√	√
Tempo de ciclo		√	√	√	

Figura 25 Informações necessárias para mensuração dos indicadores de desempenho

3.4 ETAPA IV – COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A REALIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO E OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

A partir da definição dos dados a serem coletados para realização do balanceamento e obtenção dos indicadores de desempenho, é importante definir a sistemática de coleta e armazenamento das informações, os quais são apresentados nesta etapa.

A *identificação dos modelos* do produto produzido pela linha de montagem é obtida através de pessoas ligadas diretamente à linha analisada. O gerente da linha pode fornecer essa informação de maneira rápida e precisa. A Figura 26 mostra o arranjo em que os dados devem ser armazenados, o qual possui a identificação do modelo e descrição de suas características principais.

Identificação de modelo	Descrição do modelo
Modelo X	
...	
Modelo Z	

Figura 26 Identificação dos modelos produzidos pela linha de montagem

A *identificação das tarefas de montagem* é feita a partir de entrevistas com os operadores das estações de trabalho que compõem a linha analisada. A entrevista deve ser realizada de forma a obter as seguintes informações: (i) a descrição das tarefas realizadas na montagem dos modelos, (ii) as relações de precedência apresentada por cada tarefa, (iii) o modelo a qual a tarefa pertence, e (iv) a estação de trabalho que executa a tarefa. Essa última informação permite que se obtenha a *identificação das estações de trabalho* existentes na linha de montagem, onde cada estação deve ser numerada de acordo com o seu ordenamento na linha.

É importante que o entrevistador possua um conhecimento prévio da linha de montagem, para que a coleta seja correta e eficiente. A Figura 27 apresenta o arranjo no qual as informações acima descritas devem ser coletadas.

Tarefa de montagem	Descrição da tarefa de montagem	Estação de trabalho	Relações de precedência	Modelos			
				X	Y	Z	W

Figura 27 Identificação das tarefas executadas pela linha de montagem

O *tempo de processamento das tarefas de montagem* consiste na mesma informação obtida a partir da pré-coleta de tempos realizada na Etapa II. Desse modo, as 10 amostras de cada tarefa serão reutilizadas nessa etapa, economizando tempo e esforço. No entanto, deve-se verificar se existe a necessidade de uma amostra maior para uma determinação precisa dos tempos de processamento.

A coleta dos tempos consiste em um processo de amostragem; conseqüentemente, quanto maior a amostra, mais representativos serão os resultados obtidos. No entanto, um fator decisivo para se determinar o número de observações suficiente para a consistência das observações é a variabilidade. Quanto maior a variabilidade das leituras de uma tarefa, maior será o número de observações para que se obtenha a precisão desejada (BARNES, 1999). Desse modo, é importante determinar o tamanho da amostra, de forma que o tempo médio calculado seja representativo da população.

A fórmula para cálculo do número de observações, n , necessário na tomada de tempos das tarefas é dada pela expressão (45):

$$n = \left[\left(\frac{z}{p} \right) \left(\frac{\sigma}{t_{med}} \right) \right]^2, \quad (45)$$

Na expressão (45), tem-se:

z – número de desvios normalizados para obter o grau de confiança desejado;

p – precisão da estimativa dada como fração do valor real;

σ – desvio-padrão representativo dos tempos da tarefa em questão;

t_{med} – média dos tempos coletados para a tarefa em questão.

Deve-se decidir em relação ao nível de confiança e ao erro relativo desejados a serem utilizados na determinação do número de amostras necessária. Em estudos de tempo, utiliza-se geralmente o nível de confiança de 95% e um erro relativo de 5%. Isso significa que, com 95% de probabilidade, a média dos valores observados para a tarefa não diferirá mais de $\pm 5\%$ do valor verdadeiro para a duração da tarefa (BARNES, 1999).

O cálculo do tamanho da amostra deve ser realizado na mesma planilha onde estão armazenados os tempos de processamento. Desse modo, recomenda-se a inserção de uma coluna na Tabela 1 para o cálculo do tamanho da amostra como forma de facilitar a utilização dos dados anteriormente coletados. Caso sejam necessárias observações complementares, o procedimento de coleta deve seguir as mesmas instruções apresentadas anteriormente. Deve-se ressaltar que a coleta adicional deve refletir o excedente as 10 amostras, obtido pela expressão (45).

A **demanda diária por cada modelo** consiste na quantidade de cada modelo a ser produzida a fim de atender as exigências do mercado consumidor. A unidade de coleta dessa informação é dada de acordo com o procedimento empregado no balanceamento da linha, variando entre o número de unidades ou o percentual referente a cada modelo.

Outro ponto importante em relação à demanda, diz respeito ao período de tempo a ser coberto pelo balanceamento. Em casos onde existam flutuações de demanda durante o ano, a quantia de cada modelo deve refletir a demanda existente no período estudado. Caso não existam flutuações, assume-se uma demanda constante. Para obtenção dessa informação, é essencial realizar entrevistas com o departamento responsável pelo *forecasting* do produto, a fim de verificar a projeção de demanda a ser atendida no período para o qual será aplicado o balanceamento. A Figura 28 apresenta o arranjo no qual esta informação deve ser coletada.

Modelo	Demanda
Modelo 1	
Modelo <i>N</i>	
Demanda total	

Figura 28 Demanda diária por cada modelo produzido na linha

A **demanda diária total** corresponde à soma das demandas diárias obtidas para cada modelo do produto fabricado na linha de montagem.

O **tempo de ciclo** pode ser definido como o tempo disponível para cada estação realizar a sua respectiva carga de trabalho, ou seja, as tarefas alocadas a ela. Segundo Vilarinho e Simaria (2002), cada estação de trabalho deve possuir um tempo pré-determinado para executar as tarefas a ela alocadas; esse é o tempo de ciclo. Dessa forma, o tempo de ciclo determina a taxa de produção da linha de montagem.

O cálculo do tempo de ciclo pode variar mas, de uma forma geral, baseia-se no tempo total disponível para a produção dentro de um determinado período e na demanda existente dentro desse período. Por exemplo, no caso de dispor-se de 400 minutos por dia para a produção e a demanda diária for de 200 produtos, o ciclo deve ser de 2 minutos por unidade, ou seja, a cada 2 minutos uma unidade é finalizada na linha.

O *diagrama de precedência de cada modelo* consiste na descrição gráfica da ordem na qual as tarefas de montagem devem ser realizadas para execução total do modelo, bem como das tarefas necessárias para sua execução. Sua descrição é feita na seção 2.3 e ilustrada na Figura 9. Para construção do diagrama de precedência de cada modelo devem ser utilizadas as informações coletadas na Figura 27.

O objetivo do *diagrama de precedência equivalente* é o mesmo do diagrama feito para cada modelo, isto é, descrever graficamente a ordem na qual as tarefas de montagem devem ser realizadas. No entanto, o diagrama equivalente combina os diagramas de precedência dos diferentes modelos através da união dos nós e das relações de precedência de seus respectivos diagramas, formando um diagrama único para todos os modelos. As metodologias existentes para sua construção e para o cálculo dos tempos de processamento das tarefas equivalentes são apresentada na seção 2.4.1. Entretanto, caso o procedimento selecionado apresente uma metodologia própria para obtenção destes dados, esta deve ser utilizada. As informações para construção do diagrama equivalente são obtidas através da Figura 27.

O *custo fixo para abrir uma nova estação de trabalho* é obtido através de entrevistas com o departamento responsável pelo *layout* da fábrica. Deve-se lembrar que essa informação é a mesma para todas as estações de trabalho, visto que se refere a custos relativos a mão-de-obra para a estação e energia elétrica, entre outros, os quais não possuem diferença significativa em matéria de custos de uma estação para outra.

Ao contrário do custo fixo, o *custo unitário dos equipamentos utilizados nas estações* deve variar de acordo com o equipamento. Devem-se listar todos os equipamentos, identificando a estação a qual pertencem e, a partir de entrevistas com o departamento responsável pelo *layout* da fábrica, determinar o custo de cada um. A unidade utilizada para determinar o custo unitário dos equipamentos deve ser a mesma utilizada na determinação do custo fixo. A Figura 29 apresenta o arranjo desta informação.

Equipamento	Estação de trabalho	Custo unitário
Fresa		
...		

Figura 29 Custo unitário dos equipamentos utilizados nas estações de trabalho

O *tempo de produção diário* consiste no período de tempo que a linha produz durante um turno de trabalho. Essa informação é facilmente obtida através de entrevistas com o coordenador da linha de montagem.

3.5 ETAPA V – REALIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO

A realização do balanceamento de linhas de montagem pode ocorrer de diversas maneiras, entre elas estão o: (i) cálculo manual, (ii) cálculo manual com auxílio de programas de otimização, e (iii) programação computacional.

O cálculo manual é utilizado em casos onde a linha apresenta características bastante simples, ou seja, poucos modelos e poucas tarefas envolvidas em sua montagem. Além disso, é realizado somente quando a natureza dos tempos é considerada determinística e quando é possível utilizar o diagrama de precedência equivalente, proporcionando a simplificação necessária para se obter a solução manualmente.

A introdução de otimizadores ao cálculo manual permite aumentar o grau de complexidade do problema. Nesse caso, utiliza-se inicialmente o cálculo manual a fim de organizar os dados em relação aos tempos de execução das tarefas e relações de precedência. Após, são utilizados programas de otimização a fim de determinar as tarefas às estações de trabalho. O auxílio de otimizadores permite solucionar problemas de balanceamento mais complexos, os quais envolvem mais modelos e tarefas de montagem. No entanto, é desaconselhável utilizá-los quando os tempos de processamento das tarefas apresentam uma natureza estocástica.

Na programação computacional todas as rotinas para obtenção da solução são programadas, o que requer conhecimentos em programação. Essa situação é utilizada em problemas complexos, os quais envolvem tempos estocásticos para as tarefas de montagem.

No entanto, ao se escolher um procedimento para realização do balanceamento é importante analisar a metodologia proposta pelos autores para obtenção da solução final, a fim de verificar qual a melhor maneira de aplicá-la aos dados coletados.

3.6 ETAPA VI – COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO APÓS O BALANCEAMENTO

Após a realização do balanceamento da linha é importante realizar um novo cálculo dos indicadores de desempenho a fim de verificar a existência ou não de melhoria nos mesmos. Segundo Marchesan; Miorando; ten Caten (2003), é essencial para a empresa saber como está seu desempenho em relação ao que já fez no passado e em relação aos seus concorrentes. Qualquer tipo de ação a ser implementada deve ser acompanhada para se determinar se está em consonância com as metas estabelecidas e definição de medidas necessárias para eventuais correções de rumos.

A fim de comparar os resultados, os indicadores utilizados nesta etapa devem ser os mesmos selecionados na Etapa V, bem como as informações a serem coletadas. O procedimento para obtenção dos dados necessários deve seguir a mesma sistemática descrita na Etapa VI deste capítulo.

3.7 ETAPA VI – AVALIAÇÃO DO BALANCEAMENTO ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS INDICADORES OBTIDOS ANTES E APÓS A SUA REALIZAÇÃO

Uma vez obtidos os dados para o cálculo dos indicadores de desempenho antes e após a realização do balanceamento, torna-se possível avaliar o mesmo através da comparação dos resultados. As formulações para o cálculo dos indicadores são apresentadas ao longo desta dissertação, não sendo descritas na presente etapa.

Considera-se o balanceamento de linhas multi-modelos uma ferramenta válida de aplicação caso o desempenho da linha seja otimizado em relação a sua condição anterior – avaliação positiva. Nesse caso, os indicadores de desempenho deverão apresentar melhores resultados após o balanceamento da linha, caso contrário não será comprovada sua eficácia, ou seja, a avaliação será negativa.

De forma a facilitar a avaliação do balanceamento recomenda-se a utilização da Figura 30, a qual apresenta os valores obtidos antes e após o balanceamento, além da melhoria

obtida no indicador. No entanto, deve-se ressaltar que os indicadores presentes na Figura 30 devem corresponder aqueles selecionados na Etapa V da presente sistemática.

Caso a avaliação do balanceamento não seja positiva, deve-se retornar à Etapa IV a fim de escolher outro procedimento que possa fornecer melhores resultados. A Figura 22 apresenta o fluxograma a ser seguido caso ocorra essa situação.

Indicadores	Antes do balanceamento	Após o balanceamento	Melhoria obtida (%)
Tempo de ciclo (min)			
Utilização das estações de trabalho (%)			
Produtividade da linha (unid)			
Atraso de balanceamento (%)			
Índice de Suavidade (min)			

Figura 30 Indicadores de desempenho

Neste capítulo procurou-se criar uma sistemática de etapas capaz de orientar o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos. No capítulo 4 será aplicada a sistemática apresentada neste capítulo, em estudo de caso, em uma empresa de manufatura.

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentada a aplicação prática da sistemática proposta no Capítulo 3 da presente dissertação, tendo como principal objetivo ilustrar o seu desenvolvimento e suas vantagens.

O estudo de caso foi realizado na empresa Springer Carrier, a qual atua em diversas partes do mundo. No Brasil, a empresa possui duas plantas, sendo uma instalada na cidade de Canoas – RS, na qual foi realizado o presente trabalho. A atividade principal da empresa consiste na fabricação de equipamentos condicionadores de ar, sendo a única no Brasil a oferecer desde condicionadores de ar de parede até equipamentos de ar condicionado central de grandes capacidades, capazes de refrigerar ambientes como *shopping centers*, hotéis e hospitais.

Entre os produtos oferecidos pela empresa, destacam-se: (i) aparelhos de janela, (ii) *splits*, (iii) *self contained*, (iv) *chiller*, (v) *fan coil*, (vi) refrigeradores e *freezers*, e (vii) expositores.

Os dados obtidos na empresa, com relação às informações do processo e produtos em estudo, possibilitaram a aplicação da sistemática proposta para o balanceamento de linhas de produção multi-modelos. A seguir será apresentada a aplicação das etapas constituintes da sistemática proposta no Capítulo 3 desta dissertação aos dados do estudo de caso.

4.1 ETAPA I – IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO A SER BALANCEADO

4.1.1 *Contextualização inicial do sistema produtivo a ser balanceado*

Na primeira etapa da sistemática definiu-se o sistema produtivo a ser realizado o balanceamento. Em consulta à empresa onde se realizou a aplicação, identificou-se a linha de produção LMTG G Visa Cooler, responsável pela fabricação de diferentes modelos de refrigeradores, como adequada para o estudo.

A escolha da linha como adequada para a realização do balanceamento ocorreu devido ao crescimento na demanda de refrigeradores junto à empresa, o que aumentou sua relevância em termos de faturamento, tornando necessária a aplicação de ferramentas que otimizem a capacidade produtiva da linha. Além disso, a linha de montagem em questão viabiliza tecnicamente a realização do balanceamento, pois produz mais do que um modelo do produto e possui sistema de transporte não sincronizado.

4.1.2 *Pré-Coleta dos Tempos de Processamento das Tarefas de Montagem*

Escolhida a linha de produção a ser balanceada, partiu-se para a pré-coleta dos tempos de processamento das tarefas, a fim de identificar a natureza dos tempos em relação a sua variabilidade.

Como primeiro passo realizou-se uma identificação da totalidade de tarefas realizadas pela linha, independente do modelo executado. A partir das entrevistas, listou-se um total de 40 tarefas envolvidas na fabricação de todos os modelos produzidos pela linha analisada. A descrição detalhada dos modelos, bem como das tarefas de montagem, é apresentada na Etapa VI presente neste Capítulo.

Após a identificação das tarefas de montagem, foi possível realizar a pré-coleta dos tempos de processamento. O processo de coleta seguiu a metodologia apresentada na seção 3.3, sendo operacionalizada com o auxílio de planilha e cronômetro. Durante o processo de coleta foi constatado, a partir de entrevistas com os operadores da linha, que algumas tarefas de montagem possuíam tempos de execução diferentes de acordo com o modelo produzido.

Nesses casos, houve a necessidade de se coletar os tempos de processamento para cada modelo separadamente.

A Tabela 2 apresenta a numeração das tarefas, bem como o cálculo do seu tempo médio de processamento, desvio-padrão e coeficiente de variação. A tabela completa, contendo as 10 observações de cada amostra, é apresentada no Apêndice 1 desta dissertação. Na Tabela 2, as tarefas identificadas com letras após a numeração, referem-se aos casos onde verificou-se a existência de diferenças nos tempos de processamento da tarefa de modelo para modelo, acarretando a necessidade de se coletar os tempos de processamento da tarefa em questão para cada modelo.

Tabela 2 - Cálculo do *CV* para cada tarefa de montagem

Tarefas de montagem	t_{med} (seg.)	σ (seg.)	<i>CV</i> (%)	<i>n</i>
Tarefa 1	30,8	2,49	8,1	10
Tarefa 2a	55,4	4,17	7,5	9
Tarefa 2b	54,3	2,71	5,0	4
Tarefa 3	171,1	12,99	7,6	9
Tarefa 4	61	3,94	6,5	6
Tarefa 5	164,8	13,31	8,1	10
Tarefa 6	135,3	10,65	7,9	10
Tarefa 7a	58,1	4,68	8,1	10
Tarefa 7b	63,4	1,84	2,9	1
Tarefa 8a	336	23,32	6,9	7
Tarefa 8b	32,5	14,29	4,4	3
Tarefa 9	10,6	8,85	8,2	10
Tarefa 10	120	0,00	0,0	0
Tarefa 11	30	1,89	6,3	6
Tarefa 12	225	0,00	0,0	0
Tarefa 13	26,4	0,84	3,2	2
Tarefa 14	522,4	25,96	4,8	4
Tarefa 15	333,1	19,78	5,9	5
Tarefa 16	24	0,00	0,0	0
Tarefa 17	24	0,00	0,0	0
Tarefa 18	105,7	2,00	1,9	1
Tarefa 19	320,6	12,94	4,0	3
Tarefa 20	57,6	5,27	9,2	10
Tarefa 21	69,7	5,74	8,2	10
Tarefa 22	71,5	3,98	5,6	5
Tarefa 23	95,3	4,32	4,5	3
Tarefa 24	168,2	5,92	3,5	2
Tarefa 25a	62,2	3,29	5,3	4
Tarefa 25b	27,8	1,93	7,0	7
Tarefa 26	230	0,00	0,0	0
Tarefa 27	57,6	4,14	7,2	8

Continua...

... continuação

Tarefas de montagem	tmed (seg.)	σ (seg.)	CV (%)	n
Tarefa 28	186,7	12,28	6,6	7
Tarefa 29a	72,3	3,30	4,6	3
Tarefa 29b	86,9	4,51	5,2	4
Tarefa 30	44	0,94	2,1	1
Tarefa 31	39,5	3,10	7,8	9
Tarefa 32a	225	0,00	0,0	0
Tarefa 32b	295	0,00	0,0	0
Tarefa 33a	60	0,00	0,0	0
Tarefa 33b	50	0,00	0,0	0
Tarefa 34a	108,3	5,38	5,0	4
Tarefa 34b	96,1	6,24	6,5	6
Tarefa 35a	99,9	3,93	3,9	2
Tarefa 35b	81	1,56	1,9	1
Tarefa 36a	84,4	5,70	6,8	7
Tarefa 36b	75,5	2,92	3,9	2
Tarefa 37	31,7	2,54	8,0	10
Tarefa 38a	89,5	4,55	5,1	4
Tarefa 38b	47,9	2,38	5,0	4
Tarefa 39	30,2	2,44	8,1	10
Tarefa 40	147,5	3,03	2,1	1

Observando os valores encontrados para o coeficiente de variação, determinou-se que a linha analisada possui tempos aproximadamente determinísticos para as tarefas de montagem, ou seja, a variação existente entre os tempos de execução das tarefas é relativamente pequena. Isso se deve ao fato de que, para nenhuma das 40 tarefas, o coeficiente de variação foi maior que 10%, valor assumido nesta dissertação como limite para a variabilidade apresentada por uma dada variável aleatória ser considerada moderada.

4.1.3 *Contextualização Final do Sistema Produtivo a ser Balanceado*

Para a contextualização final do sistema produtivo realizaram-se verificações de campo na empresa, as quais permitiram identificar a configuração da linha analisada como uma configuração em formato tradicional. Essa informação, aliada àquela obtida na etapa anterior, a qual identificou a natureza dos tempos de processamento das tarefas como aproximadamente determinística, são a base para a contextualização final do sistema produtivo.

De posse das informações acima citadas, verificou-se, através da Figura 23, que suas características encontravam-se relacionadas nas possíveis classificações apresentadas pelo

esquema, possibilitando a realização do balanceamento da linha a partir da sistemática proposta no presente trabalho e, dessa forma, contextualizando de forma final o sistema produtivo.

4.2 ETAPA II – ESCOLHA DO PROCEDIMENTO PARA O BALANCEAMENTO DA LINHA DE MONTAGEM

A escolha do procedimento de balanceamento foi realizada da seguinte maneira: em uma primeira etapa associou-se a linha analisada às classificações Tempo determinístico - Caso simples e Tempo determinístico – Caso genérico apresentadas na Figura 16. Os procedimentos incluídos nessas classificações incluem tanto a natureza aproximadamente determinística, quanto a configuração de linha em formato tradicional.

Após a identificação inicial dos procedimentos, analisou-se a descrição dos mesmos nas seções 2.4.4 e 2.4.5, sendo escolhido o procedimento desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002) como o mais representativo da situação analisada. A escolha do procedimento se deu pelos seus objetivos, os quais consistem em balancear a linha tanto de forma vertical quanto horizontal, além de possibilitar fatores como restrições de zoneamento e a criação de estações de trabalho paralelas, caso seja necessário.

4.3 ETAPA III – DEFINIÇÃO DAS INFORMAÇÕES E INDICADORES DE DESEMPENHO A SEREM COLETADOS

A seguir são descritos os dois passos executados para definição das informações necessárias tanto para realização do balanceamento, quanto para o cálculo dos indicadores de desempenho.

4.3.1 *Definição das informações sobre produtos e fluxos da linha*

A partir da visualização da Figura 24, foram definidas as informações necessárias à aplicação do procedimento desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002); são elas: (i) identificação dos modelos, (ii) identificação das tarefas de montagem, (iii) tempo de

processamento das tarefas de montagem, (iv) diagrama de precedência equivalente e, (v) demanda diária por cada modelo.

4.3.2 *Definição dos indicadores de desempenho*

Primeiramente foram definidos quais indicadores refletiam as melhorias necessárias na linha em estudo. Entre as principais necessidades, o aumento da produtividade foi considerado de suma importância, devido ao crescimento expressivo na demanda do produto; assim, o indicador produtividade foi escolhido. Em conjunto, optou-se pelos indicadores atraso de balanceamento e índice de suavidade, os quais possibilitam verificar se a execução do balanceamento foi bem sucedida em relação à distribuição das tarefas às estações de trabalho.

De posse dos indicadores de desempenho definiu-se, a partir da Figura 25, quais informações deveriam ser coletadas para obtenção dos mesmos; são elas: (i) tempo de produção diário, (ii) tempo de ciclo, (iii) tempo de processamento das tarefas de montagem, e (iv) identificação das estações de trabalho.

Após a realização dos dois passos, fez-se um cruzamento entre as informações definidas em cada um, obtendo de forma final a lista de informações a serem coletadas na próxima etapa: (i) identificação dos modelos, (ii) identificação das tarefas de montagem, (iii) identificação das estações de trabalho, (iv) tempo de processamento das tarefas de montagem, (v) diagrama de precedência equivalente, (vi) demanda diária por cada modelo, (vii) tempo de ciclo. A informação referente ao tempo de produção diário é obtida para o cálculo do tempo de ciclo.

4.4 **ETAPA IV – COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A REALIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO E OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO**

A *identificação do número de modelos* produzido pela linha de montagem foi obtida através de entrevistas com o seu coordenador, as quais possibilitaram a identificação de 4 diferentes modelos de refrigeradores fabricados pela linha; são eles: (i) Modelo V400C – 1,

(ii) Modelo V400C – 2, (iii) Modelo V4000 e (iv) Modelo C400. A descrição das características principais de cada modelo é apresentada na Figura 31.

Identificação de modelo	Descrição do modelo
Modelo V400C - 1	Refrigerador menor branco
Modelo V400C - 2	Refrigerador menor c/ adesivo
Modelo V400	Refrigerador maior c/ adesivo
Modelo C400	Cervejeira

Figura 31 Identificação dos modelos produzidos pela linha de montagem

A *identificação das tarefas de montagem* ocorreu através de entrevistas de forma a obter as informações descritas anteriormente pelo Capítulo 3, as quais possibilitaram obter também a *identificação das estações de trabalho* existentes na linha de montagem.

Na Tabela 3, na qual são apresentadas as informações obtidas, a denominação das tarefas é a mesma utilizada na Etapa II, ou seja, a Tarefa 1 existente na Tabela 2 é a mesma Tarefa 1 existente na Tabela 3.

Tabela 3 - Identificação das tarefas executadas pela linha de montagem

Tarefas	Descrição da tarefa de montagem	Estação de Trabalho	Relações de Precedência	Modelos			
				V400C - 1	V400C - 2	V400	C400
Tarefa 1	Preparação painel traseiro	1	-	X	X	X	X
Tarefa 2	Preparação caixa interna	1	-	X	X	X	X
Tarefa 3	Furo da base	1	-	X	X		
Tarefa 4	Preparação painel lateral	1	-	X	X	X	X
Tarefa 5	Aplicação adesivos laterais	1	4	X	X	X	X
Tarefa 6	Preparação do fundo da base	2	-	X	X	X	X
Tarefa 7	Montagem topo do gabinete	2	-	X	X	X	X
Tarefa 8	Pré-montagem do gabinete	3	1, 2, 3, 5, 6 e 7	X	X	X	X
Tarefa 9	Fechamento do gabinete	3	8	X	X	X	X
Tarefa 10	Tempo de estufa	4	9	X	X	X	X
Tarefa 11	Transporte gabinete ao molde	4	10	X	X	X	X
Tarefa 12	Injeção de P.U.	5	11	X	X	X	X
Tarefa 13	Desmolde do gabinete	5	12	X	X	X	X

Continua...

... continuação

Tarefas	Descrição da tarefa de montagem	Estação de Trabalho	Relações de Precedência	Modelos			
				V400C - 1	V400C - 2	V400	C400
Tarefa 14	Instalação rede elétrica + evaporadora + dobradiça + motoventilador	6	13			X	X
Tarefa 15	Instalação rede elétrica + evaporadora + dobradiça + linha de sucção	6	13	X	X		
Tarefa 16	Transporte vertical do gabinete	6	14			X	X
Tarefa 17	Transporte vertical gabinete	6	15	X	X		
Tarefa 18	Fixação linha de sucção	7	16			X	X
Tarefa 19	Fixação sistema refrigeração	7	17 e 18	X	X	X	X
Tarefa 20	Fixação tampa motoventilador	8	16			X	X
Tarefa 21	Fixação suporte lâmpada	8	17	X	X		
Tarefa 22	Fixação caixa elétrica	8	16			X	X
Tarefa 23	Fixação motoventilador + ligação elétrica	8	21	X	X		
Tarefa 24	Ligação elétrica + acabamento caixa elétrica	8	22			X	X
Tarefa 25	Fixação porta	8	16 e 17	X	X	X	X
Tarefa 26	Tempo de vácuo	9	19 e 25	X	X	X	X
Tarefa 27	Aplicação carga de gás	10	26	X	X	X	X
Tarefa 28	Fixação sistema de ventilação	10	27	X	X	X	X
Tarefa 29	Teste elétrico e de vazamento	11	20, 23, 24 e 28	X	X	X	X
Tarefa 30	Fixação grade de serviço	11	29	X	X	X	X
Tarefa 31	Fixação do avental	11	28	X	X	X	X
Tarefa 32	Teste de <i>performance</i>	12	30	X	X	X	X
Tarefa 33	Fio elétrico	13	32	X	X	X	X
Tarefa 34	Limpeza final	13	32	X	X	X	X
Tarefa 35	Colocação prateleiras internas	13	34	X	X	X	X
Tarefa 36	Fixação cantoneira traseira	14	33	X	X	X	X
Tarefa 37	Adesivos	14	34	X	X		
Tarefa 38	Colocação isopores laterais	14	31, 35, 36 e 37	X	X	X	X
Tarefa 39	Plástico embalagem	14	38	X	X	X	X
Tarefa 40	Encolhimento do plástico	14	39	X	X	X	X

O *tempo de processamento das tarefas de montagem* consiste na mesma informação obtida através da pré-coleta realizada na Etapa II. No entanto, a fim de verificar se a quantidade de observações era suficiente para que o tempo médio fosse representativo da população, calculou-se o tamanho ideal da amostra através da expressão (45).

Como sugerido na seção 3.7, inseriu-se uma coluna na Tabela 2 a fim de facilitar a operacionalização dos dados. Observando na tabela os valores encontrados para n , constatou-se que nenhum superou o número de 10 observações por amostra. O pequeno número de amostras demandado pode ser explicado pelos baixos valores observados para os CV s na mesma tabela. Desse modo, a coleta realizada na Etapa II do presente capítulo foi considerada suficiente para que o tempo médio calculado seja representativo da população e, dessa forma, utilizado na realização do balanceamento.

A *demanda diária por cada modelo* é apresentada na Tabela 4. De acordo com o procedimento já selecionado, a coleta dessa informação deu-se em número de unidades de cada modelo. É importante destacar que os dados refletem a demanda que se deseja atingir a partir do balanceamento da linha.

Além disso, considerou-se a existência de flutuações de demanda ao longo do ano. Desse modo, a demanda pelos modelos utilizada no presente trabalho reflete um período específico do ano, referente aos meses de dezembro a março.

Tabela 4 - Demanda por cada modelo produzido na linha

Modelo	Demanda (unid.)
Modelo V400C - 1	8
Modelo V400C - 2	22
Modelo V400	5
Modelo C400	20

Para o cálculo do *tempo de ciclo* da linha foram obtidas informações a respeito do tempo disponível para a produção e da produção total por turno de trabalho. O tempo disponível para produção, bem como o número médio de refrigeradores produzidos por turno pela linha atualmente, foi definido pelo coordenador da linha como 480 minutos/turno e 42 refrigeradores (incluindo todos os modelos). No procedimento escolhido para o balanceamento da linha, o tempo disponível para produção corresponde ao horizonte de planejamento (P).

A partir dos dados obteve-se um tempo de ciclo igual a:

$$C = \frac{480}{42} = 11,43 \text{ min} = 685,7 \text{ seg.} \quad (46)$$

É válido lembrar que o tempo de ciclo aqui apresentado será utilizado para cálculo dos indicadores de desempenho antes da realização do balanceamento, justificando a utilização dos números de produção acima mencionados.

O *diagrama de precedência equivalente* foi obtido através da aplicação do procedimento apresentado na seção 2.4.1.1, sendo que as informações utilizadas na sua execução foram retiradas da Tabela 3. Os diagramas de precedência referentes a cada modelo fabricado pela linha, bem como suas respectivas matrizes de precedências, são apresentadas no Apêndice 2 desta dissertação. A Figura 32 apresenta o diagrama de precedência obtido para a linha de montagem analisada.

Em conjunto ao diagrama equivalente, a Tabela 6 apresenta os tempos de processamento equivalentes das tarefas, os quais foram obtidos de acordo com o procedimento apresentado na seção 2.4.1.1, o qual coincide com o desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002) (ver seção 2.4.8.1). Desse modo, primeiramente foi calculada a proporção relativa à demanda de cada modelo, q_m [ver expressão (15)], a qual é apresentada na Tabela 5. Após, realizou-se o somatório dos tempos de execução da tarefa para cada modelo, multiplicado pela respectiva proporção de demanda do modelo. É importante ressaltar que a proporção de cada modelo foi calculada a partir da demanda projetada.

Tabela 5 - Percentagem de cada modelo produzido pela linha

$q_{V400C-1}$ (%)	$q_{V400C-2}$ (%)	q_{V400} (%)	q_{C400} (%)
0,15	0,40	0,09	0,36

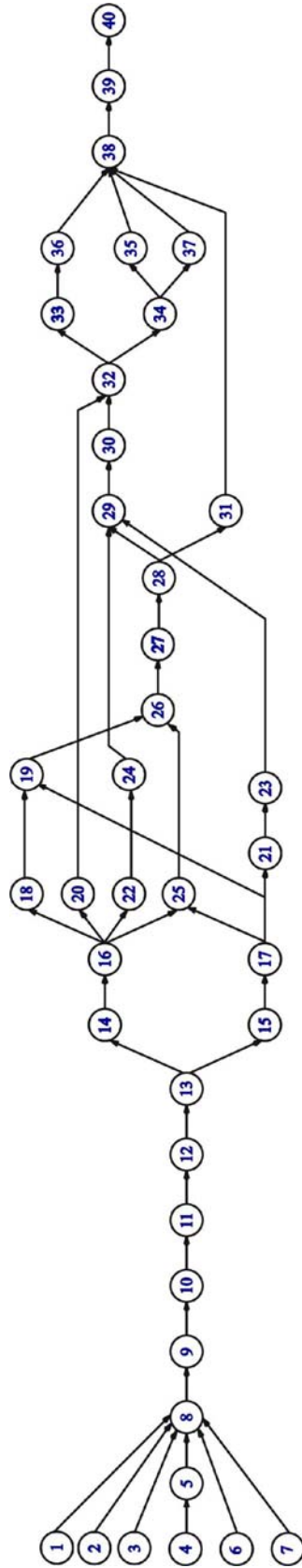


Figura 32 Diagrama de precedência equivalente

Tabela 6 - Cálculo do Tempo de Processamento equivalente

Tarefa	$t_{v400C-1}$ (s)	$t_{v400C-2}$ (s)	t_{v400} (s)	t_{C400} (s)	Tempo de processamento equivalente (s)
1	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8
2	55,4	55,4	54,3	54,3	54,905
3	171,1	171,1	0	0	94,105
4	61	61	61	61	61
5	164,8	164,8	164,8	164,8	164,8
6	135,3	135,3	135,3	135,3	135,3
7	58,1	58,1	63,4	63,4	60,485
8	336	336	321,5	321,5	329,48
9	107,6	107,6	107,6	107,6	107,6
10	120	120	120	120	120
11	30	30	30	30	30
12	225	225	225	225	225
13	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
14	0	0	522,4	522,4	235,08
15	333,1	333,1	0	0	183,21
16	0	0	24	24	10,8
17	24	24	0	0	13,2
18	0	0	105,7	105,7	47,565
19	320,6	320,6	320,6	320,6	320,6
20	0	0	57,6	57,6	25,92
21	69,7	69,7	0	0	38,335
22	0	0	71,5	71,5	32,175
23	95,3	95,3	0	0	52,415
24	0	0	168,2	168,2	75,69
25	62,2	62,2	62,2	27,8	49,816
26	230	230	230	230	230
27	57,6	57,6	57,6	57,6	57,6
28	186,7	186,7	186,7	186,7	186,7
29	72,3	72,3	86,9	86,9	78,87
30	44	44	44	44	44
31	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
32	225	225	295	295	256,5
33	60	60	50	50	55,5
34	108,3	108,3	96,1	96,1	102,81
35	99,9	99,9	81	81	91,395
36	84,4	84,4	75,5	75,5	80,395
37	31,7	31,7	0	0	17,435
38	89,5	89,5	47,9	47,9	70,78
39	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2
40	147,5	147,5	147,5	147,5	147,5

4.5 ETAPA V – REALIZAÇÃO DO BALANCEAMENTO

A partir da análise do procedimento de balanceamento apresentado pelos autores Vilarinho e Simaria (2002), decidiu-se utilizar o cálculo manual com o auxílio de planilha

eletrônica na implementação do mesmo. Desse modo, a rotina de cálculos para realização do balanceamento da linha de montagem foi inserida em planilha eletrônica, a fim de facilitar a obtenção da solução final.

A solução apresentada pelos autores inclui a realização de dois passos com o objetivo de encontrar o resultado ótimo de balanceamento. Seguindo a metodologia sugerida, primeiramente aplicou-se a heurística *Rank Positional Weight* (RPW) (ver seção 2.4.8.1) aos dados coletados, com as alterações propostas para o ambiente multi-modelos. A partir desta heurística, obteve-se a Solução Inicial – Primeiro Passo, a qual é apresentada na Figura 33, para a linha de montagem analisada. É importante destacar nesta fase que a empresa, por motivos de custo, impossibilitou a duplicação de estações de trabalho. Além disso, a partir da análise das tarefas de montagem, não se constatou a necessidade de aplicação de restrições de zoneamento ao problema.

De posse da solução inicial, foram realizados Movimentos de Troca e Transferência (ver seção 2.4.8.1) de forma a atingir o objetivo principal do problema, isto é, reduzir o número de estações de trabalho. Ao final desse estágio, obteve-se a Solução Final – Primeiro Passo, com um total de 9 estações de trabalho. A Figura 33 apresenta a distribuição das tarefas às estações de trabalho, bem como os valores encontrados para o BDT [ver eq. (27)], para o índice de balanceamento da carga de trabalho entre as estações, B_{b-s} , e dentro de cada estação, B_{w-s} . Nesse passo, o critério utilizado para avaliar as soluções vizinhas corresponde ao valor encontrado para o BDT , o qual é equivalente ao expresso no primeiro termo da função objetivo do modelo de programação matemática apresentada pelos autores; os dois índices seguintes correspondem ao segundo e terceiro termos da mesma função.

Solução Inicial - Primeiro Passo		Solução Final - Primeiro Passo	
Estação de trabalho	Tarefas	Estação de trabalho	Tarefas
Estação de trabalho 1	4, 3, 5	Estação de trabalho 1	2, 3, 4, 5, 7
Estação de trabalho 2	6, 7, 2, 1	Estação de trabalho 2	1, 6, 8
Estação de trabalho 3	8, 9	Estação de trabalho 3	9, 10, 11, 12, 13
Estação de trabalho 4	10, 11, 12, 13	Estação de trabalho 4	14, 15, 17, 21, 23
Estação de trabalho 5	14	Estação de trabalho 5	16, 18, 19, 25, 22
Estação de trabalho 6	15, 16, 17, 18	Estação de trabalho 6	26, 27, 28
Estação de trabalho 7	19, 25	Estação de trabalho 7	24, 29, 20, 30, 31
Estação de trabalho 8	26, 27, 22	Estação de trabalho 8	32, 33, 34, 35
Estação de trabalho 9	18, 24, 21, 23	Estação de trabalho 9	36, 37, 38, 39, 40
Estação de trabalho 10	29, 20, 30, 32	<i>BDT</i>	11,03 min.
Estação de trabalho 11	33, 34, 35, 31, 36, 37, 38	<i>B_{b-s}</i>	0,14
Estação de trabalho 12	39, 40	<i>B_{w-s}</i>	0,27
<i>BDT</i>	37,6 min.		
<i>B_{b-s}</i>	0,04		
<i>B_{w-s}</i>	0,28		

Figura 33 Soluções inicial e final do primeiro passo

No segundo passo do procedimento, novos Movimentos de Troca e Transferência foram realizados, mas com o objetivo de balancear simultaneamente a carga de trabalho entre e no interior das estações. A solução inicial neste passo corresponde à solução final encontrada no passo anterior. O critério utilizado para avaliar as soluções vizinhas geradas neste estágio provém diretamente dos valores obtidos para B_{b-s} e B_{w-s} . A Figura 34 apresenta a Solução Final – Segundo Passo encontrada para a linha de montagem analisada.

Solução Final - Segundo Passo		
Estações de trabalho	Tarefas	Tempo de Ciclo
Estação de trabalho 1	1, 2, 3, 4, 6, 7	436,6
Estação de trabalho 2	5, 8	494,3
Estação de trabalho 3	9, 10, 11, 12, 13	509,0
Estação de trabalho 4	14, 15, 17, 21	469,8
Estação de trabalho 5	16, 18, 19, 22	411,1
Estação de trabalho 6	23, 24, 25, 26, 27	465,5
Estação de trabalho 7	20, 28, 29, 30, 31	375,0
Estação de trabalho 8	32, 33, 34, 37	432,2
Estação de trabalho 9	35, 36, 38, 39, 40	420,3
<i>BDT</i>	11,65 min.	
<i>B_{b-s}</i>	0,08	
<i>B_{w-s}</i>	0,27	

Figura 34 Solução final

4.6 ETAPA VI – COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO APÓS O BALANCEAMENTO

Após a realização do balanceamento, foi necessário realizar uma nova coleta de dados, a fim de obter valores para os indicadores de desempenho que refletissem a nova condição da linha. As informações coletadas foram as mesmas anteriormente determinadas no Passo 2 da Etapa V; ou seja: (i) tempo de produção diário, (ii) tempo de ciclo, (iii) tempo de processamento das tarefas de montagem, e (iv) identificação das estações de trabalho. Como o *tempo de produção diário* e o *tempo de processamento das tarefas* não sofreram alterações, foram utilizados os mesmos dados apresentados na Etapa VI.

Para o cálculo do *tempo de ciclo* da linha, alterou-se a informação relacionada a produção total por turno de trabalho. A partir da realização do balanceamento, o número de refrigeradores produzidos por turno de trabalho passou a ser considerado como 55 unidades (incluindo todos os modelos).

A partir dos dados obteve-se um tempo de ciclo igual a:

$$C = \frac{480}{55} = 8,73 \text{ min} = 523,6 \text{ seg.} \quad (47)$$

A identificação das estações de trabalho pode ser visualizada na Figura 34.

4.7 ETAPA VII – AVALIAÇÃO DO BALANCEAMENTO ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS INDICADORES OBTIDOS ANTES E APÓS A SUA REALIZAÇÃO

De posse dos dados coletados a respeito da linha antes e após a realização do balanceamento, foi possível calcular os indicadores de desempenho e avaliar o balanceamento através da comparação desses resultados. É importante destacar que para o cálculo dos indicadores foram considerados os tempos de processamento equivalentes das tarefas de montagem.

A Tabela 7 apresenta os valores encontrados para cada indicador antes e após a realização do balanceamento, bem como a melhoria obtida nos mesmos.

Tabela 7 - Indicadores de desempenho antes e após o balanceamento

Indicadores	Antes do balanceamento	Após o balanceamento	Melhoria obtida (%)
Produtividade da linha/turno (unid)	42	55	31%
Atraso de balanceamento (%)	58,2	14,8	74,5%
Índice de Suavidade (min)	11,3	3,7	67%

Observando os valores obtidos, torna-se evidente a importância do balanceamento como forma de melhorar o processo produtivo de uma linha de montagem. Analisando primeiramente a melhoria nos indicadores Atraso de balanceamento e Índice de suavidade, sendo estas de 74,5% e 67% respectivamente, verifica-se a eficiência do procedimento de balanceamento em diminuir o tempo ocioso da linha de montagem, através de uma melhor distribuição das tarefas às estações de trabalho.

Já o indicador referente à produtividade da linha obteve uma melhoria de 31%, menor em relação aos outros indicadores, mas não menos significativa. A partir da diminuição do tempo ocioso da linha, foi possível aumentar sua produção em 13 refrigeradores por turno de trabalho.

A partir dos resultados acima destacados, é possível verificar a eficácia da sistemática proposta para o balanceamento de linhas multi-modelos (avaliação positiva), em particular quando utilizada em conjunto com o procedimento de otimização desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002). Além disso, é importante ressaltar o baixo custo associado à sua aplicação e posterior utilização prática na linha de montagem, já que não houve duplicação de postos de trabalho após o balanceamento.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A realização desta dissertação de mestrado permitiu a formulação de algumas conclusões a respeito da aplicação do balanceamento em linhas de montagem multi-modelos, bem como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo principal a apresentação de uma sistemática para aplicação de procedimentos de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos. O método proposto é fundamentado na escolha de um procedimento desenvolvido para balancear linhas multi-modelos e na aplicação deste à informações coletadas em uma linha de produção onde ocorrem alterações freqüentes do modelo de produto fabricado. A revisão do estado da arte do problema e a utilização de indicadores de desempenho a fim de avaliar o procedimento aplicado foram objetivos específicos do trabalho.

Através da revisão bibliográfica buscou-se apresentar, de forma genérica, assuntos pertinentes ao tema desta dissertação, como customização em massa, *layout* e linhas de montagem uni-modelo. A seguir, enfatizaram-se as linhas de montagem multi-modelos, apresentando suas principais características e realizando uma classificação dos mais recentes procedimentos desenvolvidos para o seu balanceamento, sendo descrito brevemente cada procedimento citado na classificação. Finalizando, detalhou-se a metodologia operacional de obtenção da solução de dois dos procedimentos classificados.

A sistemática proposta nesta dissertação foi ilustrada através de um estudo de caso, onde a alternância dos modelos do produto produzidos na linha teve seu impacto reduzido em termos de produtividade e tempo ocioso a partir do balanceamento.

As informações coletadas a respeito da linha de montagem analisada no estudo de caso foram aplicadas ao procedimento desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002) para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelos, sendo este escolhido por melhor se adequar a situação em estudo. Como forma de auxiliar na obtenção da solução final, a rotina de cálculos desenvolvida pelos autores foi inserida em uma planilha eletrônica.

A fim de comprovar a eficiência do procedimento escolhido, foram utilizados indicadores de desempenho que refletissem as necessidades da linha de montagem analisada. Desse modo, o cálculo dos indicadores utilizados foi realizado antes e após o balanceamento da linha de montagem.

A sistemática mostrou-se eficiente no sentido de otimizar as etapas do processo necessárias a aplicação da ferramenta de balanceamento, bem como na organização e coleta dos dados. Da mesma forma, o procedimento desenvolvido por Vilarinho e Simaria (2002) mostrou-se eficaz na redução do tempo ocioso da linha, bem como no seu aumento de produtividade, sendo que este indicador obteve uma melhora de 31%.

No entanto, a realização do estudo mostrou a necessidade de uma etapa adicional à sistemática proposta, referente à organização de uma equipe de trabalho com a finalidade de agilizar a coleta das informações necessárias. Esta etapa seria a primeira a ser realizada.

O estudo de caso possibilitou uma integração entre a Universidade e a empresa onde foi desenvolvido o estudo, proporcionando a mesma, benefícios através da sistemática desenvolvida. Desde o início do trabalho a empresa se mostrou interessada, percebendo a possibilidade de otimização do seu sistema produtivo. A resistência dos operadores da linha, inicialmente constatada na etapa de coleta de dados, foi rapidamente superada ao serem expostas as potenciais melhorias obtidas através da implementação do balanceamento.

Considera-se aqui que a não implementação do balanceamento à linha de montagem analisada não compromete a validade da sistemática proposta, visto que a mesma é destinada somente às etapas necessárias para realização do balanceamento, e não à determinação de

ações gerenciais para sua implementação e acompanhamento. Via de regra, essas ações estão relacionadas ao gerenciamento da rotina de fábrica, não tratadas neste trabalho.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O estudo aqui desenvolvido pode ser estendido além dos limites desta dissertação de mestrado. Na seqüência são apresentadas sugestões de estudos futuros através do estudo do balanceamento em linhas de montagem.

Inicialmente, acredita-se ser importante utilizar a sistemática aqui proposta em novos estudos de caso, a fim de verificar sua aplicabilidade de forma mais abrangente, contemplando um maior número de características específicas. Além disso, a implementação do balanceamento à linha de montagem e a medição dos indicadores *in loco* permitiria comprovar de forma mais efetiva a sua eficácia.

A sistemática desenvolvida limita-se a linhas de montagem voltadas para produção de múltiplos modelos, a elaboração de uma sistemática mais abrangente, envolvendo diversos tipos de layout, permitiria a sua utilização em uma gama maior de situações. Neste caso, recomenda-se a elaboração de uma árvore de decisão para a escolha dos procedimentos, incluindo seus objetivos, restrições e características mais específicas do *layout*, o que facilitaria a decisão pelo procedimento a ser utilizado e atualização da sistemática a partir da inclusão de novos procedimentos.

A rotina de cálculos empregada para obtenção da solução final não se mostrou complexa, no entanto, seria interessante programar esta rotina de maneira a facilitar, bem como reduzir a possibilidade de erros, na realização do balanceamento. Além disso, devido à necessidade de se realizar um novo balanceamento à medida que novos modelos são incluídos no *mix* de produção, bem como na alteração dos tempos de processamento e precedências das tarefas realizadas na linha, a necessidade de programação da rotina de cálculos torna-se mais evidente.

REFERÊNCIAS

- ASKIN, R. G.; ZHOU, M. A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 11, p. 3095-3105, 1997.
- BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**. 7° ed. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 1999.
- BECKER C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft**, n. 21, FSU Jena, 2003.
- BENGTSSON, J.; OLHAGER, J. The impact of the product mix on the value of flexibility. **Omega**, v. 30, p. 265-273, 2002.
- BORBA, M. **Arranjo físico – material de suporte**. UFSC, Florianópolis, 1998.
- BUKCHIN, J.; DAR-EL, E. M.; RUBINOVITZ, J. Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. **Computers & Industrial Engineering**, v. 41, p. 405-421, 2002.
- BUKCHIN, J.; TZUR, M. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. **IIE Transactions**, v. 32, p. 585-598, 2000.
- CHOW, W-M. **Assembly line design: Methodology and Applications**. Marcel Dekker, Inc.. New York, 1990.
- DAVIS, S. M. “From Future Perfect”: Mass Customization. **Planning Review**, p. 16-21, 1989.

DA SILVA, A. L.; RENTES, A. F. Tornando o Layout enxuto com base no conceito de mini-fábricas num ambiente de multi-produtos: um estudo de caso. **Anais do XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**. Curitiba, PR, 2002.

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

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

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy Management Review**, v.14, n.4, p. 532-550, 1989.

EREL, E.; SABUNCUOGLU, I.; AKSU, B. A. Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 13, p. 3003-3015, 2001.

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

EREL, E.; SARIN, S. C. A survey of the assembly line balancing procedures. **Production Planning & Control**, v. 9, n. 5, p. 414-434, 1998.

FLESZAR, K.; HINDI, K. S. An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. **European Journal of Operational Research**, n. 145, p. 606-620, 2003.

FRUTOS, J. D.; BORENSTEIN, D. A framework to support customer-company interaction in mass customization environments. **Computers in Industry**, v. 54, p. 115-135, 2004.

GERWIN, D. Manufacturing flexibility: A strategic perspective. **Management Science**, v. 39, n. 4, p. 395-410, 1993.

GHOSH, S.; GAGNON, R. J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. **International Journal of Production Research**, v. 27, n. 4, p. 637-670, 1989.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**, 3^a ed., Ed. Atlas, São Paulo, 1991.

GROOVER, M. P. **Automation, production, and computer-integrated manufacturing**. 2^a ed., Prentice Hall. New Jersey, 2000.

GOKCEN, H.; BAYKOC, F. A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times. **International Journal of Production Economics**, v. 58, p. 191-197, 1999.

GILMORE, J. H.; PINE II, B. J. The Four Faces of Mass Customization. **Harvard Business Review**. V.75, n.1, p.91-101, 1997.

GUPTA, Y. P.; SOMERS, T. M. The measurement of manufacturing flexibility. **European Journal of Operations Research**, v. 60, p. 160-182, 1992.

GUNTHER, R.E.; JOHNSON, G. D.; PETERSON, R.S. Currently practised formulations for the assembly line balancing problem. **Journal of Operations Management**, v. 3, n. 4, p. 209-221, 1983.

GUTJAHR, A.L.; NEMHAUSER, G.L. An algorithm for the assembly line balancing problem. **Management Science**, v. 11, n. 2, p. 308-315. 1964.

HEIKE, G.; RAMULU, M.; SORENSON, E.; SHANAHAN, P.; MOINZADEH, K. Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry. **International Journal of Production Economics**, v. 72, p. 103-120, 2001.

JIAO, J.; MA, Q.; TSENG, M. M. Towards high value-added products and services: mass customization and beyond. **Technovation**, v. 23, p. 809-821, 2003.

JOHNSON, R. V. A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulations irregularities. **Management Science**, v. 29, n. 11, p. 1309-1324, 1983.

KARABATI, S.; SAYIN, S. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfer. **European Journal of Operational Research**, v. 149, p. 417-429, 2003.

KHAN, A.; DAY, A. J. A Knowledge Based Design Methodology for manufacturing assembly lines. **Computers & Industries Engineering**, v. 41, p. 441-467, 2002.

KILBRIDGE, M. D.; WESTER, L. A heuristic method of assembly line balancing. **Journal of Industrial Engineering**, v. 12, n. 4, p. 292-298, 1961.

KIM, Y. K.; KIM, Y. J.; KIM, Y. Genetic algorithms for assembly lines balancing with various objectives. **Computers & Industries Engineering**, v. 30, n. 3, p. 397-409, 1996.

KIM, Y. K.; KIM, S. J.; KIM, J. Y. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm.. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 8, p. 754-764, 2000.

KLEIN, M. On assembly line balancing. **Operations Research**, v. 11, n. 2, p. 274-281, 1963.

KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P. **Operations Management – Strategy Analysis**. 5^a ed., Ed. Addison-Wesley. Longman, Inc., 1999.

LEHMAN, M. On criteria for assigning models to assembly lines. **International Journal of Production Research**, v. 7, n. 4, 1969.

LAMPEL, J.; MINTZBERG, H. Customizing customization. **Sloan Management Review**, v. 38, p. 21-30, 1996.

LEE, T. O.; KIM, Y.; KIM, Y. K. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. **Computers & Industries Engineering**, v. 40, p. 273-292, 2001.

LYU, J. J. A Single-Run Optimization Algorithm for Stochastic Assembly Line Balancing Problems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 16, n. 3, p. 204-210, 1997.

MACASKILL, J. L. C. Production line balances for mixed model lines. **Management Science**, v. 19, n. 4, p. 423-434, 1972.

MATANACHAI, S.; YANO, C. A. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. **IIE Transactions**, v. 33, p. 29-42, 2001.

MARCHESAN, C. H.; MIORANDO, R. F.; ten CATEN, C. S. Utilização de indicadores para a avaliação de desempenho. **Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes**. Porto Alegre, RS, 2003.

McMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V. Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstation. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 10, p. 2717-2741, 1998.

McMULLEN, P. R.; TARASEWICH, P. Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. **IIE Transactions**, v. 35, p. 605-617, 2003.

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

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2ª ed., Ed. Pioneira. São Paulo, 1996.

NICOSIA, G.; PACCIARELLI, D.; PACIFICI, A. Optimally balancing assembly lines with different workstation. **Discrete Applied Mathematics**, n. 118, p. 99-113, 2002.

RAJASEKHARAN, M.; PETERS, B. A. Strategic configuration of flexible electronics assembly facilities facing stochastic requirements. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 3, p. 639-656, 2000.

NKASU, M. M.; LEUNG, K. H. A stochastic approach to assembly line balancing. **International Journal of Production Research**, v. 33, n. 4, p. 975-991, 1995.

REKIEK, B.; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A.; BRATCU, A. State of art of optimization methods for assembly line design. **Annual Reviews in Control**, v. 26, p. 163-174, 2002.

ROESCH, S. M. A. **A Dissertação de Mestrado em Administração: Proposta de Uma Tipologia**. Série documentos para estudo 14/94. Programa de Pós-graduação em Administração, Administração, UFRGS, Porto Alegre, 1994.

ROYER, R. **Metodologia para o cálculo de um indicador da viabilidade de customização de produtos manufaturados**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

RUBINOVITZ, J.; LEVITIN, G. Genetic algorithm for assembly line balancing. **International Journal of Production Economics**, v. 41, p. 343-354, 1995.

SARKER, B.R.; PAN, H. Designing a mix-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, n. 3, p. 609-628, 1998.

SARIN, S. C.; EREL, E.; DAR-EREL, E. M. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. **OMEGA**, v. 27, p. 525-535, 1999.

SCHOLL, A.; KLEIN, R. SALOME: A Bidirectional Branch-and-Bound Procedure for Assembly Line Balancing. **Journal on Computing**, v. 9, n. 4, p. 319-334, 1997.

SCHOLL, A.; KLEIN, R. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 4, p. 721-736, 1999.

SILVA, L. S.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Laboratório de Ensino a Distância, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2000.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 1ª ed., Ed. Atlas. São Paulo, 1996.

SLACK, N. **Vantagem Competitiva em Manufatura: Atingindo Competitividade nas Operações Industriais**. Ed. Atlas. São Paulo, 1993.

SNEDECOR, G. W.; COCHAREN, W. G. **Statistical methods**. 8ª ed., Ames, Iowa State University Press, 1989.

SMIDERLE, C. D.; VITO, S. L.; FRIES, C. E. A busca da eficiência e a importância do balanceamento de linhas de produção. **Anais do XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**. Gramado, RS, 1997.

SPARLING, D.; MILTENBURG, J. The mixed-model U-lines balancing problem. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 2, p. 485-501, 1998.

SPRECHER, A. Dynamic search tree decomposition for balancing assembly lines by parallel search. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 7, p. 1413-1430, 2003.

SÜER, G. A. Designing parallel assembly lines. **Computers & Industrial Engineering**, v. 35, n. 3-4, p. 467-470, 1998.

SURESH, G.; SAHU, S. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 8, p. 1801-1810, 1994.

TALBOT, F. B.; PATTERSON, J. H. An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. **Management Science**, v. 30, n. 1, p. 85-99, 1984.

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

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

TOMPKINS, J. A.; WHITE, J. A.; BOZER, Y. A.; FRAZELLE, E. H.; TANCHOCO, J. M. A.; TREVINO, J. **Facilities planning**. 2ª ed., John Wiley. New York, 1996.

TREIN, F. A. **Análise e Melhoria de Layout de Processo na Indústria de Beneficiamento de Couro. Dissertação de Mestrado**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

UPTON, D. M. What really makes factories flexible? **Harvard Business Review**, v. 73, n. 4, p. 74-84, 1995.

VAN ZANTE-DE FOKKERT, J. I.; DE KOK, T. G. The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. **European Journal of Operational Research**, v. 100, p. 399-412, 1997.

VILARINHO, P.; SIMARIA, AS. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 6, p. 1405-1420, 2002.

ZHANG, Q.; VONDEREMBSE, M. A.; LIM, JS. Manufacturing flexibility: defining and analysing relationships among competence, capability, and customer satisfaction. **Journal of Operations Management**, v. 21, p. 173-191, 2003.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**, 2ª ed., Porto Alegre, Ed. Bookman, 2001.

APÊNDICE 1

Neste Apêndice, estão detalhados os tempos coletados para as tarefas de montagem.

Tarefas de montagem	Tempos de processamento (segundos)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tarefa 1	34	36	29	31	31	30	28	29	31	29
Tarefa 2a	55	60	56	57	54	51	58	62	48	53
Tarefa 2b	53	53	53	51	53	54	60	55	58	53
Tarefa 3	165	161	167	156	187	166	169	181	162	197
Tarefa 4	56	63	61	65	64	57	60	59	68	57
Tarefa 5	168	170	184	142	148	158	180	164	160	174
Tarefa 6	151	128	121	129	140	147	138	126	126	147
Tarefa 7a	60	60	56	51	53	58	68	61	57	57
Tarefa 7b	65	63	63	61	60	65	64	63	64	66
Tarefa 8a	341	321	317	328	317	375	320	337	380	324
Tarefa 8b	323	303	323	343	330	331	323	313	331	295
Tarefa 9	97	118	105	102	99	112	97	118	119	109
Tarefa 10	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Tarefa 11	32	32	32	32	28	30	28	28	28	30
Tarefa 12	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Tarefa 13	26	27	27	27	28	26	26	26	25	26
Tarefa 14	497	548	544	505	552	492	529	524	515	518
Tarefa 15	325	342	306	345	352	301	345	350	351	314
Tarefa 16	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Tarefa 17	103	105	108	105	110	104	105	106	105	106
Tarefa 18	340	339	318	320	320	300	308	321	310	330
Tarefa 19	50	50	56	62	61	53	65	62	57	60
Tarefa 20	76	81	65	74	69	66	62	67	70	67
Tarefa 21	78	72	74	66	70	66	74	72	68	75
Tarefa 22	96	98	85	93	98	95	98	94	95	101
Tarefa 23	173	168	163	170	160	171	179	170	160	168
Tarefa 24a	65	62	60	60	62	64	64	61	56	68
Tarefa 24b	25	28	31	27	27	30	28	25	29	28
Tarefa 25	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Tarefa 26	57	52	53	56	60	63	63	56	62	54
Tarefa 27	179	191	172	183	202	173	197	208	182	180
Tarefa 28a	70	73	71	80	72	72	74	67	72	72
Tarefa 28b	93	85	82	94	80	88	86	84	90	87
Tarefa 29	44	44	43	44	45	43	43	46	44	44
Tarefa 30a	38	39	36	35	42	43	38	45	40	39
Tarefa 30b	38	39	36	35	42	43	38	45	40	39
Tarefa 31a	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Tarefa 31b	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
Tarefa 32a	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Tarefa 32b	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Tarefa 33a	104	102	118	115	111	106	107	111	107	102
Tarefa 33b	90	100	87	100	102	86	101	95	98	102
Tarefa 34a	91	97	102	99	100	101	99	105	104	101
Tarefa 34b	79	83	80	81	80	83	81	79	83	81
Tarefa 35a	93	76	82	90	92	78	82	82	84	85
Tarefa 35b	76	77	72	75	80	70	78	76	74	77
Tarefa 36	33	34	27	30	32	34	28	32	33	34
Tarefa 37a	89	80	95	92	90	85	87	93	94	90
Tarefa 37b	43	49	48	50	49	47	51	48	45	49
Tarefa 38	31	28	34	28	28	28	34	30	29	32
Tarefa 39	150	148	148	140	148	150	145	148	148	150

APÊNDICE 2

Este Apêndice traz os diagramas e matrizes de precedência dos modelos produzidos na linha de montagem.

Diagrama de Precedência Modelo V400C - 1

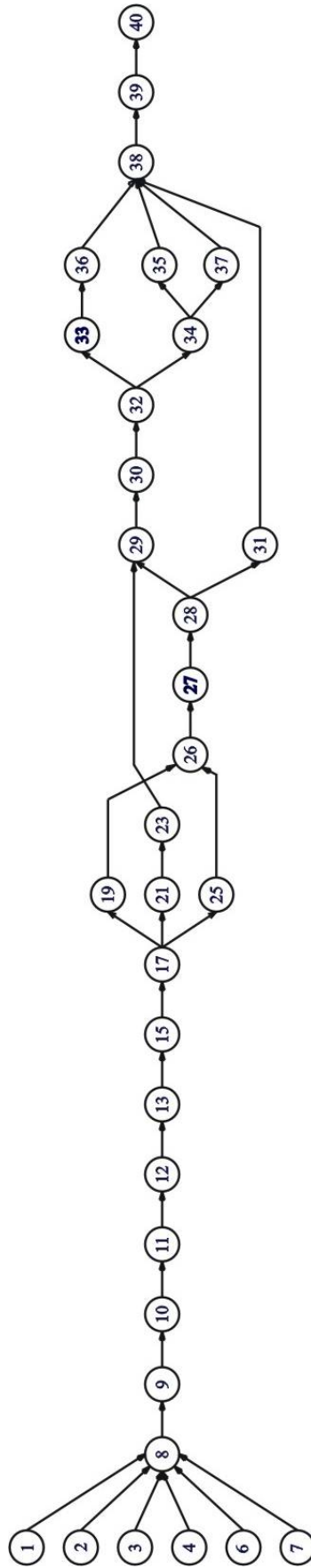


Diagrama de Precedência Modelo V400

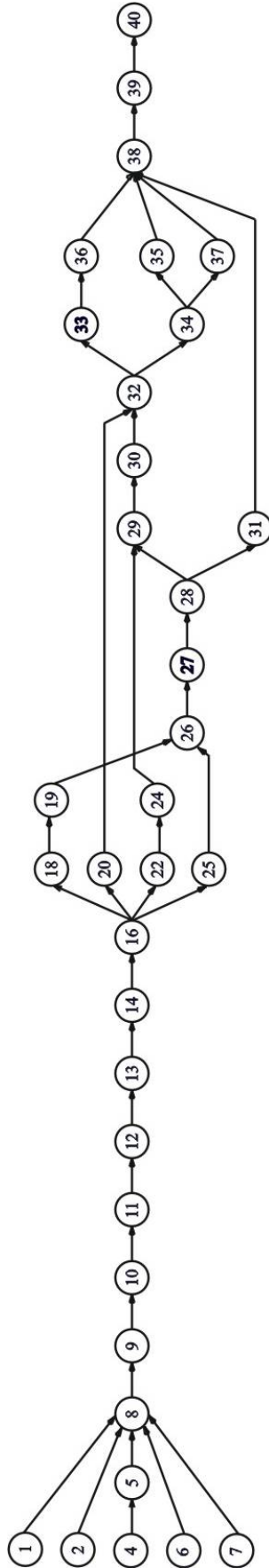


Diagrama de Precedência Modelo C400

