

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

Gustavo Reginato

MÉTODOS DE BALANCEAMENTO DE
LINHAS DE MONTAGEM UNI-MODELO E
MISTA

Porto Alegre

2014

Gustavo Reginato

Métodos de Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-modelo e Mista

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Michel José Anzanello, PhD

Porto Alegre

2014

Gustavo Reginato

Métodos de Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-modelo e Mista

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Michel José Anzanello, PhD

Orientador PPGEP / UFRGS

Prof. José Luis D. Ribeiro, Dr.

Coordenador PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Aurélio T. Salton, PhD (PPGEE/PUCRS)

Prof. Guilherme Tortorella, Dr. (UFSC)

Prof. Ricardo A. Cassel, PhD (PPGEP/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Michel José Anzanello, pela paciência, disponibilidade, dedicação e conhecimento compartilhado através dos inúmeros encontros que asseguraram e fortaleceram meu empenho para a realização desta dissertação de mestrado.

A Deus, por me iluminar durante toda esta jornada que em alguns momentos pareceu ser inacabável.

A minha mãe, meu pai, meu irmão, em especial a minha esposa pelo incentivo e pela compreensão, principalmente durante os períodos que me encontrava ausente, eles estavam sendo dedicados à conquista de um objetivo pessoal e profissional.

A empresa, em especial aos meus superiores, por nunca deixaram me fazer ausente das aulas e dos momentos necessários para a realização deste trabalho.

Por fim, gostaria de expressar também, meus agradecimentos aos professores do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes (DEPROT) pelos conteúdos ensinados e aos funcionários do DEPROT pela cordialidade e prestatividade sempre a mim dedicadas.

REGINATO, G. *Métodos de Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-modelo e Mista* 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

A concorrência nos mercados mundiais impõe a necessidade de aumento da eficiência das empresas que desejam assumir posições de liderança nos segmentos em que atuam. Neste ínterim, o balanceamento de linha de montagem assume papel fundamental ao permitir a eficiente utilização dos recursos produtivos visando à realização dos objetivos estratégicos. Esta dissertação aborda o balanceamento de linhas de montagem uni-modelo e mistas. Primeiramente, objetiva-se amenizar os impactos causados pela introdução de novos produtos em linhas de produção. Apoiada na integração da ferramenta Delphi a uma nova heurística de balanceamento uni-modelo, a sistemática foi aplicada em uma empresa de produção puxada com lote unitário de fabricação cuja linha de montagem é sujeita à introdução de novos produtos. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios em comparação à tradicional heurística de balanceamento de linha de montagem. Na sequência, objetivou-se atenuar as restrições de capacidade produtiva nas estações de trabalho de linhas de montagem mistas sujeitas a diversos mix de produtos, com a finalidade de incrementar a eficiência e capacidade produtiva da linha. O incremento da capacidade produtiva, a redução do ciclo de fabricação, o aumento da eficiência de balanceamento foram considerados satisfatórios na aplicação da heurística em uma linha de montagem mista que produz 7 modelos de produtos.

Palavras-chave: balanceamento de linha de montagem, linha de montagem mista, RPW, Delphi, novo produto

REGINATO, G. *Métodos de Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-modelo e Mista* 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

ABSTRACT

Companies aiming to assume leadership positions are required to increase their effectiveness due to competitive global markets. Thus, assembly line balancing plays a critical role in the efficient utilization of productive resources for achieving strategic goals. This dissertation focuses on the balancing of both single and mixed model assembly lines. The first goal is to mitigate impacts derived from the introduction of new products into the assembly line by associating the Delphi method with a new single-model balancing heuristic; such an approach was applied to a new product in a one-piece flow, pulled production company. Results were taken as satisfactory when compared with a traditional assembly line balancing heuristic. Next, we intended to attenuate capacity restrictions in workstations of assembly lines exposed to several combinations of products with the purpose of increasing the assembly line efficiency. The results were considered satisfactory, when aspects of production capacity, manufacturing cycle time and assembly line balancing were evaluated in a mixed assembly line with seven different products.

Key words: assembly line balance, mix-model line, RPW, Delphi, new product

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de diagrama de precedência.....	23
Figura 2.2 – Tipos de linha de montagem.....	24
Figura 2.3 – Diagrama de precedência dividido em colunas pelo método Kilbridge e Wester.....	26
Figura 2.4 – Fluxo da sistemática proposta.....	28
Figura 2.5 – Algoritmo de Transferência de Tarefas (ATT).....	32
Figura 2.6 – Fluxograma de fabricação dos produtos Alfa e Beta.....	34
Figura 2.7 – Fluxograma de fabricação do produto Zebra.....	34
Figura 3.1 – Tipos de linha de montagem.....	47
Figura 3.2 – Exemplo de diagrama de precedência.....	48
Figura 3.3 – Classificação do problema de balanceamento de LM.....	50
Figura 3.4 – Diagrama de precedência para modelo A (a) e modelo B (b).....	51
Figura 3.5 – Diagrama de precedência equivalente dos modelos A e B.....	51
Figura 3.6 – Diagrama de precedência dividido em colunas pelo método Kilbridge e Wester.....	54
Figura 3.7 – Balanceamento com heurística RPW sem AVM.....	56
Figura 3.8 – Balanceamento com heurística RPW com AVM.....	56
Figura 3.9 – Fluxograma da LM com balanceamento atual.....	59

Figura 3.10 – Balanceamento LM atual.....	61
Figura 3.11 – Diagrama de precedência equivalente.....	62
Figura 3.12 – Novo balanceamento da LM.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Quadro de aspectos e desdobramentos da coleta de informações.....	29
Quadro 2.2 – Parâmetros para interpretação dos resultados da mediana	30
Quadro 2.3 – Parâmetros para interpretação dos resultados da amplitude inter-quartil.....	30
Quadro 2.4 – Equipamentos de possível unificação Alfa+Beta e Zebra e específicos para produto Zebra.....	35
Quadro 3.1 – Alocação das tarefas as estações de trabalho para o balanceamento da LM..	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tempos de processamentos e quantidade de estações de trabalho da LM existente.....	34
Tabela 2.2 – Séria histórica de dados da linha Alfa+Beta: demanda, produtividade, sucata e rejeitos.....	35
Tabela 2.3 – Comparação de materiais comuns e específicos da linha Alfa+Beta e Zebra	36
Tabela 2.4 – Área existente da linha Alfa+Beta e adicional para produto Zebra.....	36
Tabela 2.5 – Percentual de desistência durante as rodadas do questionário.....	37
Tabela 2.6 – Resultados das rodadas de aplicação do questionário Delphi.....	37
Tabela 2.7 – Definição do tempo de ciclo para produto Zebra.....	38
Tabela 2.8 – Tempos de operação em cada estação através da heurística MRP.....	38
Tabela 2.9 – Comparação dos indicadores de desempenho da heurística RPW para MRPW.....	38
Tabela 3.1 – Tarefas executadas na LM para cada modelo.....	60
Tabela 3.2 – Definição do mix de produção.....	61
Tabela 3.3 – Tempo de processamento médio ponderado e RPW das tarefas.....	63
Tabela 3.4 – Cálculo do W	63
Tabela 3.5 – Resultados do $AVM_{j,m}$	64
Tabela 3.6 – Variáveis e Indicadores (Atual x RPW-AVM).....	65

Tabela 3.7 – Variáveis e Indicadores (RPW-AVM x RPW).....	66
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Justificativa do Tema.....	13
1.3 Objetivos.....	14
1.4 Procedimentos Metodológicos	15
1.5 Delimitações da Pesquisa	16
1.6 Estrutura da Dissertação	16
1.7 Referências	17
2. PRIMEIRO ARTIGO: SISTEMÁTICA DE DECISÃO PARA BALANCEAMENTO DE LINHA DE PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS.....	18
2.1 Introdução.....	18
2.2 Referencial Teórico	20
2.3 Método.....	27
2.4 Resultados e Discussão.....	33
2.5 Conclusão	39
2.6 Referências	39
3. SEGUNDO ARTIGO: MÉTODO DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM MISTA PARA SUPORTAR FLEXIBILIDADE DO MIX DE PRODUTOS.....	44
3.1 Introdução.....	44
3.2 Referencial teórico.....	46
3.3 Método de Trabalho.....	54
3.4 Resultados e Discussões	59
3.5 Conclusão	67
3.6 Referências	68
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
4.1 Conclusões.....	70
4.2 Sugestões para trabalhos futuros	71

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A busca dos consumidores por maior variedade e elevados níveis de qualidade dos produtos acirrou a competição entre as empresas, que sentem ainda com a redução do ciclo de vida dos produtos e conseqüente redução do tempo que uma linha de produção permanece em serviço. Assim, as empresas de manufatura, além de elaborarem produtos cada vez mais inovadores para o mercado, necessitam de tecnologias de produção mais sofisticadas, resultando em constantes reprojatos das linhas de produção com vistas ao máximo aproveitamento dos recursos disponíveis.

Em processos ideais de montagem, o produto deve fluir em sua fabricação através de um fluxo ininterrupto de agregação de valor, o que representa a redução ao máximo dos desperdícios e do prazo de entrega (SIPPER e BULFIN, 1997). Assim, linhas de montagem (LM), que são arranjos produtivos originalmente desenvolvidos para obter alto desempenho e baixo custo através da padronização dos produtos (BOYSEN et al., 2007), necessitam de constantes ajustes. Nestas circunstâncias, o *Assembly Line Balance* ou Balanceamento de linha de montagem (ALB) se torna um elemento diferenciador, que permite a minimização da ociosidade e, por conseqüência, melhor aproveitamento dos recursos e da capacidade produtiva.

O ALB trata da alocação de tarefas em uma estação de trabalho de forma que o tempo ocioso seja minimizado e as restrições de precedência sejam atendidas (REKIEK et al., 2002; BECKER e SCHOLL, 2006; KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007). Ele é aplicado quando ocorrem mudanças na LM devido a alteração de tarefas ou componentes, mudanças no tempo de processamento e também na implantação de novos produtos (FARNES e PEREIRA, 2006). Através do ALB é possível ainda adequar os recursos disponíveis para ajustar a taxa de produção, minimizando custos produtivos (WILD, 1972, *apud* PRAÇA, 1996).

1.2 Justificativa do Tema

O incremento da variedade de produtos e a variação na demanda oriundos da sazonalidade e problemas dos diversos processos que suportam a cadeia produtiva, faz com que as linhas de montagem tenham capacidade de produzir mais modelos de produtos com sistemas mais flexíveis e eficiente. Desta forma, a liderança das empresas tem exigido

soluções mais atrativas dentro de um ambiente que necessita de respostas rápidas e acurada.

Assim, o tema em questão, balanceamento de linhas de montagem uni-modelo e mista, se justifica tanto em aspectos práticos como teóricos. No aspecto prático, o tema aqui elaborado se apoia na premissa de que a instalação de uma LM é uma decisão de longo prazo que usualmente demanda um grande investimento das empresas (GUPTA e CLARKE, 1996; KAYO e SECURATO, 1997; BECKER e SCHOOL, 2006) e que, quando equivocada, pode gerar prejuízos significativos (LEONE e RAHN, 2004). Além disso, enfatiza-se que o ALB é fundamental quando se trata da gestão de uma LM, visto que possibilita o incremento da flexibilidade, redução de falhas, melhoria de balanceamento e produtividade (OZBAKIR, 2011; PAPE, 2015). Desta forma, restrições de capacidade produtiva e desbalanceamentos que afetem a eficiência produtiva geram desperdício de recursos e devem ser minimizados/eliminados. Em razão disso, o balanceamento da LM com vistas a evitar ociosidade e falta de capacidade e assegurar flexibilidade de produção constitui-se em fator de fundamental importância. Neste sentido, as metodologias propostas neste estudo objetivam a distribuição das tarefas de forma a minimizar o tempo ocioso nas estações de trabalho e elevar a capacidade produtiva.

No aspecto teórico, ressalta-se que, os esforços na resolução de problemas do ALB terão aplicação garantida, devido à constante necessidade de aumento da produtividade. Além disso, apesar dos diversos trabalhos na área do ALB, grande parte dos algoritmos não são significativamente utilizados pelas empresas devido à sua complexidade e desalinhamentos motivados pelas inúmeras particularidades que são encontradas nas empresas, evidenciando uma distância entre os trabalhos acadêmicos e as aplicações práticas (REKIEK et al., 2002; CRISTO, 2010). Outro fator importante é que trabalhos focados em heurísticas mais simples não são numerosos; de tal forma, a proposição de novas sistemáticas simplificadas encontra justificativa.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é propor métodos para balanceamento de linhas de montagem uni-modelo e mistas.

Como objetivos específicos são colocados:

- a) Propor uma sistemática apoiada no método Delphi para decidir se um novo modelo deve ser encaminhado para uma linha de montagem existente ou a uma nova linha;

- b) Propor uma alteração na heurística *Rank Positional Weight* (RPW) aplicada a LM Uni-modelo;
- c) Apresentar uma aplicação da sistemática de decisão integrada com a execução da heurística RPW modificada em ambiente LM Uni-modelo;
- d) Propor uma adaptação na heurística RPW aplicada em LM Mista-modelo;
- e) Apresentar uma aplicação da heurística RPW modificada em ambiente LM Mista.

1.4 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa em questão é de abordagem quantitativa e qualitativa, sendo realizada em duas etapas: (i) pesquisa bibliográfica para levantamento do estado da arte do tema em estudo e (ii) pesquisa experimental para elaboração da sistemática de decisão e aplicação de métodos de balanceamento de linha de montagem uni-modelo e mista. A pesquisa bibliográfica busca levantar o estado da arte do tema em publicações de periódicos nacionais, internacionais e em livros sobre Delphi e balanceamento de linhas de montagem, dentre os quais foram destacados Gerhardt (2005) e Chow (1990). A pesquisa experimental se baseia em dois estudos de casos específicos, sendo o primeiro deles uma sistemática de decisão para balanceamento de linha de produção de novos produtos, e o segundo um método de balanceamento de linha de montagem mista para suportar flexibilidade do mix de produtos.

O escopo do primeiro artigo contempla uma sistemática para assessorar o balanceamento de linhas de montagem quando é necessária a adição de um novo produto. Para isso, o método é dividido em duas etapas: (i) decidir se a LM existente será adaptada para o novo produto em questão, ou uma LM exclusiva necessita ser desenvolvida; (ii) aplicar o balanceamento de LM de acordo com a resposta da primeira etapa; se a LM existente deve ser adaptada, o balanceamento multi-modelo deve ser aplicado; se uma LM exclusiva deve ser desenvolvida, o balanceamento uni-modelo deve ser aplicado. O primeiro artigo traz ainda uma nova heurística de balanceamento.

O segundo artigo apresenta um método para balanceamento de LM mista com o objetivo de atender a demanda do período para diferentes mix de produção. A heurística proposta é baseada em três restrições: (i) atender a relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel, e (iii) alocar as tarefas a uma estação

de trabalho até que tempo total do modelo na estação não exceda o tempo de ciclo.

Ambas as soluções apresentadas pelos artigos foram aplicadas em uma empresa do setor agrícola; os resultados foram avaliados por especialistas frente ao cenário atual de produção da empresa. Bem como através da comparação com heurísticas ideais para balanceamento de LM.

1.5 Delimitações da Pesquisa

A pesquisa em questão está limitada ao ambiente de manufatura com layout do tipo linha e fluxo unitário de fabricação, sem a existência de estações de trabalho em paralelo e com tempos de processamento determinísticos.

Outra limitação das abordagens propostas está na análise dos resultados: em ambos os casos não foram aplicados métodos de simulação dinâmica para verificação do comportamento ativo das LMs. Por fim, não são endereçados aspectos de custos.

1.6 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em quatro capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema, sua importância, a contribuição da pesquisa, os objetivos e suas justificativas, o método de trabalho, a estrutura e as limitações da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo da dissertação, uma sistemática de decisão para balanceamento de linha de produção quando da introdução de um novo produto. Inicialmente, a sistemática trata da aplicação da ferramenta Delphi para auxiliar na decisão do tipo de balanceamento a ser aplicado na LM do novo produto. Com base nesta resposta, caso o novo produto deva ser fabricado em LM exclusiva, uma nova heurística é proposta originada da heurística *Rank Positional Weight* (RPW). Todavia, se o novo produto for inserido na LM existente, o balanceamento de LM Multi-modelo é necessário.

O terceiro capítulo apresenta solução para o problema de balanceamento de LM mista originado pela mudança do mix de produtos. Neste caso, é proposta uma nova heurística que visa atenuar as restrições de produção das estações sem que limitações do mix de produtos impactem na capacidade produtiva da LM. Neste caso, uma nova heurística é recomendada adaptando-se o RPW ao contexto de LM Mista. Para isso, três restrições são impostas na aplicação da heurística: (i) atender relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel, e (iii) alocar as tarefa a uma estação de

trabalho até que tempo total do modelo na estação não exceda o tempo de ciclo.

O quarto capítulo apresenta as conclusões e as limitações da pesquisa. Oportunidades de pesquisas futuras também são comentadas.

1.7 Referências

- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, v. 168, p. 694-715, 2006.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 183, p. 674-683, 2007.
- FARNES, V. C. F.; PEREIRA, N. A. Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. *Gestão da Produção, Operações e Sistema*. v. 2, p. 125-136, 2006.
- CHOW, W-M. *Assembly line design: Methodology and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1990.
- CRISTO, R. L. Balanceamento de Linhas de Montagem com uso de algoritmo genético para o caso de linhas simples e extensões. Tese de mestrado em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2010.
- GERHARDT, M. P. Sistemática para aplicação de procedimento de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos. Tese Mestrado em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- GUPTA, U.; CLARKE, R. Theory and Application of Delphi Technique: A Bibliography (1975-1994). *Technological Forecasting and Social Change*. v. 53, n. 2, p. 185-211, 1996.
- KAYO, E. K.; SECURATO, J. R. Método Delphi: Fundamentos, críticas e vieses. *Caderno de pesquisa em Administração, São Paulo*. v. 01, n. 4, p. 51-61, 1997.
- KRIENGGORAKOT, N.; PIANTHONG, N. The assembly line balancing problem: Review articles. *KKU Engineering Journal*, v. 34, n. 2, p. 133-140, 2007.
- LEONE, G.; RAHN R. D. *Fundamentos de La Manufactura de Flujo*. Boulder. Colorado USA, 2004.
- OZBAKIR, L.; BAYKASOGLU, A.; GORKEMLI, B.; GORKEMLI, L. Multiple-colony ant algorithm for parallel assembly line balancing problem. *Applied Soft Computing*. v. 11, n. 3, p. 3186-3198, 2011.
- PAPE T. Heuristics and lower bounds for the simple assembly line balancing problem type 1: Overview, computational tests and improvements. *European Journal of Operational Research*. v. 240, n. 1, p. 32-42, 2015.
- PRAÇA, I. C. C. S. Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais. Tese de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- REKIEK, B.; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A.; BRACCTCU, A. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, v. 26, p. 163-174, 2002.
- SIPPER, D.; BULFIN, R. *Production: Planning, Control and Integration*. New York, USA: McGraw-Hill, 1997.

2 PRIMEIRO ARTIGO

SISTEMÁTICA DE DECISÃO PARA BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

Resumo

Com o incremento da variedade de produtos ofertados aos clientes, o problema de balanceamento de linhas de montagem passou a exigir soluções mais elaboradas, especialmente em cenários onde novos modelos de produtos são considerados. Este artigo propõe uma sistemática de decisão de balanceamento que visa atenuar os impactos da introdução de novos produtos em linhas de produção. Baseada na integração da ferramenta Delphi com uma nova heurística de balanceamento uni-modelo, a sistemática foi aplicada na inserção de um novo produto em uma empresa de produção puxada com lote unitário de fabricação. Os resultados do balanceamento foram considerados satisfatórios frente à utilização de heurística tradicional.

Palavras-chaves: Balanceamento de linha de montagem, Delphi, novo produto

Abstract

The assembly line balancing problem has demanded more refined solutions due to the increasing variety of products offered to customers, especially in scenarios where new products are constantly introduced. This article proposes a method for assembly line balancing which aims to reduce impacts derived from the introduction of new products into the assembly line. For that matter, it integrates the Delphi method with a new single-model balancing heuristic. The methodology was applied to a new product model in a one-piece flow, pulled production company; results were considered satisfactory when compared to a traditional assembly line balancing heuristic.

Keywords: *Assembly line balance, Delphi, new product*

2.1 Introdução

Linhas de montagem (LM) constituem-se em arranjos produtivos originalmente

desenvolvidos para obter alto desempenho e baixo custo através da padronização dos produtos (BOYSEN et al., 2007). Porém, devido à crescente demanda por maior variedade, conceitos basilares deste arranjo produtivo mudaram significativamente. Aliado a isso, o grau de complexidade das operações produtivas vem sendo incrementado com a crescente demanda de produtos diversificados, demandando a estruturação de sistemas flexíveis para atender a tais características sem incorrer em elevações de preços.

Inseridas neste contexto, as indústrias de manufatura vêm buscando estratégias de produção que atendam de forma rentável a padrões diversificados. Assim, a necessidade de produção de um novo modelo de produto apresenta a seguinte questão: opta-se pelo desenvolvimento de uma nova LM para este novo modelo, ou insere-se o mesmo em uma LM existente? Tal definição é de fundamental importância, visto que impacta em custos de operação, espaço físico, qualidade e eficiência do processo, dentre outros aspectos.

Conforme Becker e School (2006), a instalação de uma LM é uma decisão de longo prazo que usualmente demanda um grande investimento. Sendo assim, quando se trata da introdução de um novo produto no mercado, as fábricas passam por grandes dificuldades para acomodar estes novos processos dentro de suas instalações. De acordo com Leone e Rahn (2004), diferentes produtos tendem a apresentar diferentes ciclos de venda e, se as linhas são dedicadas, flutuações nas vendas podem levar à baixa utilização dos ativos e modificações abruptas na força de trabalho. Já em linhas devotadas a diversos modelos, a vulnerabilidade a oscilações de vendas pode ser reduzida. Os mesmos autores afirmam que a alocação inadequada de um novo produto em uma LM devotada a outros produtos causa problemas de desbalanceamento e restrições de difícil solução. Logo, a decisão de implantação de uma nova LM frente à adaptação de uma linha existente para fabricação do novo produto nem sempre é trivial, sendo bastante discutida pelas lideranças corporativas.

Este artigo apresenta uma sistemática para auxiliar no balanceamento de linhas produtivas sujeitas à inserção de novos modelos de produtos. O procedimento proposto é dividido em duas etapas. A primeira etapa visa balizar a decisão entre adaptar uma LM existente ou desenvolver uma LM exclusiva. Para tanto, o conhecimento por parte de especialistas é consolidado apoiando-se na metodologia Delphi. A segunda etapa do procedimento trata de balancear as operações da decisão oriunda da primeira etapa: no caso de decisão por uma LM exclusiva, utiliza-se uma sistemática de balanceamento uni-modelo aplicada a partir de uma nova heurística proposta neste artigo; no caso de optar por adaptar a LM existente, utiliza-se uma sistemática multi-modelo proposta pela literatura.

A sistemática proposta é aplicada em uma indústria do segmento agrícola, na qual a LM em questão atualmente fabrica dois subconjuntos distintos. Nesta empresa, a introdução de novos produtos na manufatura é composta pelas seguintes etapas: definição da LM, balanceamento da linha, desenho de layout, desenvolvimento de ferramental e equipamentos. Porém, no estudo em questão, apenas a definição e o balanceamento da LM são apresentados.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 2.2 é apresentada a revisão bibliográfica, detalhando a metodologia Delphi e balanceamento de LM uni-modelo e multi-modelo. Na seção 2.3 são apresentadas as etapas do método; sua aplicação no ambiente produtivo vem na seção 2.4. A seção 2.5 apresenta as conclusões do artigo.

2.2 Referencial Teórico

2.2.1 Metodologia Delphi

A metodologia Delphi foi originalmente desenvolvida para aprimorar o uso da opinião de especialistas a respeito de eventos futuros, tendo sido disseminada no início dos anos 60 com base em trabalhos desenvolvidos por pesquisadores da Rand Corporation (ESTES e KUESPERT, 1976). A técnica tem como objetivo principal buscar o consenso entre especialistas (KAYO e SECURADO, 1997), baseando-se no julgamento coletivo acerca do conhecimento, da experiência e da criatividade dos mesmos (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000) para se obter respostas sobre um tema de interesse (CARDOSO et al., 2005).

O método é simples de ser organizado e administrado (GUPTA; CLARKE, 1996), sendo sua utilização recomendada em situações nas quais há ausência de dados históricos, perspectiva de mudanças estruturais no setor (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000), e também quando dilemas do tipo éticos ou sociais dominam os econômicos e técnicos (GUPTA e CLARKE, 1996).

A operacionalização do Delphi não possui normas rígidas, mas é classicamente dividida na elaboração do questionário, seleção dos jurados, aplicação e ajuste do questionário em rodadas e tabulação dos resultados (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000). Premissas como anonimato, interação, feedback e agregação estatística das respostas são fundamentais no método Delphi (ROWE e WRIGHT, 1999). As questões devem apoiar-se no formato de “preencher espaço em branco” ou “concorda ou discorda”, podendo a última ser do tipo sim ou não ou escala gradual de aderência que possibilite tratamento quantitativo dos resultados. Recomenda-se ainda evitar eventos compostos e entendimento ambíguo das questões.

O anonimato proporciona ao especialista julgar as questões sem pressão externa (ROWE e

WRIGHT, 1999), garantindo que o indivíduo não sofra influência psicológica para alterar a posição assumida através da influência de grupos majoritários com opinião predominante (MARTINO, 1993; WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000). Também evita constrangimentos quando há alteração do ponto de vista durante a aplicação do método (CARDOSO et al., 2005). De acordo com Kayo e Securado (1997), os especialistas têm maior relutância em mudar de opinião em reuniões presenciais com a equipe, pois esta atitude pode ser associada à incapacidade. A interação do grupo ocorre através do feedback das respostas do questionário; estas respostas são consolidadas de forma a apresentar a opinião coletiva do grupo. Todos os respondentes têm sua opinião apresentada para que não haja influência somente da maioria (MARTINO, 1993). A agregação estatística nas respostas permite que cada especialista se posicione e mude de opinião durante as rodadas, se julgar conveniente (MARTINO, 1993; CARDOSO et al., 2005).

A definição dos especialistas é considerada um ponto crítico para o método (DIETZ, 1987). De acordo com Kayo e Securato (1997), “a tarefa de se estabelecer o rol de especialistas e o respectivo grau de especialização é muito difícil e, invariavelmente, permeado de vieses e favorecimentos”. É muito importante que o coordenador do Delphi divulgue de forma clara o propósito da ferramenta ao time de especialistas para não haver dúvidas e inconsistências durante a aplicação. O coordenador deve certificar-se de que os membros do time concordem em fazer parte do estudo. Os especialistas podem ser oriundos da própria empresa ou de terceiros, dependendo da previsão que será analisada (MARTINO, 1993).

Após a seleção dos especialistas, o questionário é enviado a cada membro do grupo para ser respondido. Também é sugerida uma breve explicação do porquê de cada resposta (DIETZ, 1987). Com as respostas dos especialistas da primeira etapa, as informações são analisadas de forma quantitativa. Para isso, os dados são tabulados e tratados estatisticamente de forma a auxiliar os especialistas a reavaliarem e aprofundarem sua visão sobre a questão nas próximas rodadas (CARDOSO et al., 2005). Tradicionalmente, a mediana das estimativas individuais é tomada como previsão do grupo, pois é insensível a dados extremos que poderiam distorcer o resultado (DIETZ, 1987). Quartil, dispersão, distribuição de frequência absoluta também podem ser usadas (KAYO e SECUTADO, 1997).

Na sequência, as informações quantitativamente consolidadas são apresentadas aos respondentes, e uma reconsideração acerca das notas anteriormente atribuídas é motivada. Isto é repetido até que as respostas apresentem estabilidade. Recomendam-se três ciclos de rodadas (DIETZ, 1987).

Uma das principais vantagens do método está na sua simplicidade (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000), o que favorece a reflexão individual e coletiva, ao mesmo tempo que dispensa reuniões presenciais (CARDOSO et al., 2005). Além disso, o método permite capturar um grande número de variáveis inter-relacionadas e características multidimensionais comuns na maioria dos problemas complexos, que são fundamentais em uma análise científica detalhada (GUPTA e CLARKE, 1996). Como desvantagens, é citada a usual falta de critério na escolha dos especialistas (GUPTA e CLARKE, 1996), questionários inadequadamente elaborados (levando à ambiguidade das questões e interpretação errônea) (CARDOSO et al., 2005), e o elevado percentual de desistências, que gira em torno de 50% na primeira rodada e de 30% na segunda (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000).

2.2.2 Conceitos fundamentais de linha de montagem

Uma LM consiste em um arranjo produtivo formado por estações de trabalho geralmente distribuídas ao longo de um sistema de movimentação. O produto é lançado consecutivamente de estação em estação, sofrendo modificações até alcançar a última estação de montagem (GERHARDT, 2005; BECKER e SCHOLL, 2006; KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007). O tempo que um produto é lançado de estação em estação de trabalho é conhecido como tempo de ciclo (T_c), conforme a equação (1).

$$T_c = \frac{\text{horas disponiveis no periodo } p}{\text{demanda no periodo } p} \quad (1)$$

Para alcançar equilíbrio de trabalho entre as estações, a quantidade de trabalho necessária para montar cada produto é dividida em conjuntos, chamados de tarefas. Cada tarefa é vista como uma quantidade de trabalho indivisível e possui um tempo de operação associado. Devido a requisitos tecnológicos ou organizacionais, as tarefas não podem ser realizadas de forma aleatória e, por isso, estão sujeitas a restrições de precedência (BOYSEN et al., 2007). Um recurso que ilustra a ordem com que as tarefas devem ser realizadas é o diagrama de precedência (Figura 2.1).

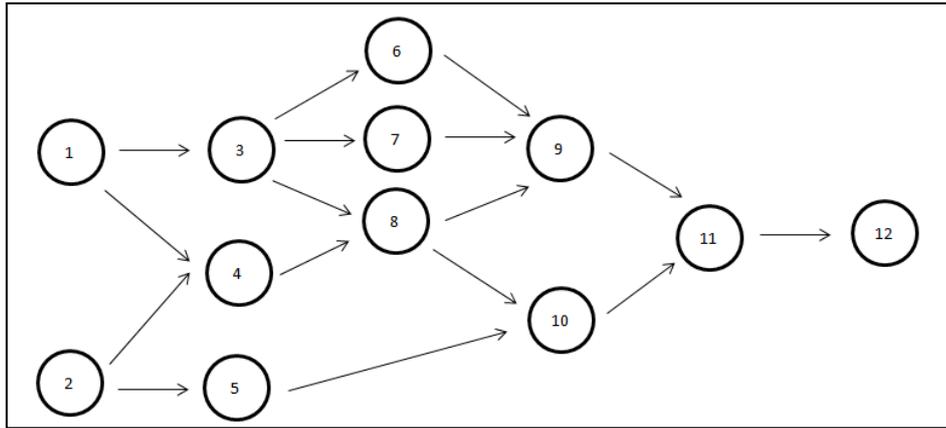


Figura 2.1 - Exemplo de diagrama de precedência

Os números no interior dos círculos representam tarefas, enquanto que as flechas que unem os círculos apresentam a relação de precedência. A soma dos tempos do conjunto de tarefas atribuído a uma estação é conhecido como tempo da estação. No problema de balanceamento de LM, trabalha-se com a condição de que o tempo da estação (S) não seja superior ao tempo de ciclo:

$$\max t_k \leq \max S_j \leq T_c \leq \frac{1}{D}$$

Onde S_j – tempo total da estação j , representando a soma dos tempos de realização das tarefas alocadas a cada estação em unidade de tempo; j – estação de trabalho da LM, tal que $j=1, \dots, W$; t_k – representa o tempo de processamento da k -ésima tarefa em unidade de tempo; k – identifica a tarefa, tal que $k=1, \dots, N$; T_c – tempo de ciclo e D – taxa de demanda do produto.

A diferença entre o tempo de ciclo e o tempo da estação é o tempo ocioso (BOYSEN et al., 2007). Uma forma de avaliação da eficiência da LM constitui-se no Atraso de Balanceamento, o qual fornece um percentual do tempo total em que a linha permanece ociosa. Alternativamente, o Índice de Suavidade fornece a variação entre o tempo total máximo de trabalho verificado entre as estações e os tempos totais de trabalho das mesmas. Tais indicadores, do tipo menor é melhor, podem ser calculados através das Equações (2) e (3), onde W representa o número de estações de trabalho, T_c o tempo de ciclo, t_k o tempo de processamento das tarefas, S_j o tempo total da estação de trabalho e S_{max} representa o tempo total máximo de operação existente entre todas as estações de trabalho.

$$\text{Atraso de balanceamento} = \frac{100(WT_c - \sum_{k=1}^N t_k)}{WT_c} \quad (2)$$

$$\text{Índice de suavidade} = \sqrt{\sum_{j=1}^W (S_{max} - S_j)^2} \quad (3)$$

Linhas de montagem que produzem produtos idênticos são chamadas de *single-model line*, ou linha uni-modelo. Quando existem diferenças nos produtos, duas classificações surgem. A primeira delas é a *multi-model line* ou linha multi-modelo, a qual apresenta diferenças significativas nos processos produtivos e os diferentes produtos são fabricados em lotes maiores que uma unidade para minimizar os impactos do setup. A segunda classificação é conhecida como *mixed-model line* ou linha mista, que é aplicada quando há similaridade dos processos produtivos e não existe setup para ajuste do processo. Com isso, é possível lançar os produtos na linha em lotes unitários de forma aleatória (SMIDERLE et al., 1997; BECKER e SCHOLL, 2006). A Figura 2.2 ilustra as definições acima, onde a geometria das figuras refere-se aos diferentes produtos.

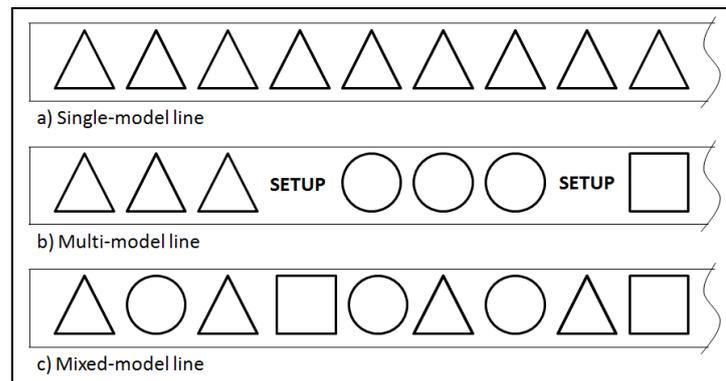


Figura 2.2 - Tipos de linha de montagem

Fonte: Adaptado de Becker e Scholl (2006).

2.2.2.1 Balanceamento de Linha de Montagem

O *Assembly Line Balance* (ALB) ou Balanceamento de linha de montagem é conhecido como o problema clássico do balanceamento de LM, consistindo na alocação de operações em uma estação de trabalho de forma que o tempo ocioso seja minimizado e as restrições de precedência sejam atendidas (REKIEK et al., 2002; BECKER e SCHOLL, 2006; KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007). O ALB permite alcançar o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis de modo a obter-se taxas satisfatórias de produção ao mínimo custo (WILD, 1972 *apud* PRAÇA, 1996). O balanceamento se faz necessário quando existem alterações do processo, como a inclusão ou exclusão de tarefas, alteração de componentes, mudança de componentes, mudanças no tempo de processamento (FARNES e PEREIRA, 2006) e também na implantação de novos processos.

Existem duas abordagens fundamentais do ALB, de acordo com Praça (1996): (i) dado um tempo de ciclo fixo para uma taxa de produção pretendida, alocam-se as tarefas às estações de

trabalho de forma a minimizar as perdas de balanceamento totais da linha e distribuir as perdas inevitáveis da forma mais equilibrada possível entre as estações de trabalho; e (ii) dado um número fixo de estações de trabalho, atribui-se as tarefas às estações de trabalho de forma a minimizar as perdas de balanceamento totais da linha e distribuir as perdas inevitáveis da forma mais equilibrada possível entre as estações de trabalho.

Diversos fatores podem reduzir a eficiência de balanceamento. Um deles é a relação entre a quantidade de trabalho e o tempo de ciclo. Quando o trabalho total é dividido em tarefas e alocado às estações de trabalho respeitando as precedências, estas tarefas agrupadas podem não permitir uma duração igual ao tempo de ciclo. Outro fator consiste na variabilidade inerente do comportamento humano, fator que está presente em atividades de cunho manual (PRAÇA, 1996).

De acordo com Bautista e Pereira (2009), o ALB tipicamente apoia-se em três abordagens: modelos matemáticos, heurísticos e meta-heurísticos. Além disso, a simulação também é citada por Mezzana (2000) *apud* Cristo (2010). Salveson sugeriu soluções para o ALB através de programação linear (KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007).

A maioria das heurísticas de balanceamento apoia-se em uma lista ordenada de atividades, nas quais um alocador busca uma solução. Cada uma delas possui uma forma de encontrar a ordem da lista baseada no objetivo proposto. Em geral, são três os principais passos dos algoritmos de solução: classificação das tarefas para criação da lista, aplicação do alocador e análise dos resultados (CRISTO, 2010).

Chow (1990), Ponnambalam et al. (1999) e Cristo (2010) destacam as seguintes heurísticas com vistas ao ALB: *Rank positional weight* ou Método dos pesos posicionais, *Kilbridge and Wester's method* ou Método de Kilbridge e Wester, *Largest set ruler* ou Regra do maior candidato, os quais são geralmente aplicadas em linhas uni-modelo. Já o procedimento de Vilarinho e Simaria (2002) *apud* Gerhardt (2005) é aplicado em linhas multi-modelo. As heurísticas acima são agora apresentadas.

2.2.2.2 Heurísticas de balanceamento

Método dos pesos posicionais (RPW-*Rank Positional Weight*)

Este método foi introduzido por Helgeson e Birnie nos anos 60, tendo gerado soluções satisfatórias e rápidas segundo Boctor (1995) *apud* PRAÇA (1996). Sua operacionalização consiste no cálculo do peso posicional de cada tarefa de acordo com o diagrama de precedência. O peso é a soma do tempo da tarefa com o tempo das tarefas que a antecedem.

Na sequência, os pesos posicionais devem ser organizados em ordem decrescente, e as tarefas atribuídas às estações de trabalho de acordo com a ordem do peso posicional, respeitando-se as restrições de precedência. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em Chow (1990).

Método de Kilbridge e Wester (KWM)

Este método consiste em um procedimento heurístico que seleciona os elementos de trabalho para designar as estações de acordo com a coluna de posição do diagrama de precedência, conforme a Figura 2.3. Após isso, as tarefas são organizadas por colunas e em ordem decrescente de tempo de processamento da tarefa. Por fim, as tarefas devem ser alocadas às estações de trabalho de acordo com a ordem da lista, desta forma assegurando que os maiores elementos sejam alocados primeiro (aumentando assim a chance do tempo de cada estação ficar mais próximo do tempo de ciclo) (GERHARDT e FOGLIATTO, 2004).

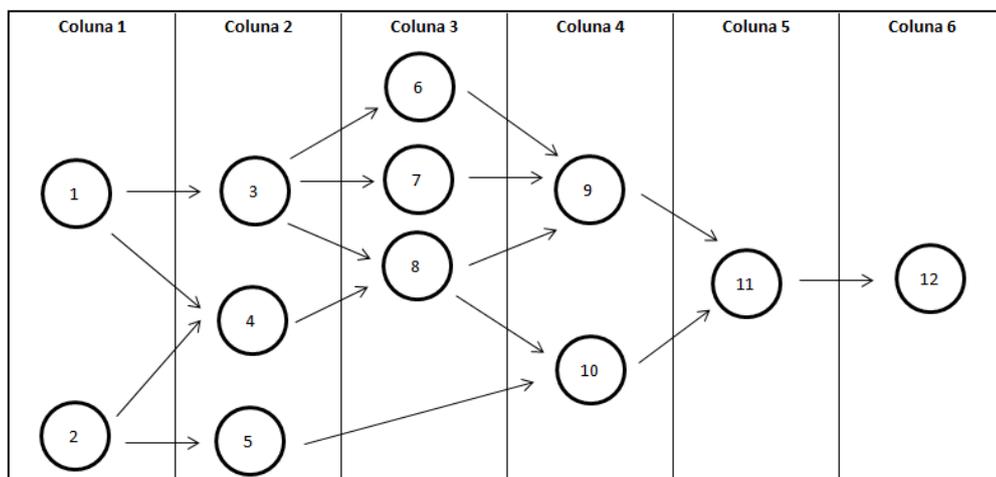


Figura 2.3 - Diagrama de precedência dividido em colunas pelo método Kilbridge e Wester

Regra do maior candidato (LCR – *Largest Candidate Rule*)

Esta heurística permite obter resultados em menor tempo do que o método dos pesos posicionais. Inicialmente, deve-se listar as tarefas em ordem decrescente de tempo de processamento; em seguida, as tarefas devem ser atribuídas às estações de trabalho de acordo com tal ordem sem violar restrições de precedência ou ultrapassar o tempo de ciclo (PRAÇA, 1996).

Procedimento de Vilarinho e Simaria (2002)

O procedimento é dividido em duas etapas. A primeira etapa visa minimizar o número de estações de trabalho para um tempo de ciclo determinado, sendo operacionalizado através do

RPW. Na segunda parte, o procedimento busca balancear a carga de trabalho entre as estações de forma a distribuir de forma equilibrada o tempo ocioso entre as estações de trabalho. Para isso, as tarefas de cada estação são alteradas através de movimentos de troca e transferência até se obter a solução final (GERHARDT, 2005).

2.3 Método

Nesta seção propõe-se a sistemática de decisão para balanceamento de LMs onde novos produtos são sistematicamente colocados em produção. A sistemática é dividida em duas etapas. A primeira consiste na utilização do método Delphi e decisão do tipo de balanceamento a ser aplicado. A etapa seguinte, denominada Execução do balanceamento da LM, é operacionalizada através do balanceamento da LM e avaliação dos resultados obtidos. A Figura 2.4 ilustra a sequência de passos sugeridos. Esta sistemática foi concebida para aplicação em ambientes de fabricação de produtos com layout em linha. Além disso, assume-se a inexistência de estações de trabalho com tarefas em paralelo e tempos de execução das tarefas determinísticos.

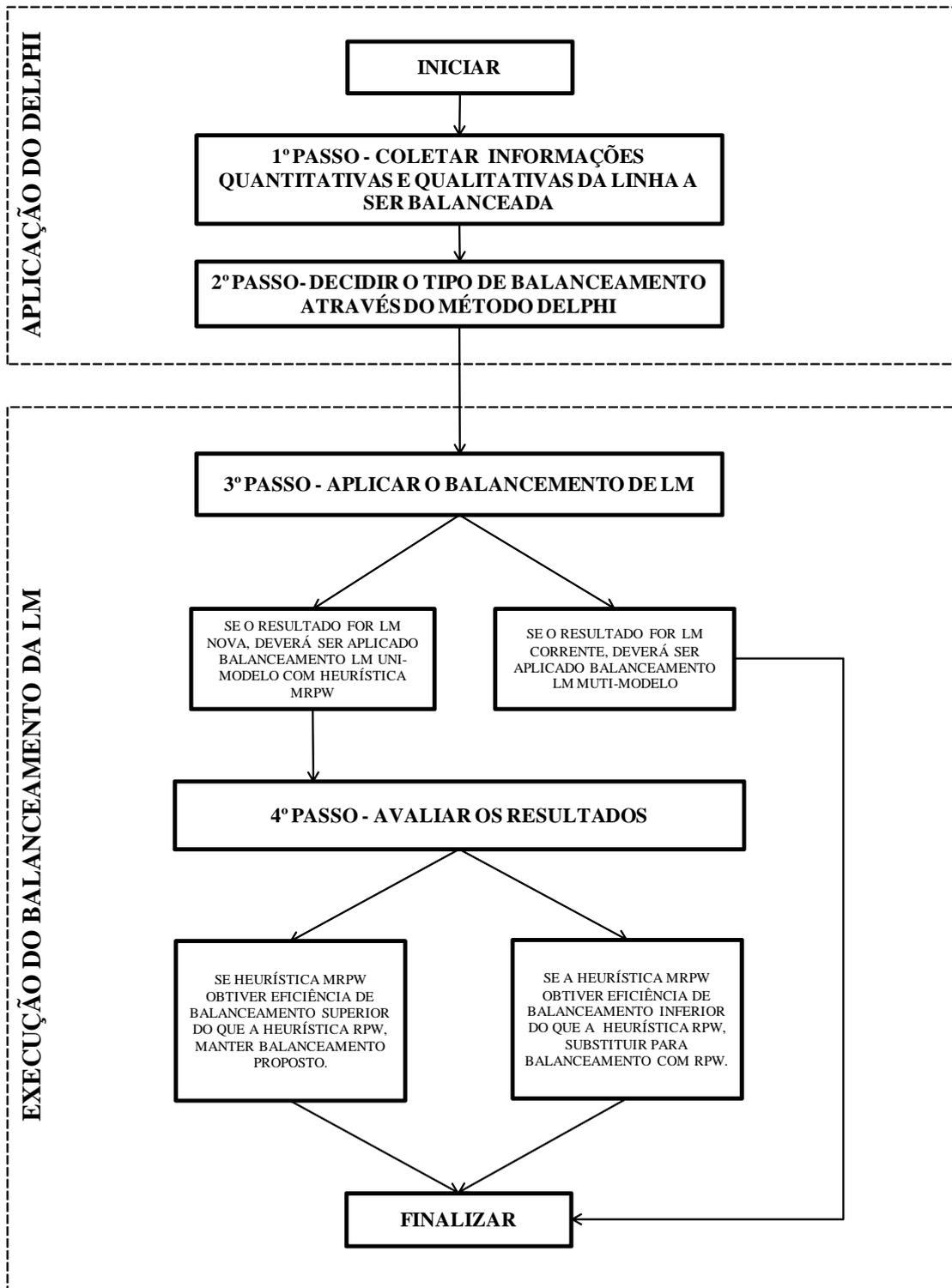


Figura 2.4 - Fluxo da sistemática proposta

1º Passo – Coletar informações quantitativas e qualitativas da linha a ser balanceada

O objetivo deste passo é coletar informações para suportar a tomada de decisão. Tais informações contemplam: (i) Característica produtiva - especificações que carregam referências relacionadas a características da LM; (ii) Quantidade monetária - especificações

acerca do capital de investimento; e *(iii)* Área física ocupada - especificações relacionadas ao espaço físico ocupado pela LM. O Quadro 2.1 apresenta o desdobramento de cada um destes aspectos focados em LMs.

Quadro 2.1 – Quadro de aspectos e desdobramentos da coleta de informações

Aspectos	Desdobramento
(i) Característica produtiva	Tempo de processamento dos produtos analisados
	Quantidade de estações de trabalho da LM existente
	Fluxograma de fabricação dos produtos analisados
	Histórico de dados de demanda e produtividade da LM existente
	Histórico de dados de qualidade da LM existente
(ii) Quantidade monetária	Equipamento de possível unificação da LM existente com o novo produto
	Equipamentos específicos para fabricação do novo produto
(iii) Área física ocupada	Materiais comuns entre a LM existente e o novo produto
	Área da LM existente e área adicional para o novo produto

2º Passo – Decidir o tipo de balanceamento a ser utilizado através do método Delphi

O objetivo deste passo é definir se o novo produto será fabricado em uma linha existente ou uma nova linha deverá ser montada com tal propósito e, por consequência, definir o tipo de balanceamento apropriado. A decisão é auxiliada pelo método Delphi, que conta com a opinião de especialistas através de um questionário com respostas na escala de 1 a 5, sendo 1 a discordância completa da afirmação e 5 a concordância completa da afirmação.

As perguntas submetidas aos especialistas devem levantar aspectos que incluem *(i)* compartilhamento dos processos de fabricação do novo produto (é adequado ou não compartilhá-los com os produtos existentes); *(ii)* tempo de processamento do novo produto (prejudica ou não a eficiência da LM existente); *(iii)* e layout existente (comporta adicionar os itens do novo produto na LM existente). Assim, é possível obter respostas objetivas dos especialistas que suportem a decisão final do novo produto ser fabricado em uma linha existente ou em uma nova linha. Tendo em vista que a avaliação dos diversos aspectos pode gerar respostas divergentes dentre os diversos aspectos endereçados, utiliza-se uma última questão de arremate para definir a necessidade de nova LM.

Como parâmetros para análise do questionário são utilizados a mediana e a amplitude inter-

quartil. O objetivo da mediana é mostrar o resultado da decisão, enquanto que a amplitude inter-quartil é apresentar o grau de consenso das respostas entre os especialistas. O Quadro 2.2 apresenta a relação adotada entre mediana do questionário e tipo de balanceamento a ser aplicado, enquanto que no Quadro 2.3 são apresentados os resultados correspondentes à amplitude inter-quartil em relação à convergência das opiniões dos especialistas (sinalizando a necessidade ou não de nova rodada do questionário).

Quadro 2.2 – Parâmetros para interpretação dos resultados da mediana

Intervalo da mediana	Interpretação dos resultados	Tipo de balanceamento
[1;2]	Montagem do novo produto em linhas exclusiva	Uni-modelo
(2;4)	Não se tem informações convergindo para um resultado aceitável, aplicar nova rodada	-
[4;5]	Montagem do novo produto na mesma linha dos produtos em questão	Multi-modelo

Quadro 2.3 – Parâmetros para interpretação dos resultados da amplitude inter-quartil

Intervalo amplitude inter-quartil	Interpretação dos resultados
[0;1)	Respostas possuem convergência aceitável. Não necessita nova rodada.
[1; ∞)	Respostas não possuem convergência aceitável. Necessita nova rodada.

3º Passo – Aplicar o balanceamento de LM

O objetivo deste passo é distribuir as tarefas às estações de trabalho de uma forma equilibrada, minimizando a ociosidade e respeitando tempo de ciclo da LM. No caso da escolha por balanceamento uni-modelo, utiliza-se uma heurística de balanceamento Modified RPW (MRPW), sendo sua adaptação uma contribuição original deste artigo (e detalhada a seguir). Já no caso do balanceamento multi-modelo, aplica-se o procedimento proposto por Vilarinho e Simaria (2002) *apud* Gerhardt (2005).

A heurística MRPW combina o método dos pesos posicionais (RPW) com o Algoritmo de Transferência de Tarefas (ATT), objetivando melhorar o índice de suavidade. A heurística MRPW é dividida em duas etapas: (i) aplicação do RPW e (ii) aplicação do ATT.

Etapa (i): A operacionalização do RPW apoia-se na sequência de passos apresentada abaixo.

1. Calcular o tempo de ciclo (T_c) com base na demanda a ser atendida;
2. Calcular o *RPW* de cada tarefa somando o tempo da tarefa k aos tempos de processamento de todas as tarefas precedentes do diagrama de precedência;
3. Ordenar as tarefas em ordem decrescente de *RPW*;
4. Alocar as tarefas às estações. Para isso, selecionar a 1ª tarefa viável com maior *RPW* (aquela que não tem restrições de precedência e não excede o tempo de ciclo na estação em análise);
5. Continuar o processo designando tarefas às estações até que não existam tarefas viáveis; e
6. Repetir os passos 4 e 5 até terminar as tarefas.

Visto que o *RPW* de cada tarefa consiste no tempo de processamento das tarefas precedentes, este algoritmo prioriza as tarefas ao final do diagrama de precedência, ou seja, soluciona o problema da última estação de trabalho para a primeira. De acordo com o algoritmo, a última tarefa da LM possui o maior *RPW*, então ela é a primeira tarefa a ser alocada em uma estação de trabalho.

Etapa (ii): As etapas do ATT são detalhadas na sequência.

Os ciclos apresentados na Figura 2.5 constituem-se em iterações entre os pares de estações de trabalho, ou seja, o ciclo n significa a realização da transferência de tarefas entre as estações de trabalho n e $n+1$. Por exemplo, o ciclo 1 significa a realização da transferência de tarefas entre o par de estações de trabalho 1 e 2, enquanto que o ciclo 2 significa a realização da transferência de tarefas entre o par de estações de trabalho 2 e 3. O ATT demanda o cálculo do Indicador de Viabilidade de Transferência (IVT) para cada tarefa selecionada, constituído pela diferença entre os tempos das estações menos e mais ociosas. A estação menos ociosa é aquela que possui o menor tempo ocioso (T_o); da mesma forma, a mais ociosa é a estação com o maior T_o . A equação (4) auxilia na definição das estações mais e menos ociosas, enquanto que a equação (5) define o IVT.

$$T_o_j = T_c - S_j \quad (4)$$

$$IVT = (T_{EOmenor}) - (T_{EOmaior}) \quad (5)$$

onde T_o_j – tempo ocioso na estação j em unidade de tempo; j – identifica a estação de trabalho da LM, tal que $j = 1, \dots, W$; T_c – tempo de ciclo; S_j – tempo total da estação de

trabalho; $T_{EOmenor}$ – tempo da estação menos ociosa em unidade de tempo; e $T_{EOmaior}$ – tempo da estação mais ociosa em unidade de tempo.

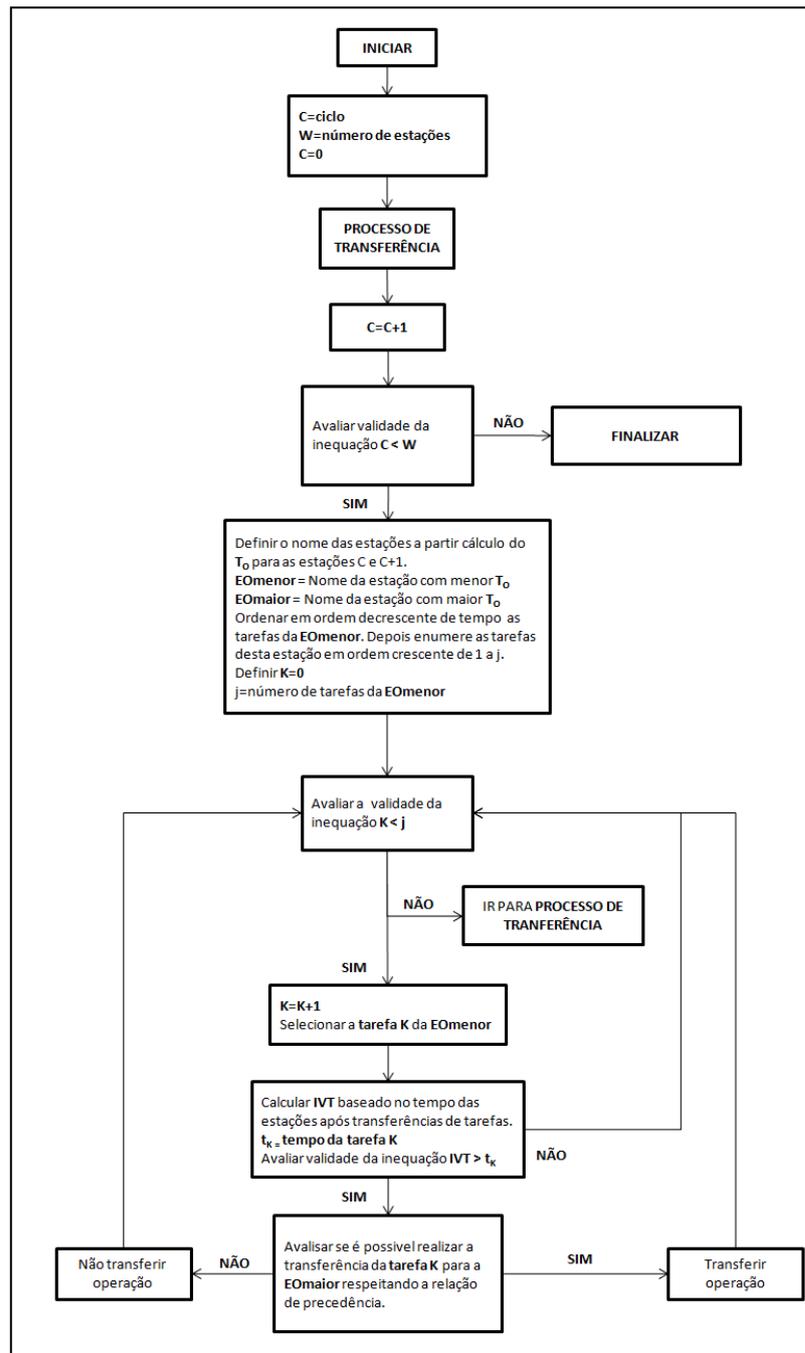


Figura 2.5 – Algoritmo de Transferência de Tarefas (ATT)

4º Passo - Avaliar os resultados

O objetivo deste passo é analisar a eficiência do balanceamento proposto através de três indicadores: Atraso de Balanceamento, Índice de Suavidade e Capacidade Máxima na estação gargalo. Com exceção da Capacidade Máxima na estação gargalo [apresentada pela equação

(6)], os demais indicadores de eficiência podem ser calculados conforme as equações (2) e (3).

$$\text{Capacidade máxima estação gargalo} = \frac{\text{Tempo disponível para produção}}{S_{max}} \quad (6)$$

Sendo que S_{max} representa o tempo total máximo de operação existente entre todas estações de trabalho.

2.4 Resultados e Discussão

O método foi aplicado em uma empresa fabricante de máquinas agrícolas que possui a produção do tipo puxada com lote unitário de fabricação. Os processos incluem usinagem, solda, pintura e montagem, sendo que o processo de montagem é composto por diferentes linhas. Para este estudo foi realizada a aplicação da metodologia em apenas uma das LMs.

A LM escolhida fabrica dois diferentes subconjuntos, os quais, através da combinação de alguns componentes, dão origem a 11 diferentes subconjuntos. A alteração dos componentes que originam os diferentes subconjuntos não é considerada significativa para fins de tempos de processamento, sendo assim considerados apenas dois subconjuntos representativos na LM: Alfa e Beta. A LM foi denominada Linha Alfa+Beta. O objetivo da empresa foi aplicar a sistemática proposta para o novo produto Zebra, o qual incrementa o portfólio de produtos fabricados.

A Linha Alfa+Beta possui o processo de montagem estruturado em uma linha principal e pré-montagens assim denominados pela empresa: a linha principal é composta por 16 estações de trabalho, as quais são alimentadas por outras 14 áreas de pré-montagem. Estas áreas são definidas com pequenas células de submontagens de módulos a serem acoplados no produto principal. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram a fabricação dos produtos Alfa e Beta e do produto Zebra, respectivamente.

A Tabela 2.1 apresenta informações relativas ao tempo disponível para produção por dia, demanda total, tempo de ciclo e número de estações de linha principal. Traz ainda o tempo de processamento dos produtos Alfa, Beta e Zebra separados por linha principal e pré-montagem, bem como suas respectivas demandas.

Tabela 2.1 – Tempos de processamentos e quantidade de estações de trabalho da LM existente

Linha Alfa+Beta			
Quantidade de turnos produção	1		
Tempo disponível de produção (min)	480		
Demanda (unidade/turno)	42		
Tempo ciclo (min/unidade)	11,43		
Quantidade estações de linha principal	16,00		
Produto	Tempos		Demanda diária
	Linha Principal (min)	Pré-montagem (min)	
ALFA	195,7	146,95	32
BETA	193,9	110,25	10
ZEBRA	148,3	193,6	14

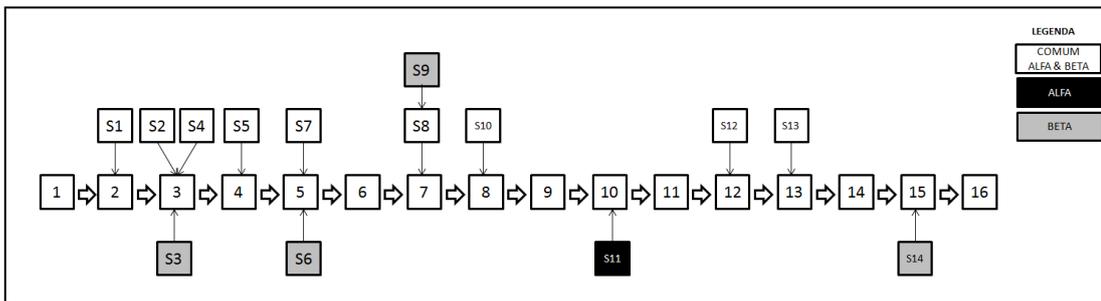


Figura 2.6 – Fluxograma de fabricação dos produtos Alfa e Beta

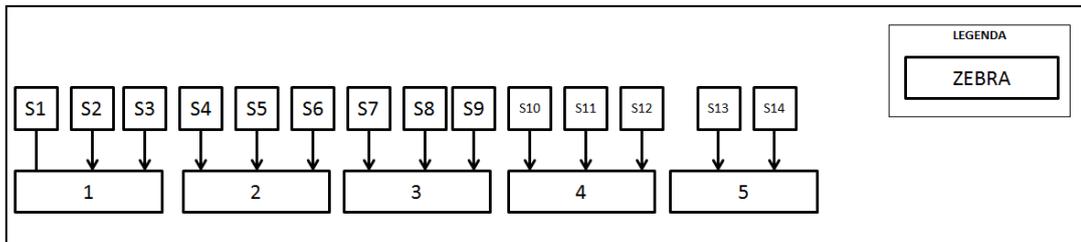


Figura 2.7 – Fluxograma de fabricação do produto Zebra

Na Tabela 2.2 foi construída uma séria histórica de 12 meses com dados referentes à taxa média de produção por turno, o respectivo valor de produtividade por mês calculado pela empresa e a quantidade monetária de sucata (não disponível para os meses de outubro e novembro). A mesma tabela apresenta a taxa de rejeitos por mês, representando o percentual de produtos fabricados durante o período afetado por não conformidades durante o processo de fabricação.

Tabela 2.2 – Séria histórica de dados da linha Alfa+Beta: demanda, produtividade, sucata e rejeitos

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Demanda (taxa média por turno)	38	35	36	36	30	34	33	32	34	33	23	33
Produtividade	0,88	0,76	0,73	0,79	0,77	0,78	0,77	0,79	0,84	0,80	0,62	0,83
Sucata (R\$ / produto)	5,5	0,8	8,5	5,9	12,2	3,3	8,7	2,7	4,5	-	-	20,0
Taxa de rejeitos no mês	3%	2%	6%	4%	9%	7%	8%	8%	6%	7%	0%	6%

Após a coleta de informações a respeito dos aspectos produtivos, foram identificadas as ferramentas que poderiam ser compartilhadas entre os produtos Alfa, Beta e Zebra, além das ferramentas específicas para o Zebra (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Equipamentos de possível unificação Alfa+Beta e Zebra e específicos para produto Zebra

LEGENDA																
C - Ferramentas compartilhadas entre Alfa, Beta e Zebra																
E - Ferramentas específicas para Zebra																
	Estação 1	Estação 2	Estação 3	Estação 4	Estação 5	Estação 6	Estação 7	Estação 8	Estação 9	Estação 10	Estação 11	Estação 12	Estação 13	Estação 14	Estação 15	Estação 16
Parafusadeira 1	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
Parafusadeira 2	C	C	C	C		C	C	E	E			E	C	E	E	
Parafusadeira 3		E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Torquimetro 1						E	E			E	E	E				
Torquimetro 2						E						E				
Carro aproximação	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Estação MES	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
IPK		E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Manipulador				E						E	E					
Dispositivo especial			E									E		E		

Como forma de balizar a área física ocupada, foram inicialmente categorizados os itens necessários para produção em 3 diferentes grupos: (i) Itens de KLT – itens de pequeno porte, normalmente abastecidos em caixas que podem variar de 200x300mm a 400x600mm, armazenados em prateleiras com cinco níveis de dimensão de 800x1200mm; (ii) Itens de carro KIT – itens de tamanhos variados com peso até 11kg e que podem ser manuseados sem auxílio de manipuladores. Estes também compartilham o espaço de um carro de

movimentação com dimensões não superiores a 1100x1500mm; e (iii) Itens em embalagem especial – itens abastecidos em embalagens acondicionadas diretamente no piso e que podem variar de 800x800mm a 1200x2000mm. Assim, a partir destes grupos de embalagens, pode-se consolidar as informações de materiais para a LM Alfa+Beta e para o produto Zebra, conforme apresentado na Tabela 2.3. De posse destas informações, foi estimada a área adicional necessária para fabricação de Zebra (Tabela 2.4).

Tabela 2.3 – Comparação de materiais comuns e específicos da linha Alfa+Beta e Zebra

	Quantidade de itens						Soma
	LINHA PRINCIPAL			PRÉ-MONTAGENS			
	Itens de KLT	Itens de carro KIT	Itens em embalagem especial	Itens de KLT	Itens de carro KIT	Itens em embalagem especial	
ALFA + BETA	212	0	12	1075	186	56	1541
ZEBRA	141	17	1	273	48	5	485
<i>Itens comuns entre Zebra X Alfa+Beta</i>	23	0	0	139	2	0	164
	16%	0%	0%	51%	4%	0%	34%

Tabela 2.4 – Área existente da linha Alfa+Beta e adicional para produto Zebra

Área (m ²)		LINHA PRINCIPAL	PRÉ-MONTAGENS	Soma
ATUAL	ALFA + BETA	682	1263	1945
ADICIONAL	ZEBRA	202	353	555

A decisão do tipo de balanceamento foi elaborada a partir do questionário Delphi com base nas informações do desdobramento dos aspectos acima colocados. Foram aplicadas nove perguntas sobre unificação de fabricação, tempos de processo e balanceamento, apresentação de materiais, eficiência, produtividade da mão-de-obra, qualidade de processo, custo de instalação apesar de serem implícitos, e complexidade de implementação (Apêndice).

Onze profissionais da área de Engenharia de Manufatura da empresa foram escolhidos para responder o questionário. Tais especialistas trabalham na área de Engenharia de Produção da empresa há mais de 5 anos, incluindo funcionários de níveis gerenciais a técnicos. Apesar do método não demandar reuniões presenciais, houve desistência de alguns especialistas, conforme mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Percentual de desistência durante as rodadas do questionário

	Desistência
1ª Rodada	36%
2ª Rodada	18%
3ª Rodada	18%

A aplicação do questionário ocorreu em três rodadas até que a resposta final fosse definida. A Tabela 2.6 apresenta os resultados obtidos ao final de cada rodada levando em consideração apenas a última pergunta do questionário, como definição geral e final.

Tabela 2.6 – Resultados das rodadas de aplicação do questionário Delphi

	Mediana	Aplitude Inter-Quartil	Interpretação
1ª Rodada	4	1,5	Não possui convergência dos resultados
2ª Rodada	2	1,0	Não possui convergência dos resultados
3ª Rodada	2	0,5	Balanceamento Uni-modelo

Os resultados apresentaram convergência aferida através da amplitude inter-quartil na 3ª rodada. Neste caso, 50% dos especialistas apresentaram sua opinião dentro de um intervalo com amplitude de 0,5 pontos. Logo, conclui-se que o produto Zebra deverá ser fabricado em uma LM exclusiva, apontando o balanceamento da LM do tipo uni-modelo como necessário.

Para o balanceamento da LM para o novo produto Zebra, coletaram-se os tempos de execução das 43 tarefas de montagem, bem como as restrições de precedência. Os tempos foram considerados determinísticos, visto que não apresentam variações maiores do que 10%. As informações de descrição das tarefas, tempo das tarefas e restrições de precedência são apresentadas na lista de tarefas do produto Zebra (Apêndice).

O tempo de ciclo para nova LM Zebra foi definido com base no tempo disponível para produção e na demanda para 1 turno de trabalho (ver Tabela 2.7). De posse do tempo de ciclo, aplicou-se a heurística proposta MRPW para balanceamento uni-modelo da LM em planilha eletrônica. O balanceamento resultante da heurística proposta é apresentado na Tabela 2.8.

Tabela 2.7 – Definição do tempo de ciclo para produto Zebra

Informações da linha de montagem Zebra	
Tempo disponível (min/turno)	480
Demanda diária (unidade/turno)	14
Tempo ciclo (min/unidade)	34,29

Tabela 2.8 – Tempos de operação em cada estação através da heurística MRPW

Estação de trabalho	Soma dos tempos de operação em cada estação (min)
1	23,65
2	29,46
3	30,77
4	33,88
5	30,52

A eficiência do balanceamento gerado foi avaliada através dos indicadores de Atraso de Balanceamento, Índice de Suavidade e Capacidade máxima de produção na estação gargalo. A Tabela 2.9 compara os resultados da heurística RPW com a heurística MRPW.

Tabela 2.9 – Comparação dos indicadores de desempenho das heurísticas RPW e MRPW

INDICADOR	Heurística RPW	Heurística MRPW	Melhora
Índice suavidade	21,83	12,05	45%
Cap. Máxima gargalo	14,05	14,17	1%
Atraso de balanceamento	0,14	0,14	0

Com base nos resultados obtidos, percebe-se uma melhora significativa (45%) no Índice de Suavidade gerado pela heurística proposta, o qual conduz a uma melhor distribuição das tarefas entre as estações de trabalho e, com isso, menor tempo ocioso entre as estações. Além disso, houve sensível melhora no indicador de capacidade máxima na estação gargalo (1%). Em termos práticos, tal aumento não significa incrementos reais, visto que os tempos de operação possuem uma variação maior do que 1%. Por fim, não houve alteração para o índice de atraso de balanceamento, visto que, após aplicação do RPW, o número de estações de trabalho resultantes permaneceu igual ao número ideal.

2.5 Conclusão

Este artigo apresentou uma sistemática de decisão para balanceamento de linha de produção quando da introdução de um novo produto. A sistemática é dividida em duas etapas. Na primeira etapa é definido o tipo de balanceamento a ser aplicado com base na ferramenta Delphi. Na segunda etapa, é realizado o balanceamento das LM utilizando metodologias de acordo com o tipo de balanceamento indicado na etapa anterior. No caso de inserir o novo produto em uma LM existente, o tipo de balanceamento de linha aplicado é multi-modelo; já para o caso de desenvolver uma nova LM para o novo produto, o balanceamento da LM a ser aplicado é uni-modelo.

A sistemática proposta neste artigo foi aplicada na LM de uma empresa do segmento agrícola. A LM analisada atualmente produz dois distintos subconjuntos, Alfa e Beta. Em virtude da necessidade do incremento de produtos no mercado, foi necessário realizar balanceamento da LM para um novo produto, o Zebra. Para tanto, a primeira etapa do método proposto indicou a necessidade de desenvolvimento de uma LM exclusiva. A decisão foi tomada a partir das respostas da aplicação do questionário fundamentado na metodologia Delphi, o qual foi concluído após 3 rodadas. Na segunda etapa, o balanceamento uni-modelo foi executado de acordo com a heurística MRPW. Por fim, a heurística MRPW foi comparada com a heurística RPW e resultados positivos foram obtidos com base em indicadores de desempenho. Verificou-se aumento de 45% no Índice de Suavidade, proporcionando uma melhor eficiência do balanceamento da LM.

Sugere-se, para desenvolvimentos futuros, acrescentar restrições à sistemática, como operações em paralelo e precedências de naturezas mais complexas (por exemplo, atividades delimitadas por regiões da LM). Outra oportunidade seria a implementação do algoritmo de balanceamento em plataforma computacional com vistas a sistemas mais complexos (visto que os procedimentos deste artigo foram implementados em planilha eletrônica).

2.6 Referências

- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, v. 168, p. 694-715, 2006.
- BONETTI, L. V. Dados de garantia e análise qualitativa de especialistas como base para estudo de confiabilidade no setor de máquinas agrícolas. Tese de Mestrado em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 183, p. 674-683, 2007.

- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOOL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal Production Economics*, v. 111, p. 509-528, 2008.
- CARDOSO, L. R.; ABIKO, A. K.; HAGA, H. C. R.; INOUE, K. P.; GONÇALVES, O. M. Prospecção de futuro e Método Delphi: uma aplicação para a cadeia produtiva da construção habitacional. *Ambiente Construtivo*, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 63-78, 2005.
- CRISTO, R. L. Balanceamento de Linhas de Montagem com uso de algoritmo genético para o caso de linhas simples e extensões. Tese de mestrado em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2010.
- CHOW, W-M. *Assembly line design: Methodology and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1990.
- DIETZ, T.; Methods for analyzing data from Delphi panels: Some evidence from a forecasting study. *Technological Forecasting and Social Changes*. v. 31, n. 1, p. 79-85, 1987.
- ESTES, G. M.; KUESPERT, D. Delphi in industrial forecasting. *Chemical and Engineering News*, EUA, v. 54, p. 40-47, 1976.
- FARNES, V. C. F.; PEREIRA, N. A. Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. *Gestão da Produção, Operações e Sistema*. v. 2, p. 125-136, 2006.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO F. M.; CUTIGI, R. A.; GUIGUET, A. M., A. O uso de programação interia 0-1 para o balanceamento de linhas de montagem: modelagem, estudo de caso e avaliação. *Produção*, v. 18, n. 2, p. 210-221, 2008.
- FONSECA, M. N. C. P. Sistema integrado de balanceamento de linhas de produção na indústria do calçado. Tese mestrado em Engenharia Electrotécnica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- GERHARDT, M. P. Sistemática para aplicação de procedimento de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos. Tese Mestrado em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- GERHARDT, M. P.; FOGLIATTO F. S. Otimização do balanceamento de linhas de montagem multi-modelo para produção em pequenos lotes. *Anais do XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP*. Florianópolis, 2004.
- GUPTA, U.; CLARKE, R. Theory and Application of Delphi Technique: A Bibliography (1975-1994). *Technological Forecasting and Social Change*. v. 53, n. 2, p. 185-211, 1996.
- KAYO, E. K.; SECURATO, J. R. Método Delphi: Fundamentos, críticas e vieses. *Caderno de pesquisa em Administração*, São Paulo. v. 01, n. 4, p. 51-61, 1997.
- KRIENGGORAKOT, N.; PIANTHONG, N. The assembly line balancing problem: Review articles. *KKU Engineering Journal*, v. 34, n. 2, p. 133-140, 2007.
- LEMONS, F. O. Metodologia para seleção de métodos de previsão de demanda. Tese Mestrado em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2006.
- LEONE, G.; RAHN R. D. *Fundamentos de La Manufactura de Flujo*. Boulder. Colorado USA, 2004.
- PRAÇA, I. C. C. S. Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais. Tese de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

PONNAMBALAM, S. G.; ARAVINDAN, P.; G. MOGILEESWAR N. A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15, p. 577-586, 1999.

MARTINO, J. P. *Technological forecasting for decision making*. 3th ed New York: Mc Graw-Hill, 1993.

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

ROWE, G.; WRIGHT, G. Delphi technique as a forecasting toll: issues and analysis. *International Journal of Forecasting*. v. 15, n. 4, p. 353-375, 1999.

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.

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, 1997.

WRIGHT, J. T. C.; GIOVINAZZO, R. A. Delphi – Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. *Caderno de pesquisas em Administração*, São Paulo, v. 01, n. 12, p. 54-65, 2000.

Apêndices

Apêndice 2.2 - Lista de tarefas do produto Zebra

Tarefa	Descrição	Tempo (min)	Precedência
1	Mascaramentos	1,57	-
2	Vedação, cliques	4,57	1
3	Console central	3,13	2
4	Caixa de saída chicote elétrico	1,08	-
5	Chicote principal	7,16	4
6	BCU	2,53	-
7	Moldura traseiro	2,80	2; 5
8	Molduras laterais	4,07	7
9	Teto interno	2,54	3; 8
10	Caixa fusível	3,59	5
11	Caneleta chicote principal	1,03	5
12	Linhas gás	1,31	9
13	Vedação cabine	5,01	9
14	Modulo ar condicionado	2,08	9
15	Molduras verdes frontais	1,81	-
16	Mangueiras console central	7,19	3
17	Tubos do ar condicionado	6,55	14
18	Fechamento BCU	3,41	6; 7
19	Conjunto de alavancas	3,15	5
20	Cabo acelerador de mão	1,26	19
21	Revestimento traseiro	3,57	18
22	Forro teto	3,15	14
23	Vedações vidro traseiro e parabrisa	1,65	9
24	Grades auto falantes	1,37	22
25	Assento	3,11	10; 20; 21
26	Painel lateral	5,64	20
27	Revestimento poste C	2,70	21; 22
28	Janelas laterais	5,55	9
29	Mangueiras dreno AC	3,42	22
30	Revestimento poste A	3,61	29
31	Suporte monitor	1,16	30
32	Defletores	2,16	3; 15
33	Parabrisa	5,14	23; 32
34	Vidro traseiro	3,48	23; 25
35	Portas	6,61	9; 19; 30
36	Paralamas	8,76	35
37	Revestimento poste B	2,11	28; 35
38	Cowls	2,42	3; 5
39	Teto verde	5,86	17
40	Escapamento	1,23	35
41	Retrovisores	2,11	40
42	Monitor	1,94	31
43	Teste final	5,69	Todas tarefas
	Soma total	148,28	

3 SEGUNDO ARTIGO

MÉTODO DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM MISTA EM CENÁRIOS COM DISTINTOS MIX DE PRODUTOS

Resumo

Linhas de montagem mista combinam a fabricação de diferentes modelos de produtos em uma única linha de montagem, proporcionando flexibilidade de produção de acordo com a sazonalidade de vendas, evitando a baixa utilização dos ativos. Este artigo propõe uma heurística para balanceamento em linhas de produção sujeitas a distintos mix de produtos com vistas em atenuar as restrições de capacidade nas estações de trabalho e aumentar a eficiência de balanceamento. A abordagem proposta foi aplicada em uma linha de montagem mista com 7 modelos de produtos. Os resultados foram considerados satisfatórios, segundo avaliação de especialistas, quando avaliados em termos de capacidade produtiva, ciclo de fabricação e balanceamento de linha.

Palavras-chaves: linha de montagem mista, balanceamento, capacidade, RPW

Abstract

A mixed-model assembly line can manufacture different products in the same assembly line, providing flexible production according to demand seasonal behavior. This article proposes a heuristic that aims to balance production lines subjected to several product models in order to attenuate capacity restrictions in workstations and increase the balancing efficiency. The proposed approach was applied to a mixed assembly line comprised of seven product models. The results were considered satisfactory when assessed in terms of production capacity, manufacturing cycle time and assembly line balancing.

Keywords: *mix-model assembly line, line balance, capacity, RPW*

3.1 Introdução

Recentes tendências na demanda dos clientes por produtos customizados incentivaram a implantação de linhas de montagem mistas em diversos ambientes industriais (MENDES et

al., 2005). Linhas mistas podem produzir mais de um tipo de produto na mesma linha de montagem (LM) (BECKER e SCHOLL, 2006), e diferentes ciclos de vendas podem ser combinados para evitar a baixa utilização de ativos quando ocorrer baixa venda de um específico produto (LEONE e RAHN, 2004). No entanto, para que estes arranjos mistos se tornem viáveis frente ao mercado competidor, os projetistas das linhas de montagem buscam aumentar a eficiência das linhas através da maximização da taxa de rendimento e minimização de custos operacionais. Assim, o projeto das linhas de montagem tem se tornando um problema de grande importância industrial (REKIEK et al., 2002a).

Não somente os aspectos de balanceamento e layout afetam o desempenho de uma linha de montagem mista, mas também o mix de produtos requisitado. O mix de produtos é a quantidade de cada produto a ser fabricado dentro da demanda total da LM. No entanto, a falta de peças, indisponibilidade de máquinas e equipamentos e não conformidades de peças, entre outros, restringem a produção de alguns modelos em determinados períodos; de tal forma, a mudança do mix é necessária para que sejam aproveitados os recursos disponíveis. Porém, este aproveitamento nem sempre é de fácil operacionalização, pois restrições de capacidade impostas pelo balanceamento limitam a taxa de produção. Logo, se a LM possuir condições de adaptar-se a diversos mix de produtos sem ter a capacidade produtiva afetada, a utilização dos recursos disponíveis pode ser mantida.

Este artigo sugere um método para balanceamento de LM mista em cenários sujeitos a mudanças do mix de produtos, tornando a LM apta a atender a demanda total de produção do período independente do modelo a ser produzido. Este balanceamento é operacionalizado através da heurística de balanceamento de LM mista alvo móvel, onde as tarefas são alocadas às estações de trabalho respeitando três restrições: (i) atender relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel, e (iii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que tempo total na estação não exceda o tempo de ciclo. O método proposto foi aplicado em uma empresa que possui uma LM mista para 7 diferentes modelos. O método aumentou a capacidade produtiva em 35% (atendendo à demanda estipulada para a LM), reduziu o tempo de atravessamento dos produtos na LM e melhorou a eficiência de linha e balanceamento por conta de uma melhor distribuição das tarefas.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 3.2 é apresentada a revisão bibliográfica, detalhando os tipos de linha de montagem, seus balanceamentos e soluções aplicáveis. Na seção 3.3 são apresentadas as etapas do método, e sua aplicação no ambiente

produtivo vem na seção 3.4. A seção 3.5 apresenta as conclusões do artigo.

3.2 Referencial Teórico

3.2.1 Linhas de montagem

Uma LM consiste em um arranjo produtivo formado por estações de trabalho geralmente distribuídas ao longo de um sistema de movimentação. O produto é lançado consecutivamente de estação em estação, sofrendo modificações até alcançar a última estação de montagem (GERHARDT, 2005; BECKER e SCHOLL, 2006; KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007).

As linhas de montagem que produzem produtos idênticos são chamadas de *single-model line*, ou linha uni-modelo. Quando existem diferenças nos produtos, duas classificações surgem. A primeira delas é a *multi-model line* ou linha multi-modelo, a qual apresenta diferenças significativas nos processos produtivos, e os diferentes produtos são fabricados em lotes maiores que uma unidade para minimizar os impactos do setup. A segunda classificação é conhecida como *mixed-model line* ou linha mista, que é aplicada quando há similaridade dos processos produtivos e não existe setup para ajuste do processo. Com isso, é possível lançar os produtos na linha em lotes unitários de forma aleatória (SMIDERLE et al., 1997; BECKER e SCHOLL, 2006). Para cada modelo, diferentes tempos de processamento são requeridos, logo a quantidade de trabalho de um mesmo operador na mesma estação de trabalho é desigual. Casos onde o operador finaliza o trabalho antes do próximo ciclo ou não finaliza o trabalho dentro do tempo de ciclo tornam a LM desequilibrada, fazendo com que a eficiência da LM seja baixa nestas condições (SARKER e PAN, 1998). Mesmo assim, para Askin e Standridle (1993) *apud* Souza et al. (2003), este sistema de produção tende a ser um dos mais eficientes, porém requer processos confiáveis e com baixa variabilidade nos tempos de processamento das estações de trabalho (no contexto prático de aplicação da sistemática proposta, baixa variabilidade refere-se a uma diferença menor do que 30% na variação do tempo entre os modelos). A Figura 3.1 ilustra as definições acima, onde a geometria das figuras refere-se aos diferentes produtos.

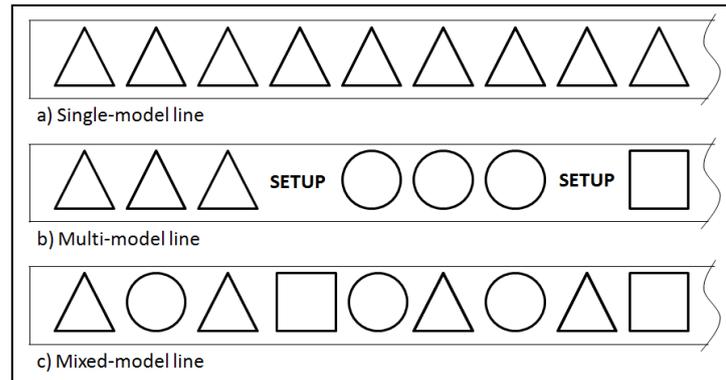


Figura 3.1 - Tipos de linha de montagem

Fonte: Adaptado de Becker e Scholl (2006).

No projeto de uma LM, as principais questões a serem tratadas são: (i) definir o tempo de ciclo; (ii) determinar o número de estações de trabalho; (iii) balancear a LM; e (iv) determinar a ordem de produção dos modelos. Outro interesse de projeto da LM é minimizar o *lead time* (SARKER e PAN, 1998), o que significa reduzir a diferença de tempo entre o lançamento e a finalização do produto na LM (MARLIM, 1986). Quanto menor o *lead time*, maior é o potencial de venda dos produtos (ÖZTÜRK et al., 2006). Outra premissa para o adequado funcionamento das LMs é que o tempo da estação (S) não seja superior ao tempo de ciclo:

$$\max t_k \leq \max S_j \leq T_c \leq \frac{1}{D}$$

onde S_j é tempo total da estação j , representando a soma dos tempos de realização das tarefas alocadas a cada estação em unidade de tempo; j é estação de trabalho da LM, $j=1, \dots, W$; t_k representa o tempo de processamento da k -ésima tarefa em unidade de tempo; k identifica a tarefa, tal que $k=1, \dots, N$; T_c é o tempo de ciclo e D é taxa de demanda do produto.

O tempo de ciclo (T_c) é o tempo em que um produto é lançado de estação em estação de trabalho, definido através da equação (1).

$$T_c = \frac{\text{tempo disponível no período } p}{\text{demanda no período } p} \quad (1)$$

O número de estações de trabalho necessárias para atender à demanda varia de acordo com as restrições e configurações da LM. Segundo Peinado e Graeml (2007), o número mínimo teórico, para o caso de LM onde cada estação de trabalho opera com apenas um operador, pode ser estimado pela equação (2).

$$\text{Número estações de trabalho} = \frac{\sum \text{tempos individuais tarefas}}{T_c} \quad (2)$$

Para balancear as tarefas, é essencial conhecer diagrama de precedência (Figura 3.2), pois devido a requisitos tecnológicos ou por características de produção do item, as tarefas devem seguir uma determinada ordem em sua execução (BOYSEN et al., 2007).

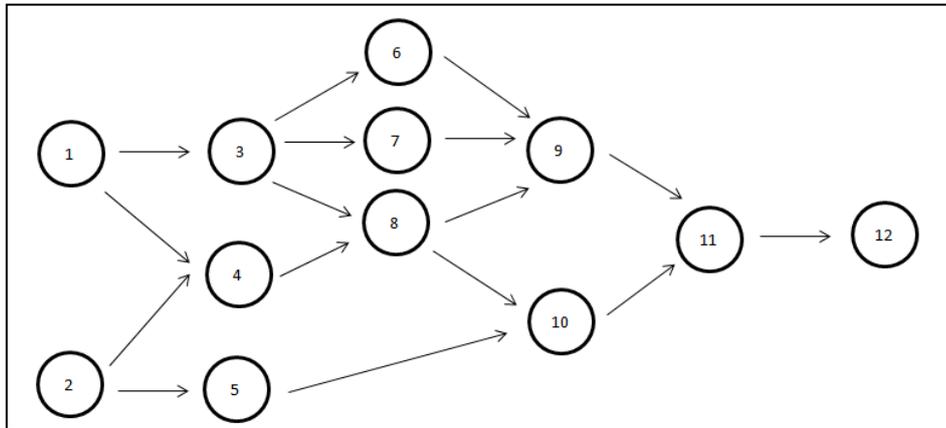


Figura 3.2 - Exemplo de diagrama de precedência

No diagrama de precedência, os números no interior dos círculos representam tarefas, enquanto que as flechas que unem os círculos apresentam a relação de precedência. A soma dos tempos do conjunto de tarefas atribuído a uma estação é conhecido como tempo da estação.

O tempo de cada tarefa pode se obtido através de cronoanálise, dentre outros métodos. A cronoanálise é uma forma de mensurar o trabalho por meios de métodos estatísticos, permitindo calcular o tempo padrão. O tempo padrão engloba uma série de fatores, como velocidade de trabalho do operador, necessidades pessoais e alívio de fadiga, entre outros. Estes fatores podem ser encontrados na literatura especializada na área. O tempo padrão de realização das tarefas também pode ser determinado através de tempos pré-determinados (PEINADO e GRAEML, 2007).

Os tempos de processamento das tarefas também são utilizados para determinar a capacidade de produção de uma LM. Capacidade é a quantidade máxima de itens produzidos na LM em um determinado intervalo de tempo; para se determinar a capacidade de produção, é necessário identificar os “gargalos” da LM. Logo, a capacidade de produção é calculada em função do tempo de trabalho disponível e o tempo da estação gargalo, como na equação (3) (PEINADO e GRAEML, 2007).

$$\text{Capacidade de produção} = \frac{\text{Tempo disponível no período } p}{\text{Tempo da estação gargalo}} \quad (3)$$

3.2.2 Balanceamento de linha de montagem

O *Assembly Line Balance* (ALB) ou Balanceamento de Linha de Montagem é conhecido como o problema clássico do balanceamento de LM, consistindo na alocação de tarefas em uma estação de trabalho de forma que o tempo ocioso seja minimizado e as restrições de precedência sejam atendidas (REKIEK et al., 2002b; BECKER e SCHOLL, 2006; KRIENGGORAKOT e PIANTHONG, 2007). O ALB permite alcançar o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis de modo que taxas satisfatórias de produção sejam obtidas ao mínimo custo (WILD, 1972, *apud* PRAÇA, 1996). O balanceamento se faz necessário quando existem alterações do processo, como a inclusão ou exclusão de tarefas, alteração de componentes, mudanças no tempo de processamento (FARNES e PEREIRA, 2006) e também na implantação de novos processos.

De acordo com Ghosh e Gagnon (1991), o problema de balanceamento de linha de montagem pode ser classificado em quatro categorias, conforme a Figura 3.3:

(i) UMD - Uni-modelo determinístico: Este modelo é considerado para linhas de montagem com apenas um modelo de produto, onde os tempos das tarefas são conhecidos de forma determinística, com pequena variação do tempo das tarefas (fruto da facilidade de execução das mesmas, clareza e também da motivação dos operadores) (REKIEK et al., 2002a; BECKER e SCHOLL, 2006). Alguns critérios de eficiência devem ser otimizados, como tempo ocioso da estação e eficiência de linha, dentre outros. Este é um dos problemas mais simples de ALB; (ii) UMS - Uni-modelo estocástico: Nesta categoria, os tempos para execução das atividades apresentam variabilidade decorrente do comportamento humano, falta de habilidade dos operadores, carência de motivação, processos complexos e equipamentos com baixa confiabilidade, entre outros; (iii) MMD - Multi/Mista modelo determinístico: A formulação dos problemas MMD considera tempos determinísticos das tarefas, porém com a presença de diferentes produtos produzidos na mesma linha de montagem. Neste contexto, sequenciamento, taxa de lançamento e tamanho de lotes se tornam importantes quando comparados a linhas uni-modelo; e (iv) MMS - Multi/Misto modelo estocástico: tempos das tarefas são probabilísticos. Impactos decorrentes da aprendizagem, habilidade, delimitação das tarefas e a variação do tempo das tarefas são considerados nessa abordagem (GHOSH e GAGNON, 1991).

Outra classificação importante divide os problemas de balanceamento de linha em duas categorias: (i) problemas de balanceamento de linha de montagem simples, indicando que nenhuma restrição é relaxada; e (ii) problemas de balanceamento genéricos, onde se encaixam

os problemas de balanceamento de linha que objetivam resolver problemas com características adicionais (FERNANDES et al., 2008).

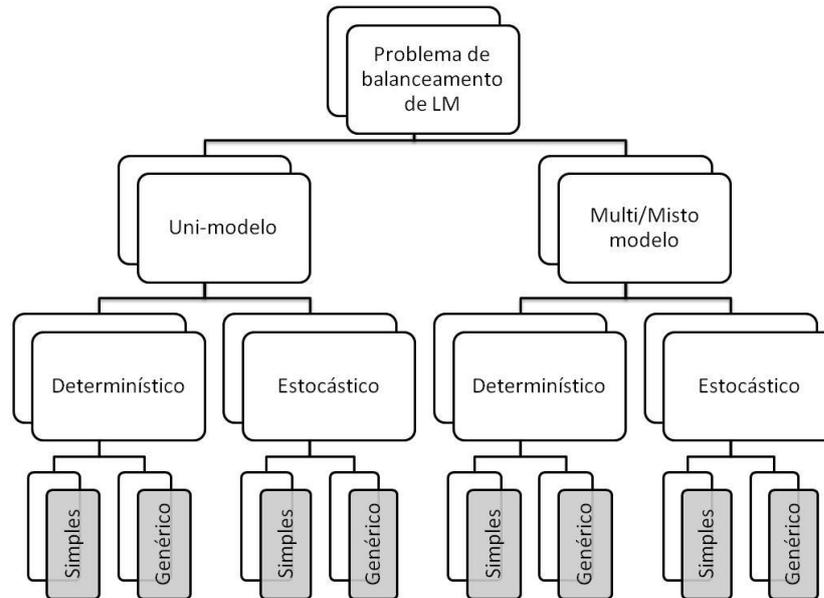


Figura 3.3- Classificação do problema de balanceamento de LM

Fonte: Adaptado de Ghosh e Gagnon (1991)

Conforme Van Zante-de Forkket e De Kok (1997) *apud* Gerhardt (2005), a diferença fundamental entre um problema de balanceamento de linha uni-modelo para um multi-modelo está no diagrama de precedência. De tal forma, muitos autores, ao desenvolverem métodos para solucionar problemas de balanceamento de linha multi-modelo, transformam o problema em uni-modelo. Dois métodos podem ser utilizados: (i) diagrama de precedência equivalente e (ii) ajuste no tempo de processamento das tarefas (GERHARDT, 2005).

(i) Método do diagrama de precedência equivalente: Thomopoulos (1970) *apud* Gerhardt (2005) parte do princípio que, em uma linha mista, existem diversas tarefas comuns aos diferentes modelos produzidos e, conseqüentemente, uma série de relações de precedência similares. Então, a combinação dos diagramas de precedência de cada modelo individual pode ser feita pela união dos nós e das relações de precedência de seus respectivos diagramas de cada modelo individual, conforme exemplificado através das Figuras 3.4 e 3.5.

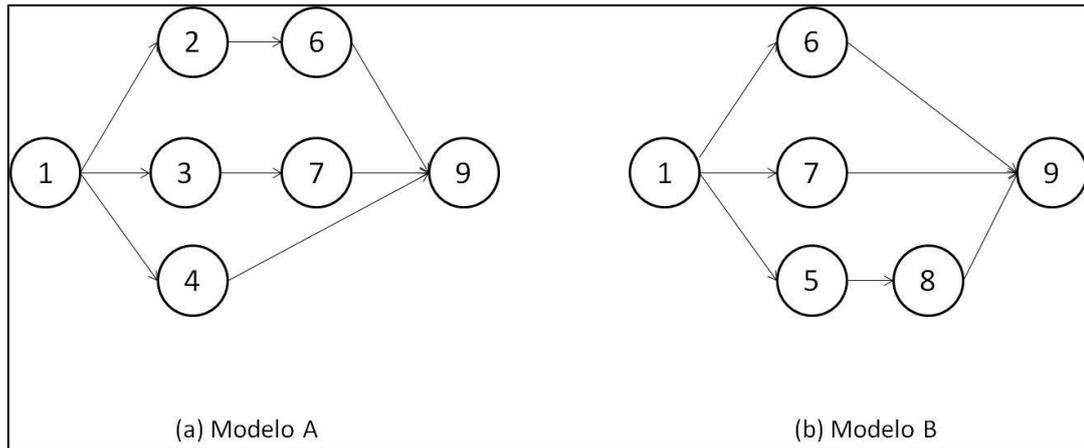


Figura 3.4 – Diagrama de precedência para modelo A (a) e modelo B (b)

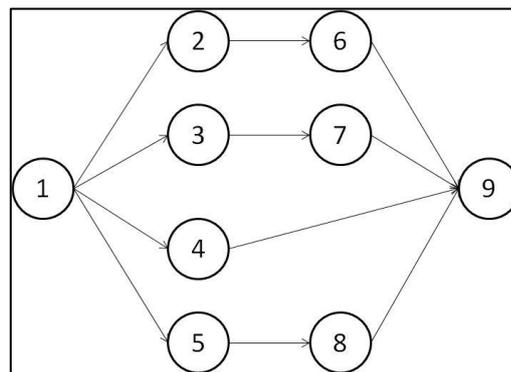


Figura 3.5 – Diagrama de precedência equivalente dos modelos A e B

De acordo com Van Zante-de Fokket e De Kok (1997), o balanceamento de LM Multi-modelo, baseado no método do diagrama de precedência equivalente, pode ser comparado ao balanceamento de LM Uni-modelo. No entanto, a alocação das tarefas às estações de trabalho é realizada com base no tempo total da duração do turno, e não no tempo de ciclo, que é utilizado como base nos balanceamentos de LM Uni-modelo.

(ii) Método do ajuste no tempo de processamento das tarefas: No método de ajuste do tempo de processamento, o mesmo é determinado pela média ponderada da k -ésima tarefa comum aos diferentes modelos, conforme equação (4) (VAN ZANTE-DE FOKKET e DE KOK, 1997).

$$\bar{t}_k = \sum_{m=1}^M pd_m t_{k,m} \quad (4)$$

onde pd_m representa a proporção do modelo m frente aos demais modelos produzidos na LM, $t_{k,m}$ representa o tempo de processamento para k -ésima tarefa comum aos diferentes modelos e \bar{t}_k representa o tempo de processamento médio ponderado da k -ésima tarefa comum aos diferentes modelos. Uma vantagem deste método é que ele está baseado no tempo de ciclo, o

que faz mais sentido para organização das tarefas em uma LM, ao invés do tempo total do turno de trabalho. Como desvantagens, o método não determina a sequência com que os modelos serão produzidos e não considera diferentes diagramas de precedência. De tal forma, é recomendado para balanceamentos de modelos derivados de um modelo base, onde as tarefas possuem um tempo de processamento semelhante ao do modelo base (VAN ZANTE-DE FOKKET, DE KOK, 1997).

Becker e Scholl (2003) destacam que ambos os métodos citados acima causam ineficiências quando a LM está em operação devido à variação nos tempos de processamento das estações de acordo com o modelo em produção. Ele pode ser superior ou inferior ao tempo ciclo, gerando sobrecarga ou ociosidade de trabalho para os operadores.

Tradicionalmente, dois indicadores são utilizados para avaliar a qualidade de balanceamento da LM (DRISCOLL e THILAKAWARDANA, 2001): *Balance Delay* (Atraso de balanceamento), que representa um percentual de tempo em que a LM permanece ociosa; e *Smoothness Index* (Índice de suavidade), que mede a diferença entre o tempo total máximo de trabalho entre as estações e os tempos totais de trabalho das demais estações (GERHARDT, 2005).

Driscoll e Thilakardana (2001) introduzem formas alternativas para avaliar os resultados do balanceamento da LM. O *Line efficiency* ou Eficiência de linha (*EL*) representa a utilização da LM e possui aspectos de avaliação econômica; já o *Balance efficiency* ou Eficiência de balanceamento (*EB*) representa o quão bem foram alocadas as tarefas às estações de trabalho, o que pode consequentemente ocasionar um incremento da taxa de produção. Ambos os indicadores são adimensionais e representados através de uma escala de 0 a 100%, onde 100% representa o melhor resultado. Eles são calculados conforme equações (5) e (6), respectivamente.

$$EL = \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{W \times T_c} \times 100 \quad (5)$$

$$EB = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^W |S_j - S_{av}|}{W \times S_{av}} \right] \times 100 \quad (6)$$

onde S_{av} representa o tempo médio das estações de trabalho e W o número de estações de trabalho.

3.2.3 Soluções para ALB

Tendo em vista que o problema ALB pode figurar na categoria *NP-hard* de otimização

combinatória, diversas pesquisas têm desenvolvido aproximações computacionais ou algoritmos heurísticos com soluções aproximadas (GHOSH, 1989; GHOSH e GAGNON, 1991). Ghosh e Gagnon (1991) classificam os métodos para balanceamento de ALB da seguinte forma:

Rank and Assign Methods: Nestes métodos, as tarefas são ordenadas com base em critérios ou regras de prioridade e designadas às estações apoiando-se em uma ordem que não viole a relação de precedência e as restrições do tempo de ciclo.

Tree Search Methods: Estes métodos são essencialmente de programação inteira baseado no método *Branch & Bound*. As abordagens nesta categoria também podem ser denominadas como métodos enumerativos.

Random Sampling Methods: Estes métodos designam as tarefas aleatoriamente às estações de trabalho atendendo à restrição de precedência e tempo de ciclo.

Outros métodos: Métodos de agregação: elementos de tarefas são agrupados em tarefas compostas; Aproximação Sucessiva: um algoritmo ótimo é aplicado sucessivamente como uma heurística em uma versão mais simples do problema; e Métodos de Aprendizagem: baseados na premissa de que a experiência adquirida na resolução de problemas menores é usado para resolver problemas maiores.

Cristo (2010), Ponnambalam et al. (1999) e Chow (1990) destacam as seguintes heurísticas para solução de problemas ALB: *Rank positional weight* ou Método dos pesos posicionais, *Kilbridge and Wester's method* ou Método de Kilbridge e Wester, *Largest set ruler* ou Regra do maior candidato. Os fundamentos das heurísticas acima são agora apresentadas.

- Método dos pesos posicionais (RPW-*Rank Positional Weight*): Este método foi introduzido por Helgeson e Birnie nos anos 60, tendo gerado soluções satisfatórias e rápidas segundo Boctor (1995) *apud* PRAÇA (1996). Sua operacionalização consiste no cálculo do peso posicional de cada tarefa de acordo com o diagrama de precedência. O peso é a soma do tempo da tarefa com o tempo das tarefas que a antecedem. Na sequência, os pesos posicionais devem ser organizados em ordem decrescente, e as tarefas atribuídas às estações de trabalho de acordo com a ordem do peso posicional, respeitando-se as restrições de precedência. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em Chow (1990).
- Método de Kilbridge e Wester (KWM): Este método seleciona os elementos de trabalho para designar as estações de acordo com a coluna de posição do diagrama de

precedência, conforme a Figura 3.6. Na sequência, as tarefas são organizadas por colunas e em ordem decrescente de tempo de processamento. Por fim, as tarefas são alocadas às estações de trabalho de acordo com a ordem da lista, desta forma assegurando que os maiores elementos sejam alocados primeiro, aumentando a chance do tempo de cada estação ficar mais próximo do tempo de ciclo (GERHARDT e FOGLIATTO, 2004).

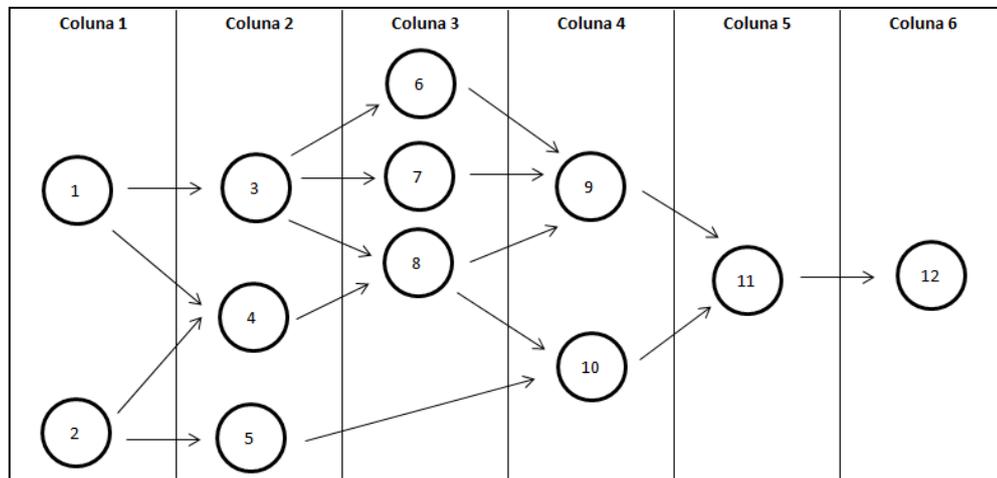


Figura 3.6 - Diagrama de precedência dividido em colunas pelo método Kilbridge e Wester

- Regra do maior candidato (LCR – *Largest Candidate Rule*): Esta heurística permite obter resultados em menor tempo do que o método dos pesos posicionais. Inicialmente, deve-se listar as tarefas em ordem decrescente de tempo de processamento; em seguida, as tarefas devem ser atribuídas às estações de trabalho de acordo com a ordem da lista sem violar nenhuma restrição de precedência ou ultrapassar o tempo de ciclo (PRAÇA, 1996).

3.3 Método

Esta seção propõe uma nova heurística de balanceamento para LM mista intitulada RPW alvo-móvel (RPW-AVM), a qual apoia-se na heurística dos pesos posicionais RPW proposta originalmente por Helgeson e Birnie. Tal proposição foca-se em um ambiente de produção passível de mudanças no mix de produtos, as quais ocasionam desbalanceamentos das estações de trabalho e geram restrições de capacidade produtiva na LM, tornando-a incapaz de atender à demanda de produção requerida.

A heurística assegura que a LM atenda à demanda de produção total com variadas composições do mix de produtos, sem necessidade de intervenções para ajuste de balanceamento ou ações de sequenciamento para lançamento dos produtos. Para isso é

necessário que o tempo de cada modelo em todas as estações de trabalho seja inferior ao tempo de ciclo da LM. Além disso, a heurística proposta inova no formato de distribuição das tarefas às estações de trabalho, propondo um alvo-móvel que objetiva melhorar a distribuição das tarefas entre as estações, quando comparada à RPW original. A heurística proposta é agora detalhada.

3.3.1 Operacionalização do RPW-AVM

O RPW original é fundamentalmente orientado por um tempo de ciclo pré-estabelecido; logo, pode-se assumir que o alvo limitante da quantidade de tarefas alocáveis a uma determinada estação de trabalho é o tempo de ciclo, o qual é fixo. Desta forma, a alocação das tarefas às estações de trabalho pode apresentar um desequilíbrio acumulado na primeira estação de trabalho, a qual tipicamente acarreta perdas significativas à LM. Propõe-se então uma modificação neste alvo, o qual passa a ser móvel (e denominado Alvo Móvel - AVM).

O AVM é calculado para cada estação de trabalho, e depende da quantidade de estações de trabalho a serem balanceadas. Ele tem a função de melhorar a distribuição das tarefas entre as estações de trabalho ainda não balanceadas de acordo com o tempo das tarefas ainda não alocadas. A cada troca da estação de trabalho, o alvo é recalculado para cada modelo (por isso móvel), e então identificada a condição que permite alocação das tarefas restantes do produto com maior tempo de operações ainda não alocadas. Em outras palavras, o AVM permite que, para cada troca de estação de trabalho, o conteúdo total de trabalho do modelo em análise seja distribuído de forma equilibrada para as estações restantes. As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram o RPW sem alvo-móvel e com alvo móvel (AVM), respectivamente. O AVM gera um melhor índice de suavidade para LM e, por consequência, benefícios de caráter ergonômico e produtivo.

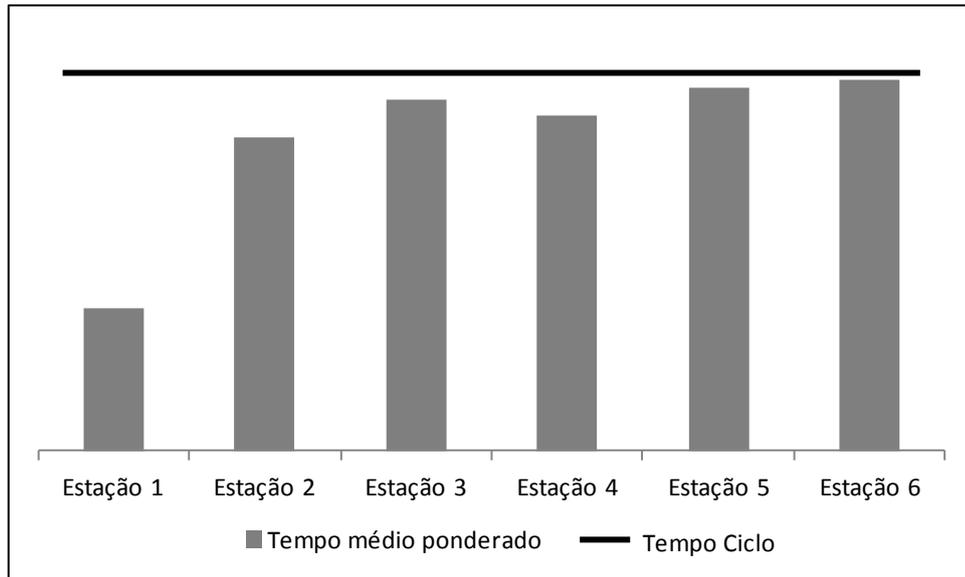


Figura 3.7 – Balanceamento com heurística RPW sem AVM

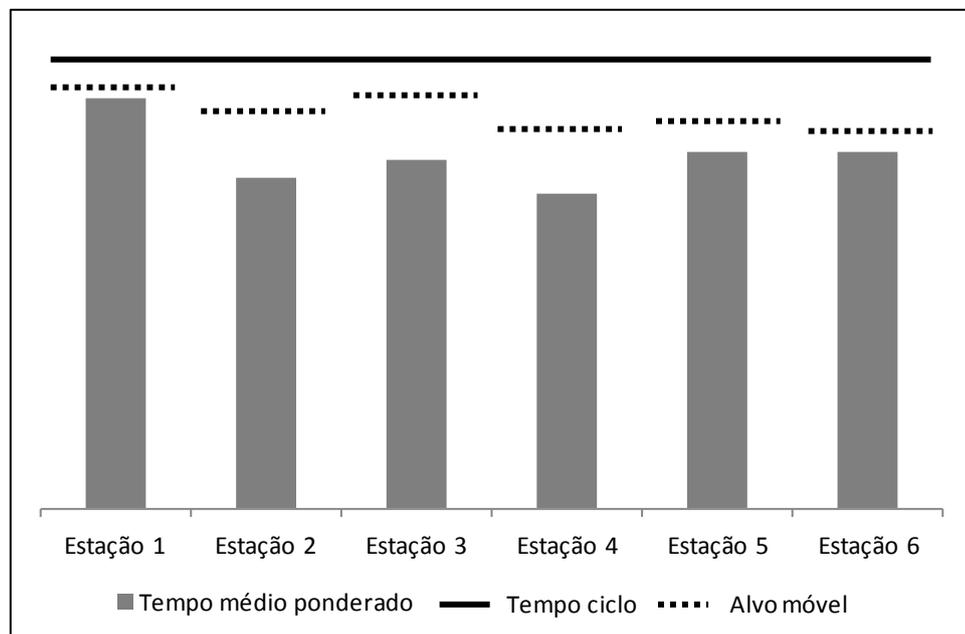


Figura 3.8 – Balanceamento com heurística RPW com AVM

Na sequência são apresentados os passos para operacionalização do RPW-AVM.

Passo 1: Definir o diagrama/matriz de precedência equivalente de todos os modelos;

Passo 2: Diferentemente do RPW em LM Uni-modelo, o RPW-AVM trata de um balanceamento em um LM com mais de um modelo de produto, sendo que cada modelo possui seu próprio tempo de processamento das tarefas. Assim, para obter-se o tempo médio de processamento das tarefas comuns aos diferentes modelos, é preciso definir a proporção de cada modelo a ser produzido através da equação (7)

$$pd_m = \frac{d_m}{D} \quad (7)$$

onde d_m é a demanda do produto m no período p , tal que $m=1, \dots, M$; e D a soma da demanda de todos os modelos para o período p . O histórico de demanda dos produtos ou o plano de produção são fontes de consulta para definição do número de produtos do modelo m .

Passo 3: Calcular o tempo de ciclo (T_c) com base na demanda total de produção a ser atendida através da equação (1);

Passo 4: Conforme comentado anteriormente, o RPW-AVM trata com tempos de um produto equivalente da LM Mista. Logo, para a alocação das tarefas no RPW-AVM, utilizar o tempo médio ponderado (\bar{t}_k) e o tempo total médio ponderado da estação (\bar{S}_j), calculados através das equações (8) e (9), respectivamente.

$$\bar{t}_k = \sum_{m=1}^M pd_m t_{k,m} \quad (8)$$

$$\bar{S}_j = \sum_{k \in j} \bar{t}_k \quad (9)$$

onde $t_{k,m}$ representa o tempo de processamento da tarefa k no modelo m e pd_m a proporção do modelo m .

Passo 5: Calcular o *RPW* de cada tarefa somando o \bar{t}_k aos tempos de processamento de todas as tarefas precedentes do diagrama de precedência equivalente;

Passo 6: Ordenar as tarefas em ordem decrescente de *RPW*;

Passo 7: Calcular o número mínimo de estações de trabalho para balanceamento da LM (*MinW*) e então definir a última estação de trabalho ($W = \text{MinW}$) baseado nas equações (10) e (11), onde CTT_m representa a carga total de trabalho do modelo m .

$$CTT_m = \sum_{k=1}^N t_{k,m} \quad (10)$$

$$\text{MinW} = \left\lceil \frac{CTT_m}{T_c} \right\rceil, m = 1, \dots, M \quad (11)$$

Passo 8: Definir $j = W$;

Passo 9: Calcular o alvo móvel da última estação de trabalho j para todos os modelos ($AVM_{j,m=1, \dots, M}$). O AVM é necessário para cada modelo de produto e deve ser recalculado a cada nova estação de trabalho balanceada durante a aplicação do RPW-AVM. O alvo móvel da j -ésima estação de trabalho para o modelo m ($AVM_{j,m}$) é calculado pela equação (13), baseado no resíduo da carga de trabalho ainda não alocada dividido pelo total de estações de

trabalho ainda não balanceadas para o modelo m . A equação (12) define a carga total alocada na estação j do modelo m ($CTA_{j,m}$).

$$CTA_{j,m} = CTA_{j+1,m} + S_{j,m} \quad (12)$$

$$AVM_{j,m} = \frac{CTT_m - CTA_{j+1,m}}{MinW - (MinW - j)} \quad (13)$$

Passo 10: Iniciar o processo de alocação com a tarefa de maior RPW , alocando à estação j respeitando a relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; e o tempo total médio ponderado da estação não exceda o maior AVM ($\bar{S}_j \leq (maior AVM_{j,m=1,\dots,M})$); além disso, atentar para que, na alocação das tarefas a uma estação de trabalho, o tempo total do modelo m na estação não exceda o tempo de ciclo ($S_{j,m=1,\dots,M} \leq T_c$);

Passo 11: Continuar o processo designando tarefas às estações até que não existam tarefas viáveis para pelo menos um dos modelos;

Passo 12: Definir ($j = j - 1$) e recalculando $AVM_{j,m=1,\dots,M}$;

Passo 13: Validar a inequação ($(maior AVM_{j,m=1,\dots,M}) \leq T_c$); se atendida, avançar para o próximo passo, caso contrário, retornar para o passo 8, redefinir ($MinW = MinW + 1$) e reiniciar o processo de alocação das tarefas; e

Passo 14: Repetir os passos 10, 11, 12 e 13 até que todas as tarefas estejam alocadas.

3.3.2 Avaliação do balanceamento gerado pelo RPW-AVM

A análise do balanceamento resultante da heurística RPW-AVM apoia-se em indicadores estáticos, ou seja, sem uso de métodos de simulação dinâmica. Assim, em alguns casos, eles são calculados na posição gargalo (g) da LM, onde a produção é limitada de acordo com Peinado e Graeml (2007). Os indicadores são: (i) quantidade de estações de trabalho da LM; (ii) capacidade na situação gargalo (Cap_g); e (iii) tempo de atravessamento estimado na posição gargalo ($TAestim_g$); (iv) Eficiência de linha na situação gargalo (EF_g) e v) Eficiência de balanceamento (EB).

$$Cap_g = \frac{\text{tempo disponível no período } p}{T_g} \quad (14)$$

onde T_g , representa o tempo de processamento gargalo, definido pelo maior $S_{j=1,\dots,W,m=1,\dots,M}$.

Da mesma forma, o tempo de atravessamento estimado na situação gargalo ($TAestim_g$), apresentado na equação (15), também utiliza o tempo de processamento gargalo na sua

obtenção.

$$TAestim_g = (Quant. estações de trabalho + A) \times T_g \quad (15)$$

sendo A o número de produtos não alocados nas estações de trabalho, mas localizados entre o início e o final da LM (por exemplo, buffers).

A Eficiência de linha na situação gargalo (EL_g) é estimada pela equação (16); a Eficiência de balanceamento (EB) é obtida pela equação (17).

$$EL_g = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{t}_k}{W \times T_g} \times 100 \quad (16)$$

$$EB = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^W |\bar{S}_j - S_{av}|}{W \times S_{av}} \right] \times 100 \quad (17)$$

3.4 Resultados e Discussão

O método foi aplicado em uma LM de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas do tipo puxada com lote unitário de fabricação. A LM está organizada em cinco diferentes estações de trabalho; em cada estação de trabalho existe um operador. Além disso, entre as estações de trabalho existe um buffer unitário que tem como função absorver o tempo de processamento excedente para alguns modelos em relação ao tempo de ciclo. A Figura 3.9 ilustra o fluxo da LM atual, com o número das estações de trabalho marcado no interior dos blocos e os buffers marcados com “x” no centro. Todos os procedimentos computacionais foram realizados em planilha eletrônica.

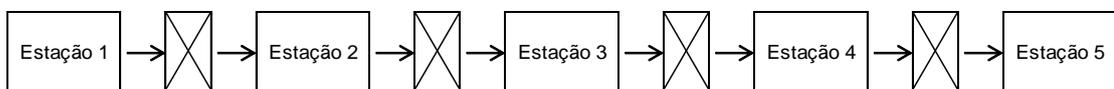


Figura 3.9 – Fluxograma da LM com balanceamento atual

A LM em estudo fabrica sete modelos de produtos, denominados CL, O, MX, CB, ATI, ATU e CH, que são montados através de até 29 diferentes tarefas, dependendo do modelo. Na Tabela 3.1 estão apresentados os modelos de produtos, as tarefas de cada estação de trabalho e a relação de precedência.

Tabela 3.1 – Tarefas executadas na LM para cada modelo

Estação trabalho	Tarefa	Descrição	Precedência	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
1	1	Introduzir pré-montagem	-	X	X	X	X	X	X	X
1	2	Pré-montar servostato	1	X	X		X	X	X	X
1	3	Montar Coluna de Direção	1		X	X	X	X	X	X
1	4	Pré-montar reservatório	1	X	X		X	X	X	X
2	5	Pré-montar pedal do acelerador	1	X	X	X	X	X	X	X
2	6	Posicionar dispositivo de pré-montagem no posto	2;3;4;5	X	X	X	X	X	X	X
2	7	Pré-montar estrutura do console	6	X	X	X	X	X	X	X
2	8	Pré-montar servostato na coluna	7	X	X		X	X	X	X
2	9	Pré-montar cabo da embreagem	7	X	X	X	X	X	X	X
2	10	Pré-montar suporte dos pedais de freio	7	X	X		X	X	X	
2	11	Montar Válvula Freio POWERFILL - 40Km	7							X
2	12	Montar válvula do freio e reservatório	10	X	X		X	X	X	
2	13	Pré-montar sensor do freio	12	X	X		X	X	X	
2	14	Montar interruptor bloqueio do diferencial	7	X	X	X	X	X	X	X
2	15	Montar pedal da embreagem	9	X	X	X	X	X	X	X
3	16	Montar pedal do acelerador	7	X	X	X	X	X	X	X
3	17	Pré-montar tampões das linhas freio	11;12	X	X	X	X	X	X	X
3	18	Montar Coluna de Direção no console	8		X	X	X	X	X	X
3	19	Montar Mangueiras Hidráulicas de Direção	18	X	X	X	X	X	X	X
4	20	Montar mangueiras do servostato	8	X	X	X	X	X	X	X
4	21	Montar mangueira e tubo de retorno	20;18	X	X		X	X	X	X
4	22	Montagem da abraçadeira das mangueiras do servostato	21	X	X	X	X	X	X	X
4	23	Montar volante no console	18	X	X	X	X	X	X	X
4	24	Posicionar dispositivo na posição horizontal	21	X	X	X	X	X	X	X
5	25	Montar chapa firewal	24	X	X	X	X	X	X	X
5	26	Montar porcas clips do firewall	25	X	X	X	X	X	X	X
5	27	Vedar parte externa do console	26			X	X	X	X	X
5	28	Posicionar dispositivo na posição vertical	27	X	X	X	X	X	X	X
5	29	Teste final	Todas	X	X	X	X	X	X	X

A carga de trabalho da LM atual é apresentada na Figura 3.10, com os tempos (em minutos) por estação de trabalho e por modelo.

A demanda atual planejada da LM é de 37 produtos por turno, os quais são lançados aleatoriamente em produção (sem sequenciamento estruturado). Cada turno é composto por 480 minutos de tempo para produção, excluindo paradas para reunião, almoço e intervalos.

Como pode ser visto na Figura 3.10, apenas as estações 3 e 5 possuem capacidade de 37 produtos/turno para qualquer produto, visto que o tempo de todos os modelos de produto é inferior ao tempo de ciclo. Atualmente, a capacidade da LM na situação gargalo é de 28 produtos por turno.

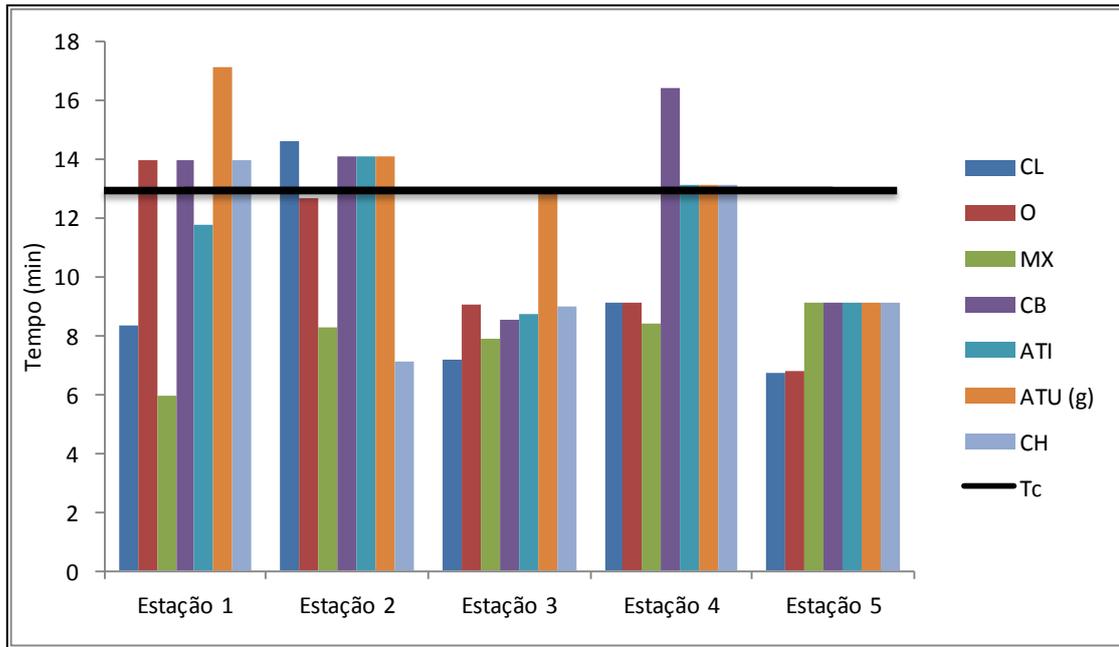


Figura 3.10 – Balanceamento LM atual

Na Tabela 3.2 apresenta-se o mix de produtos utilizando o plano de produção da empresa e a proporção de cada modelo calculado a partir da equação (7).

Tabela 3.2 - Definição do mix de produção

	MODELO DE PRODUTO							Σ
	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH	
MIX (quant. por modelo)	0,8	1,2	0,4	12,5	1,7	20,0	0,4	37,0
Proporção do modelo	2%	3%	1%	34%	4%	54%	1%	100%

Em seguida foi elaborada a matriz de precedência equivalente a todos os modelos, conforme a Figura 3.11.

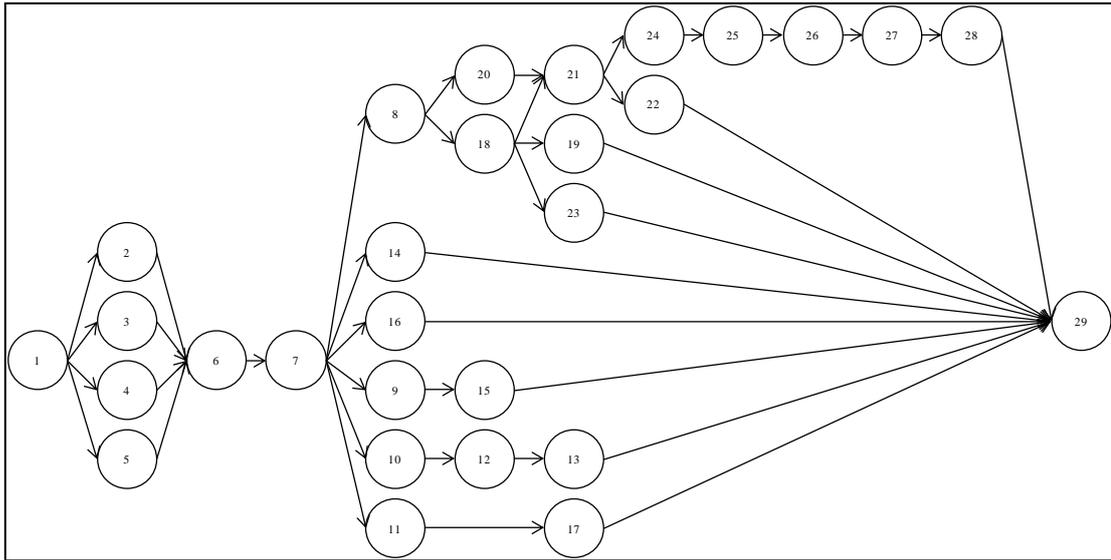


Figura 3.11 - Diagrama de precedência equivalente

Baseado na demanda total de 37 produtos por turno, calculou-se o tempo de ciclo (T_c) através da equação (1).

$$T_c = \frac{\text{tempo disponiveis no periodo } p}{\text{demanda no periodo } p} = \frac{480}{37} = 12,97 \text{ min}$$

A Tabela 3.3 apresenta o tempo de processamento médio ponderado para cada uma das tarefas e o RPW relativo a cada tarefa, calculado através da equação (8).

Tabela 3.3 - Tempo de processamento médio ponderado e *RPW* das tarefas

Tarefa	Descrição	Proporção do modelo	MODELO DE PRODUTO							\bar{t}_k	RPW	
			CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH			
			2%	3%	1%	34%	4%	54%	1%			
1	Introduzir pré-montagem		0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
2	Pré-montar servostato		4,49	4,49	0,00	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49	4,44	4,81
3	Montar Coluna de Direção		0,00	5,59	5,59	5,59	3,40	8,77	5,59	7,08	7,44	7,44
4	Pré-montar reservatório		3,50	3,50	0,00	3,50	3,50	3,50	3,50	3,46	3,82	3,82
5	Pré-montar pedal do acelerador		3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	0,00	3,94	4,31	4,31
6	Posicionar dispositivo de pré-montagem no posto		0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	20,28	20,28
7	Pré-montar estrutura do console		0,65	0,65	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,22	21,50	21,50
8	Pré-montar servostato na coluna		3,42	1,47	0,00	2,29	2,29	2,29	2,29	2,26	23,77	23,77
9	Pré-montar cabo da embreagem		0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,00	0,55	22,05	22,05
10	Pré-montar suporte dos pedais de freio		0,96	0,96	0,00	0,96	0,96	0,96	0,00	0,94	22,44	22,44
11	Montar Válvula Freio POWERFILL - 40Km		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08	0,02	21,53	21,53
12	Montar válvula do freio e reservatório		2,08	2,08	0,00	2,08	2,08	2,08	0,00	2,03	24,47	24,47
13	Pré-montar sensor do freio		0,47	0,47	0,00	0,47	0,47	0,47	0,00	0,46	24,93	24,93
14	Montar interruptor bloqueio do diferencial		0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	22,03	22,03
15	Montar pedal da embreagem		0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,00	0,96	23,01	23,01
16	Montar pedal do acelerador		0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,47	0,93	22,43	22,43
17	Pré-montar tampões das linhas freio		0,80	0,80	0,16	0,80	0,80	0,80	1,58	0,80	25,30	25,30
18	Montar Coluna de Direção no console		0,00	1,89	1,35	1,35	1,52	5,68	1,52	3,68	27,45	27,45
19	Montar Mangueiras Hidráulicas de Direção		5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	32,89	32,89
20	Montar mangueiras do servostato		3,56	3,56	6,07	10,88	6,07	6,07	6,07	7,55	31,31	31,31
21	Montar mangueira e tubo de retorno		3,03	3,03	0,00	3,03	4,55	4,55	4,55	3,90	38,89	38,89
22	Montagem da abraçadeira das mangueiras do servostato		0,99	0,99	0,82	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	39,88	39,88
23	Montar volante no console		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	28,29	28,29
24	Posicionar dispositivo na posição horizontal		0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	39,58	39,58
25	Montar chapa firewal		2,14	2,18	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,05	41,94	41,94
26	Montar porcas clips do firewall		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	42,49	42,49
27	Vedar parte externa do console		0,00	0,00	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,31	43,80	43,80
28	Posicionar dispositivo na posição vertical		0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	44,76	44,76
29	Teste final		3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	63,03	63,03

Após a ordenação decrescente das tarefas de acordo com o valor do *RPW*, determinou-se o número da última estação de trabalho (*W*). Para isso, calculou-se o número mínimo de estações de trabalho para cada modelo (equação 11), e então definiu-se como pior caso o modelo com maior *MinW* (neste caso, o modelo ATU, conforme a Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Cálculo do *W*

	MODELO DE PRODUTO						
	CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
<i>CTT_m</i>	46,0	51,6	39,6	62,1	56,8	66,3	52,3
<i>T_C</i>	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97	12,97
<i>MinW</i>	3,55	3,98	3,06	4,79	4,38	5,11	4,03
<i>W=j</i>	6						

Na sequência, foram executados os passos 9 até 14 do método apresentado na seção 3.3. Os valores de $AVM_{j,m}$ estão apresentados na Tabela 3.5; destaca-se em negrito o valor do $AVM_{j,m}$ de acordo com *j* para alocação das tarefas às estações de trabalho.

Tabela 3.5 - Resultados do $AVM_{j,m}$

		MODELO DE PRODUTO						
		CL	O	MX	CB	ATI	ATU	CH
MinW		6	6	6	6	6	6	6
CTT_m		46,0	51,6	39,6	62,1	56,8	66,3	52,3
j = 6	CTA_{j+1}	0	0	0	0	0	0	0
	AVM_m	7,7	8,6	6,6	10,3	9,5	11,0	8,7
j = 5	CTA_{j+1}	8,4	8,5	10,6	10,8	10,8	10,8	10,8
	AVM_m	7,5	8,6	5,8	10,3	9,2	11,1	8,3
j = 4	CTA_{j+1}	18,2	18,2	16,2	20,5	22,0	22,0	22,3
	AVM_m	7,0	8,3	5,9	10,4	8,7	11,1	7,5
j = 3	CTA_{j+1}	23,5	23,6	24,1	33,2	29,9	29,9	31,3
	AVM_m	7,5	9,3	5,2	9,6	9,0	12,1	7,0
j = 2	CTA_{j+1}	31,5	31,5	26,9	41,4	38,2	42,4	35,6
	AVM_m	7,3	10,1	6,4	10,4	9,3	11,9	8,4
j = 1	CTA_{j+1}	33,6	39,2	35,3	49,7	44,4	53,9	44,0
	AVM_m	12,3	12,3	4,4	12,3	12,3	12,3	8,4

O novo balanceamento da LM é apresentado na Figura 3.12, com os tempos por estação de trabalho e por modelo.

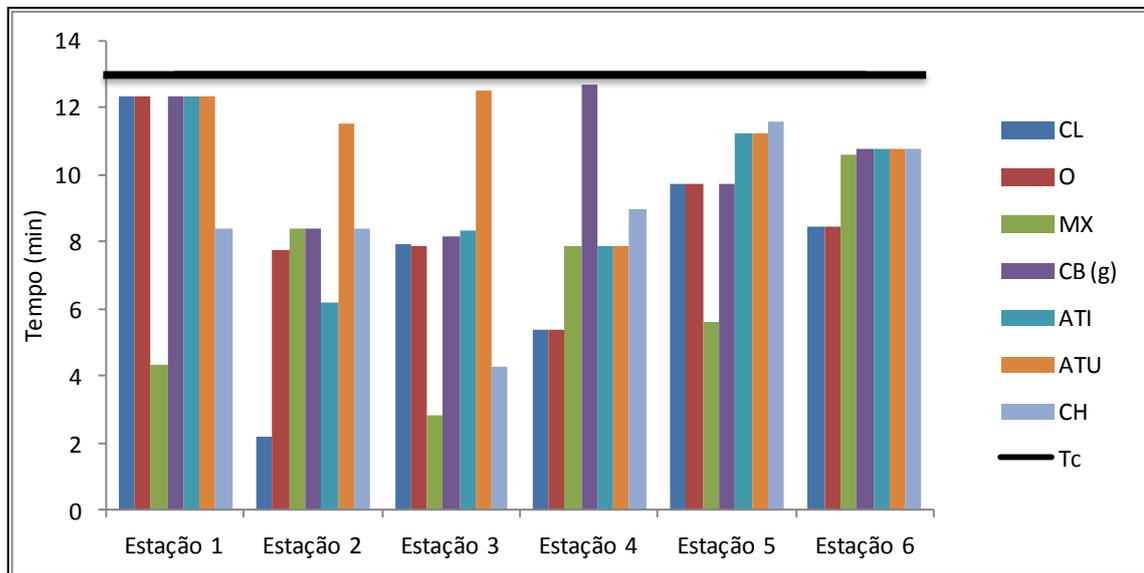


Figura 3.12 – Novo balanceamento da LM

Pode-se observar, na Figura 3.12, que todas as estações de trabalho possuem tempo de processamento menor que o tempo de ciclo. Desta forma, o novo balanceamento proporcionou à LM condições de produzir 37 produtos/turno, independente da proporção ou tipo de produto em manufatura. Um sumário da alocação das tarefas às estações de trabalho é apresentado no Quadro 3.1. Como pode ser visto, houve um incremento de 1 estação de trabalho em relação ao balanceamento atual, no entanto todas as estações de trabalho possuem

tempo de processamento inferior ao tempo de ciclo, de tal forma, assegura-se capacidade produtiva de 37 produtos/turno para qualquer modelo.

Quadro 3.1 - Alocação das tarefas as estações de trabalho para o balanceamento da LM

Estação de trabalho	Tarefa
1	1; 2; 4; 5
2	3; 6; 7; 14
3	8; 9; 10; 12; 16; 18
4	11; 15; 20; 23
5	13; 17; 19; 21
6	22; 24; 25; 26; 27; 28; 29

Outra melhoria observada refere-se aos buffers, os quais passam a ser dispensáveis por não mais existir tempo de processamento excedente em relação ao tempo de ciclo para nenhum modelo. Assim, a quantidade de produtos dentro da nova LM nunca será superior ao número de estações de trabalho, 6 (diferente do balanceamento atual, que permite até 9 produtos na LM). Logo, percebe-se uma redução de 33% de inventário em processo. A Tabela 3.6 apresenta as variáveis e os indicadores utilizados na avaliação do estado atual da LM em comparação com o novo balanceamento.

Tabela 3.6 – Variáveis e Indicadores (Atual x RPW-AVM)

		Balancamento atual	Novo balanceamento
VARIÁVEIS	Tempo disponível no período p (min)	480	480
	Demanda (pçs)	37	37
	Tempo de ciclo (min)	12,97	12,97
	Quantidade de buffers	4	0
	Modelo gargalo	ATU	CB
	T_g (min)	17,12	12,69
	CTT_g (min)	66,3	62,1
INDICADORES	Quantidade de estações de trabalho da LM	5	6
	Cap_g (pçs)	28,0	37,8
	$TAestim_g$ (min)	154,08	76,14
	Eficiência de linha na situação gargalo (EL_g)	63%	83%
	Eficiência de balanceamento (EB)	85%	94%

Os resultados apresentados pela Tabela 3.6 indicam melhoras significativas sob o ponto de vista dos especialistas da empresa. A capacidade de 37 produtos/turno superou o índice de

capacidade do estado atual em 35% para o modelo gargalo da LM. Este incremento decorre da nova distribuição das tarefas. Além disso, o novo balanceamento permite o lançamento dos produtos na LM sem sequência determinada, o que confere ao sistema grande flexibilidade.

O tempo de atravessamento estimado na situação gargalo sofreu uma redução significativa de 50%, o que representa entregar ao cliente um produto 78 minutos mais rápido do que atualmente. Por fim, a Eficiência de linha na situação gargalo apresentou uma melhora de 32%, por influência da redução do tempo de processamento da estação gargalo devido ao novo balanceamento. A Eficiência de balanceamento melhorou 11% (passando de 85% para 94%), resultando em um melhor equilíbrio de distribuição das tarefas entre as estações de trabalho em relação ao balanceamento atual.

Por fim, foi ainda realizada comparação entre o balanceamento resultante do RPW-AVM frente ao RPW tradicional aplicado em LM-Mista, conforme a Tabela 3.7. A premissa de flexibilidade para uma demanda de 37 produtos por turno não foi atendida para o caso do balanceamento proposto pelo RPW tradicional, visto que capacidade máxima na situação gargalo foi de 31,4 produtos/turno. Além disso, uma redução na eficiência de linha na situação gargalo foi evidenciada, apesar da redução de uma estação de trabalho ter ocorrido aliada ao incremento na eficiência de balanceamento de 4%.

Tabela 3.7 – Variáveis e Indicadores (RPW-AVM x RPW)

		Novo balanceamento RPW-AVM	Novo balanceamento RPW
VARIÁVEIS	Tempo disponível no período p (min)	480	480
	Demanda (pçs)	37	37
	Tempo de ciclo (min)	12,97	12,97
	Quantidade de buffers	0	0
	Modelo gargalo	CB	CH
	T_g (min)	12,69	15,28
	CTT_g (min)	62,1	52,32
INDICADORES	Quantidade de estações de trabalho da LM	6	5
	Cap_g (pçs)	37,8	31,4
	$TAestim_g$ (min)	76,14	76,38
	Eficiência de linha na situação gargalo (EL_g)	83%	82%
	Eficiência de balanceamento (EB)	94%	98%

3.5 Conclusão

Este artigo apresentou uma solução para o problema de balanceamento de LM mista originado pela mudança do mix de produtos. A heurística proposta tem o objetivo de reduzir as restrições de capacidade produtiva nas estações de trabalho dentro de uma demanda total definida para variados mix sem a necessidade de sequenciamento para lançamentos dos produtos na LM. Para isso, a proposta de heurística de balanceamento LM mista alvo-móvel (RPW-AVM) é fundamentada em três restrições: (i) atender relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel, e (iii) alocar as tarefa a uma estação de trabalho até que tempo total do modelo m na estação não exceda o tempo de ciclo.

A heurística RPW-AVM foi aplicada na LM de uma empresa do segmento agrícola. A LM analisada atualmente está organizada em cinco diferentes estações de trabalho onde são fabricados sete modelos de produtos (CL, O, MX, CB, ATI, ATU e CH), montados através de até 29 diferentes tarefas. No entanto, a capacidade na situação gargalo é de 28 produtos/turno, não satisfazendo a demanda de 37 produtos/turno. Aplicada a heurística RPW-AVM proposta no sistema, verificou-se um incremento da capacidade de produção para o modelo gargalo em 35% por consequência da melhor distribuição das tarefas com o aumento da quantidade de estações de trabalho (de 5 para 6). Também, foi confirmada a dispensabilidade do lançamento sequenciado dos produtos na LM. O tempo de atravessamento reduziu significativamente na situação gargalo da LM, demandando 78 minutos a menos do que o arranjo antigo. A Eficiência de linha na situação gargalo apresentou uma melhora de 32%, ao passo que a Eficiência de balanceamento que incrementou em 11% por conta da melhor distribuição das tarefas entre as estações de trabalho. Por fim, uma comparação da heurística RPW-AVM e RPW tradicional aplicada à LM Mista foi realizada; observou-se uma melhora na eficiência de balanceamento em 4%, como a redução de uma estação de trabalho. No entanto, a condição de flexibilidade não foi suportada pelo RPW tradicional, concluindo-se que apenas o RPW-AVM atende às premissas colocadas neste cenário.

Sugere-se para desenvolvimentos futuros a avaliação do balanceamento proposto pela heurística através de simulação dinâmica com auxílio de software computacional; pretende-se identificar pontos não cobertos pela análise atual, como o comportamento da Eficiência de linha de acordo com a variação do mix de produtos. Sugere-se também outra adaptação para balanceamento de LM Uni-modelo utilizando conceito do alvo móvel além da criação de um

aplicativo baseado na heurística proposta com o intuito de reduzir o tempo de execução do algoritmo.

3.6 Referências

- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, v. 168, p. 694-715, 2006.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 183, p. 674-683, 2007.
- CHOW, W-M. *Assembly line design: Methodology and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1990.
- CRISTO, R. L. *Balanceamento de Linhas de Montagem com uso de algoritmo genético para o caso de linhas simples e extensões*. Tese de mestrado em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2010.
- DRISCOLL, J.; THILAKAWARDANA, D. The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v. 17, p. 81-86, 2001.
- FARNES, V. C. F.; PEREIRA, N. A. Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. *Gestão da Produção, Operações e Sistema*, v. 2, p. 125-136, 2006.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO, F. M.; CUTIGI, R. A.; GUIGUET, A. M. A. O uso de programação interia 0-1 para o balanceamento de linhas de montagem: modelagem, estudo de caso e avaliação. *Produção*, v. 18, n. 2, p. 210-221, 2008.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. *Administração da produção e operações*. Tradução José Carlos Barbosa dos Santos; revisão Petrônio Garcia Martins, 8ª Ed. São Paulo: Thomson Learning, 2002.
- GERHARDT, M. P. *Sistemática para aplicação de procedimento de balanceamento em linhas de montagem multi-modelos*. Tese Mestrado em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- GHOSH, S.; GAGNON, R. J. Advances in manufacturing assembly systems. *Control and Dynamic Systems*, v. 46, p. 355-405, 1991.
- GOLDRATT, E. *Theory of constraints*, Great Barrington: Noth River Press, 1990.
- KRIENGGORAKOT, N.; PIANTHONG, N. The assembly line balancing problem: Review articles. *KKU Engineering Journal*, v. 34 n. 2, p. 133-140, 2007.
- KUMAR, S. A.; SURESH, N. *Operations Management*. New Age International Limited Publishers, 2009.
- LEONE, G.; RAHN R. D. *Fundamentos de La Manufactura de Flujo*. Boulder. Colorado USA, 2004.
- LUCERTINI, M.; PACCIARELLI, D.; PACIFICI, A. Modeling an assembly line for configuration and flow management. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v. 11, n. 1-2, p. 15-24, 1998.
- MARLIN, P. G. Manufacturing lead time accuracy. *Jornal of Operation Management*, v. 6, n.2, 1986.
- MENDES, A. R.; RAMOS, A. L.; SIMARIA, A. S.; VILARINHO; P. M. Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC câmera assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, v. 49, n. 3, p. 413-431, 2005.

- MONKS, J. G. Operations management. Theory and problems. 3a ed. New York: McGrawhill 1987.
- ÖZTÜRK, A.; KAYAHGIL, S.; ÖZDEMIREL, N. E. Manufacturing lead time estimation using data mining. *European Journal of Operational Research*, v. 173, p. 683-700, 2006.
- PEINADO, J.; GRAEML, A. R. Administração da produção: operações industriais e de serviços. Curitiba, UnicenP, 2007.
- PONNAMBALAM, S. G.; ARAVINDAN, P.; G. MOGILEESWAR N. A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15; p. 577-586, 1999.
- PRAÇA, I. C. C. S. Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais. Tese de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- REKIEK, B.; DELCHAMBRE, A.; DOLGUI, A.; BRACCTCU, A. Assembly Line Design: A Survey. 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002a.
- REKIEK, B.; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A.; BRACCTCU, A. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, v. 26, p. 163-174, 2002b.
- SARKER, B. R.; PAN, H. Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers & Industrial Engineering*, v. 34, n. 3, p. 609-628, 1998.
- SOUZA, M. C. F.; YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; FILHO, E. V. G. Análise de alocação de mão-de-obra em linhas de montagem multimodelo de produtos com demanda variável através do uso de simulação: um estudo de caso. *Revista Produção*, v. 13, n. 3, 2003.
- 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, 1997.
- VAN ZANTE-DE FOKKET, J. I.; DE KOK, T. G. The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. *European Journal of Operation Research*, v. 100, p. 399-412, 1997.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o interesse constante em aumentar o *Market Share* através da oferta de maior variedade de produtos e preços atrativos, as empresas têm empregado significativos esforços no que diz respeito à redução de custo de produção e incremento de eficiência. Neste contexto, sistemáticas voltadas ao balanceamento de linhas produtivas têm cumprido relevante papel, além de motivar o desenvolvimento de novas abordagens para tal fim.

O primeiro artigo desta dissertação apresentou uma sistemática de decisão para balanceamento de linha de produção quando da introdução de um novo produto. Esta sistemática, apoiada no método Delphi, tinha como primeiro objetivo auxiliar na decisão de encaminhar o novo produto a uma linha existente ou construir uma nova linha para esse produto. Com base em tal decisão, a abordagem então aplicava uma sistemática para balanceamento uni-modelo ou multi-modelo.

A sistemática proposta foi aplicada em uma LM de uma empresa do segmento agrícola que produz dois diferentes subconjuntos, denominados Alfa e Beta, e avaliar a introdução de um novo subconjunto, Zebra. De acordo com a primeira etapa da sistemática, foi indicada a fabricação do produto Zebra em uma LM exclusiva baseada na conclusão da mediana e amplitude inter-quartil dos resultados oriundos da aplicação do questionário Delphi aos especialistas. Na segunda etapa, uma nova heurística (MRPW) foi aplicada para balanceamento uni-modelo da LM. Os resultados da heurística MRPW foram considerados satisfatórios baseados nos indicadores de desempenho. O aumento de 45% do Índice de Suavidade proporcionou melhor eficiência do balanceamento da LM comparado com os resultados do RPW original.

O segundo artigo apresentou uma solução para o problema de balanceamento de LM mista emanado pela mudança do mix de produtos. O objetivo da heurística sugerida é atenuar restrições de capacidade produtiva para as estações de trabalho da LM em variados mix de produtos, além de dispensar sequenciamento de lançamento dos mesmos na LM. Denominada heurística de balanceamento LM mista alvo-móvel (RPW-AVM), a mesma foi baseada nas seguintes restrições: (i) atender à relação de precedência do diagrama de precedência equivalente; (ii) alocar as tarefas a uma estação de trabalho até que o tempo total médio ponderado da estação não exceda o alvo móvel, e (iii) alocar as tarefa a uma estação de trabalho até que tempo total do modelo m na estação não exceda o tempo de ciclo.

O RPW-AVM foi aplicado em uma LM de uma empresa do segmento agrícola que

produz sete modelos de produtos ao longo de cinco estações de trabalho. Atualmente, a capacidade de produção na situação gargalo é restrita a 28 produtos/turno, representando uma diferença de 9 produtos/turno da capacidade esperada para a LM estudada. Após a aplicação do RPW-AVM, verificou-se um incremento de 35% na capacidade produtiva decorrente da melhor distribuição das tarefas e do aumento de uma estações de trabalho (passando de cinco para seis). Além disso, o tempo de atravessamento foi reduzido em 78 minutos em comparação com o balanceamento atual. A eficiência de linha na situação gargalo melhorou 32% e a eficiência de balanceamento aumentou 11%. Além disso, foi confirmada a dispensabilidade do lançamento sequenciado dos produtos na LM. Por ultimo, uma comparação do RPW-AVM com RPW tradicional foi realizada onde foi observado-se um incremento da eficiência de balanceamento e a redução de uma estação de trabalho resultante do RPW tradicional, porém não atendendo a premissa de flexibilidade para demanda total como proposto pelo RPW-AVM.

Como sugestões para desenvolvimentos futuros, propõe-se a avaliação do balanceamento proposto pela heurística RPW-AVM, através de simulação dinâmica com auxílio de software computacional. Desta forma, almeja-se identificar pontos não cobertos pela análise atual, como o comportamento da Eficiência de linha de acordo com a variação do mix de produtos. Também visualiza-se uma adaptação do balanceamento de LM Uni-modelo utilizando conceito do alvo móvel é recomendada. Por fim, recomenda-se a implementação do algoritmo de balanceamento em plataforma computacional com vistas a sistemas mais complexos (visto que os procedimentos deste artigo foram implementados em planilha eletrônica).