UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

MARCELO DA SILVA MEIRA

OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO DE UMA LINHA DE MONTAGEM MISTA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2015

MARCELO DA SILVA MEIRA

OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO DE UMA LINHA DE MONTAGEM MISTA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências – Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

CURITIBA
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M514o Meira, Marcelo da Silva
2015 Otimização de produção de uma linha de montagem mista na indústria automotiva por meio de programação matemática / Marcelo da Silva Meira.-- 2015.
147 p.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015.
Bibliografia: p. 133-135.

1. Processos de fabricação - Automação. 2. Indústria automobilística. 3. Sistemas flexíveis de fabricação. 4. Programação linear. 5. Programação inteira. 6. Modelos matemáticos. 7. Métodos de linha de montagem. 8. Balanceamento de linha de montagem. 9. Métodos de simulação. 10. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Magatão, Leandro, orient. II. Rodrigues, Luiz Carlos de Abreu, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Curitiba

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Dissertação Nº. ____

Otimização de Produção de uma Linha de Montagem Mista na Indústria Automotiva por Meio de Programação Matématica.

por

Marcelo da Silva Meira

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Engenharia de Automação e Sistemas** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **14**:**00h** do dia **28 de outubro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Leandro Magatão (Presidente – UTFPR)	Profa. Dra. Maria Teresinha Arns Steiner (PUCPR/UFPR)
Prof. Dr. Ricardo Luders (UTFPR)	Prof. Dr. Luiz Fernando Nunes (UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Leandro Magatão, por seu empenho e estímulo nos diversos momentos do percurso dessa pesquisa desde as aulas da disciplina de Otimização de Sistemas a sua constante orientação e contribuição ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Meu agradecimento ao coorientador Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues que nos recebeu para a troca das primeiras ideias e iniciou as primeiras orientações, direcionando o trabalho. Inicialmente com desenvolvimento da modelagem matemática do balanceamento, e posteriormente, a do sequenciamento, disponibilizando as ferramentas e os modelos matemáticos para Simulação, bem como o seu incansável suporte, mesmo durante seu período de pós-doutorado fora do país.

Ao coordenador do CPGEI, Prof. Ricardo Lüders, que juntamente com o Prof. Leandro Magatão aceitou o projeto no programa de pós-graduação do CPGEI.

Ao colega João Alfredo Sikorski Van Der Neut, por compartilhar os dados de seu trabalho de pesquisa, bem como o modelo de balanceamento que serviu de base para construir o modelo de sequenciamento e ao colega Diego Hilgenstieler que contribuiu com a construção do modelo para a simulação discreta.

Minha gratidão especial ao meu tutor Nilson Ricetti Xavier Nazareno e sua família. Através de sua imensa caridade, acolheu-nos e ensinou-me as primeiras ferramentas que me permitiu ultrapassar meus próprios limites.

A minha família, pela compreensão e apoio.

RESUMO

MEIRA, Marcelo da Silva. OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO DE UMA LINHA DE MONTAGEM MISTA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA 147 f. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho utiliza a Programação Linear Inteira Mista (MILP) para investigar as diferenças de produtividade encontradas em uma Linha de Montagem de Modelo Misto. A abordagem de solução foi através da construção e resolução de modelos matemáticos do problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo misto (MALBP – *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*), seguido do problema de sequenciamento de carros (PSC – *Car Sequencing Problem*). Uma simulação discreta foi utilizada para verificar os resultados dos modelos matemáticos. O estudo relata o caso real de uma linha de montagem da indústria automotiva das partes móveis das carrocerias de três diferentes veículos compartilhando a mesma linha de produção. A linha de produção é caracterizada como baixa cadência (de até 15 veículos/hora) e totalmente manual. A linha é constituída por mesas de rolos em série onde o acionamento é do tipo de passo não sincronizado. O objetivo é investigar como manter o melhor nível de produtividade da linha de produção e, ao mesmo tempo, manter a característica de flexibilidade para atender a uma demanda variável em volume e diversidade de produto. São apresentados resultados desse trabalho que indicam que é possível a obtenção de alguns balanceamentos flexíveis para alguns *mixes* de produtos, o que permite manter a diferença nos tempos de produção no limite de 6%, para esta correta combinação de balanceamento-sequenciamento. No entanto, verificando as demais combinações possíveis para os seis *mixes* de produtos avaliados, o tempo de produção apresentou diferenças de até 19%, dependendo da sequência de entrada dos produtos para um certo *mix*. Outro fator que também ocasionou diferenças dos tempos produtivos, de 20% em média, foi em relação a alocação/ausência de postos pulmões (*buffers*). O horizonte da análise, *a priori*, foi de um lote de produção de uma hora para o modelo matemático e de uma semana de produção para o modelo de simulação discreta. Os resultados obtidos no estudo indicam que é possível operar uma linha de montagem flexível com uma produtividade equiparável a linhas de montagem de único modelo, se cuidados relativos ao balanceamento e sequenciamento produtivos forem observados. Por outro lado, se as condições operacionais de balanceamento e sequenciamento para as linhas de montagem de modelos/produtos mistos não forem consideradas, as perdas acumuladas na taxa de produção podem ser significativas (por exemplo, tempos de produção para algumas condições de teste ultrapassaram em 30% o valor teórico estimado).

Palavras-chave: Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto (MALBP), Sequenciamento de Linhas, Produção Flexível, Indústria Automotiva.

ABSTRACT

MEIRA, Marcelo da Silva. PRODUCTION OPTIMIZATION OF MIXED MODEL ASSEMBLY LINE IN AUTOMOTIVE INDUSTRY USING MATHEMATICAL PROGRAMMING 147 f. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This work uses Mixed Integer Linear Programming (MILP) to investigate productivity differences found in a Mixed-Model Assembly Line. The solution approach was based on construction and resolution of mathematical models for the *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* (MALBP), followed by the *Car Sequencing Problem* (CSP). A discrete simulation was used to check the results obtained by the mathematical models. The study reports the real case of an automotive metal line that assemblies the closures of three different vehicles, sharing the same production line. The production line is characterized as low cadence (*e.g.*, up to 15 vehicles/hour) and fully manual. The line is formed by roller tables in series with unpaced devices. The main objective is to investigate how to maintain productivity, while maintaining the flexibility characteristic to meet a variable demand in volume and product diversity. Results of this study are presented and indicate that some flexible balancing mixes are viable. Production time differences of no more than 6% were observed in such flexible choices. However, the checking of some possible combinations for the six mixes of evaluated products showed a production time difference up to 19%, depending on the sequence of products for a certain mix. Another factor that also influenced production time differences, 20% on average, was the allocation of buffers. The horizon of analysis encompasses a lot of production of one hour, to the mathematical model, and a week for discrete simulation. The obtained results indicate that it is possible to operate a flexible assembly line with a level of productivity similar to a single product line, in case of careful choices in balancing/sequencing. On the other hand, if the operating conditions of balancing and sequencing were not taken into account the cumulative loss in throughput may be significant (*e.g.*, for some studied cases, production time exceed 30% the theoretical value).

Keywords: Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem (MALBP), Production Sequence, Flexible Production, Automotive Industry.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de algumas contribuições do estudo sobre linhas de montagem (RAO, 1971) . 34
Tabela 2 – Resumo do exemplo da Figura 5 37
Tabela 3 – Principais definições utilizadas no balanceamento de linha de produção 39
Tabela 4 – Classificação de linha de montagem (BOYSEN et al. 2008). 46
Tabela 5 – Vantagens do processo de nivelamento da produção (MARKSBERRY, 2013) 72
Tabela 6 – Heurísticas construtivas avaliadas por Brasil et al. (2013) 73
Tabela 7 – Mix de produtos considerado nos estudos 83
Tabela 8- Referência de tempo de execução dos modelos matemáticos em MILP 109
Tabela 9 – Avaliação do tempo transporte (sem buffer). 112
Tabela 10 – Ilustração do efeito do buffer entre postos na redução do tempo WS. 112
Tabela 11 – Sequências mais rígidas pela ausência de buffer 114
Tabela 12 – Sequências mais flexíveis com presença de buffer entre postos. 115
Tabela 13 – Demanda do mix1 e dados do balanceamento do mix1 ao mix6 117
Tabela 14 – Demanda do mix2 e dados do balanceamento do mix 1 ao mix 6 118
Tabela 15 – Demanda do mix3 e dados do balanceamento do mix 1 ao mix 6 118
Tabela 16 – Demanda do mix4 e dados do balanceamento do mix 1 ao mix 6 119
Tabela 17 – Demanda do mix5 com balanceamento do mix 1 ao mix 6. 119
Tabela 18 – Demanda do mix6 com balanceamento do mix 1 ao mix 6. 119
Tabela 19- Variação do Mix versus Tempo WS: Resumo dos Resultados Obtidos. 120
Tabela 20 – Várias sequências com mesmo tempo de execução H para Mix 1. 121
Tabela 21– Sequências com mesmo tempo WS para Mix misto(123a). 121
Tabela 22 – Síntese das sequências de menores tempos para os balanceamentos otimizados. 122
Tabela 23 – Comparação de experimentos no GAMS e WITNESS 123
Tabela 24 - Postos com % de tempo bloqueado 124
Tabela 25 – Resultados práticos aplicados no estudo de caso 127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diversidade em linhas de montagem *23*
Figura 2 - Desenvolvimento do mercado automobilístico (ELMARAGHY, 2008) *26*
Figura 3- Fatores de influência na produtividade da linha de montagem *27*
Figura 4 – Montagem de rodas magneto na fábrica da Ford Motor (FORD, 1922) *32*
Figura 5 – Gráfico de precedência (SCHOLL, 1999) *37*
Figura 6 – Esquema da esteira de passo sincronizado (RAO, 1971). *40*
Figura 7 – Linha passo contínuo com borda de linha clássica *41*
Figura 8 - Borda de linha passo não sincronizado e não contínua (stop-and-go) *41*
Figura 9 – Layout típico recomendado para linha de passo não sincronizado (SCHOLL, 1999). *42*
Figura 10 – Configuração para linha de passo não sincronizado com buffer entre postos *43*
Figura 11 - Implantação da linha de montagem clássica com peças na borda da linha *47*
Figura 12 - Sistema de abastecimento por kitting *48*
Figura 13 - Diagrama de Causa do procedimento prático de balanceamento (RAO, 1971) *50*
Figura 14 – Estados de sistema abordado por simulação de eventos discretos (TAMANI, 2008) *55*
Figura 15 - Diagrama dos estados simplificados de um STP (TAMANI, 2008) *56*
Figura 16 - Elementos do ambiente de Simulação WITNESS *57*
Figura 17 – Cenários de produção para três modelos diferentes de carrocerias de veículos (ELMARAGHY, 2008) *61*
Figura 18 - Exemplo de variedade e complexidade do mercado (MASKSBERRY, 2013) *76*
Figura 19 – Escopo do estudo – Setor de Carroceria *77*
Figura 20 – Implantação do processo pelo Balanceamento (NEUT, 2013) *78*
Figura 21 – Exemplo de variação da duração da tarefa entre os produtos *79*
Figura 22 – Estrutura do produto X *80*
Figura 23 – Estrutura do produto F, B, e C. *81*
Figura 24 – Estrutura produto H *81*
Figura 25 – Variação do mix dos produtos no período de 12 semanas. *82*
Figura 26 – Princípios de manufatura na produção de carrocerias de veículos (ELMARAGHY, 2008) *85*
Figura 27 – Abordagem da solução do problema de otimização *89*
Figura 28 – Esquema do agrupamento das tarefas por produto *90*
Figura 29 – Gráfico de Gantt do tempo de produção da sequência a produzir. *92*

Figura 30 – Ilustração da abordagem de solução do problema *93*
Figura 31 – Fluxo de atividades para gerar o sequenciamento no GAMS/CPLEX *93*
Figura 32 - Modelo da linha de montagem no WITNESS *94*
Figura 33 – Relatório estatístico dos postos conforme o mix utilizado *95*
Figura 34 - Representação das variáveis ociosidades e esperas (GUÉRET et al., 2000). *105*
Figura 35 – Detalhe da tabela experimentos *111*
Figura 36 – Gráfico do comportamento do histórico de experimentos realizados *114*
Figura 37 - Resultado de alocação dos postos para otimização do sequenciamento *115*
Figura 38 – Efeito do mix de produção no sequenciamento *116*
Figura 39 – Alteração da posição do buffer entre posto *125*
Figura 40 – Níveis de produtividade na linha de modelo misto em estudo. *126*

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ALB	*Assembly Line Balance*
AGV	*Auto Guided Vehicle*
CLP	Controladores Lógicos programáveis
CO	*Combinatorial Optimization*
COP	*Combinatorial Optimization Problem*
DST	*Design Standard Time*
DSTR	*Design Standard Time Ratio*
EOM	*Equipment Original Manufacturers*
FTE	*Full-Time Equivalente jobs or person*
GAMS	*General Algebraic Modeling System*
HPU	*Hour Per unit*
HPV	*Hour Per Vehicle*
ILS	*Iterated Local Search*
JIT	*Just- in-Time* (Produção sincronizada)
MALBP	*Mixed-Model Assembly Line Balance Problem*
MTBF	*Mean Time Between Failure*
MTTR	*Mean Time To Repair*
NVA	Operações que não agregam valor
OHPU	*Organizational Hours Per Unit*
MILP	Programação Linear Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
PR	Programação por Restrições
PSC	Problema de Sequenciamento de Carros
SALBP	*Simple Assembly Line Balance Problem*
SC	Satisfação de restrições
STP	Sistema de Tratamento do Produto
takt time	Tempo da cadência de produção na linha final
Tcy	Tempo de Ciclo
TPS	*Toyota Production System*
VLFS	*Very Fast Local Search* (Algoritmo de busca rápida)
WIP	*Work In Process*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 23

1.1 MOTIVAÇÃO 24

1.2 OBJETIVOS 27

1.2.1 OBJETIVO GERAL 28

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 28

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 29

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 31

2.1 HISTÓRICO DA LINHA DE MONTAGEM 31

2.2 FUNDAMENTOS DA LINHA DE MONTAGEM 35

2.2.1 PRINCÍPIOS DA LINHA DE MONTAGEM 35

2.2.2 TERMOS BÁSICOS DA LINHA DE MONTAGEM 36

2.2.3 CLASSIFICAÇÃO DA LINHA DE MONTAGEM 40

2.3 INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA 51

2.4 INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO 54

2.4.1 O *SOFTWARE* DE SIMULAÇÃO *WITNESS* 57

2.5 BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM 59

2.5.1 PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA MISTA (MALBP) 61

2.6 ABORDAGENS DE SOLUÇÃO 63

2.6.1 SOLUÇÕES *AD HOC* 63

2.6.2 SOLUÇÕES EXATAS PARA O BALANCEAMENTO 65

2.6.3 SOLUÇÕES EXATAS PARA O SEQUENCIAMENTO 67

2.6.4 SOLUÇÕES APROXIMADAS PARA O SEQUENCIAMENTO 72

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 73

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 75

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 75

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO 76
3.3 ABORDAGEM DA DECOMPOSIÇÃO ADOTADA 79
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO E DA DEMANDA 80
3.5 A QUESTÃO DO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO 84
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 86
4. FORMULAÇÃO DOS MODELOS DE OTIMIZAÇÃO 87
4.1 METODOLOGIA ADOTADA 87
4.2 MODELO MILP DO BALANCEAMENTO 96
4.3 MODELO MILP PARA O SEQUENCIAMENTO 101
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 108
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 109
5.1 DADOS DE DESEMPENHO DO EXPERIMENTO 109
5.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO 110
5.3 ANÁLISE DO TEMPO DE TRANSPORTE 111
5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS *BUFFERS* 112
5.5 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO *MIX* 116
5.5.1 BALANCEAMENTOS DIFERENTES SUJEITOS A MESMA DEMANDA 117
5.5.2 BALANCEAMENTO FIXO SUJEITO A DIFERENTES DEMANDAS 119
5.6 ANÁLISE DOS SEQUENCIAMENTOS GERADOS 121
5.7 VERIFICAÇÃO ATRAVÉS SIMULAÇÃO DISCRETA 123
5.8 SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS E RESULTADOS APLICADOS 125
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 129
6.1 TRABALHOS FUTUROS 132
REFERÊNCIAS 133
APÊNDICE A - MODELO MATEMÁTICO DE SEQUENCIAMENTO IMPLEMENTADO NO *SOFTWARE GAMS* 137
APÊNDICE B - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS 143
APÊNDICE C - TABELA DOS TEMPOS DAS TAREFAS AGRUPADAS 147

1. INTRODUÇÃO

Num ambiente de excelência operacional como o da indústria automobilística, o termo *hipercompetitividade* tem sido cada dia mais empregado para representar o nível atual da busca de padrões de performance na manufatura automotiva. Por outro lado, a flexibilidade em produzir produtos diferentes ou de responder rapidamente a uma mudança de volume de produção é considerado uma vital vantagem competitiva. Nesse ambiente aparente de *tradeoff* entre produtividade e flexibilidade, está a linha de montagem. Desenvolvida há mais de um século para produzir grandes volumes de um único produto de forma eficiente, a linha de montagem teve poucas alterações desde a sua origem. Atualmente, a tendência é de uma crescente diversidade de produtos, ou modelos, que compartilham a mesma linha de montagem. Neste contexto surgem as linhas de montagem de modelo misto, ou linha mista, conforme ilustrado na Figura 1.

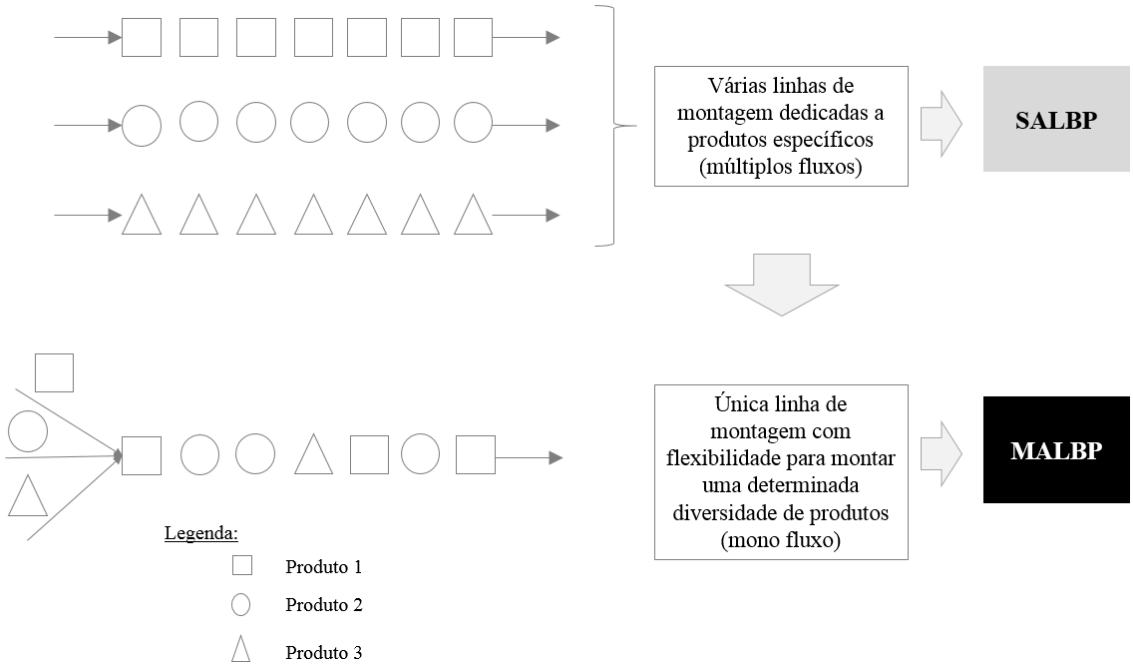


Figura 1 - Diversidade em linhas de montagem

Nas linhas dedicadas existe somente um produto específico, normalmente com uma taxa de produção estável, e não há a questão do sequenciamento produtivo. O balanceamento deste tipo de linha se reduz ao caso proposto por Scholl (1999) denominado SALBP (*Simple Assembly Line*

Balancing Problem). Já na linha de produção do tipo monofluxo, produtos diferentes são sequenciados em um mesmo fluxo de forma que haja um nivelamento de diferentes demandas de produtos, ou modelos diferentes, consolidadas num único fluxo comum. Nesse caso, a questão do balanceamento passa a ter um nível de complexidade maior. Scholl (1999) classifica o problema como MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem)* e, nesse caso, tanto o sequenciamento quanto a variação das demandas de cada modelo de produto que compõem o *mix* de produção passam a ser fatores que dificultam um balanceamento otimizado da linha de produção.

É no contexto de buscar o melhor nível de produtividade no chão de fábrica e, ao mesmo tempo, manter a característica de flexibilidade que o presente estudo de caso irá discorrer. Procura-se ao longo do trabalho entender questões que afetam a produtividade da linha de produção de modelo misto com o auxílio de técnicas da Pesquisa Operacional, em particular, o emprego de ferramentas de otimização como a Programação Linear Inteira Mista (MILP) e, de forma complementar, a Simulação Discreta.

1.1 MOTIVAÇÃO

As questões de balanceamento das operações de montagem e o sequenciamento de produtos em linhas de produção muitas vezes passam despercebidos no dia-a-dia do chão de fábrica até mesmo por conta de medidas paliativas adotadas pelas empresas, as quais acabam sobre dimensionando o sistema produtivo. Dada a sua complexidade, o tema tem desafiado os profissionais envolvidos no planejamento da produção ao longo das últimas décadas. Por outro lado, estas questões ainda reservam o desafio de proporcionar ganhos importantes de produtividade.

O equilíbrio entre flexibilidade e produtividade na indústria automobilística continua sendo um dos paradigmas dos sistemas de produção em massa. Num ambiente de constantes alterações de cenários e com ciclos de produtos cada vez mais curtos, muitas vezes a habilidade de ser flexível de uma forma produtiva, acaba sendo um importante impulsionador da competitividade. Este fato está em contraposição ao conceito inicial do surgimento das linhas de montagem da era *Ford*, onde adotava-se a estratégia de linha de montagem para um único modelo Ford (922). A alternativa de resposta de manufatura atual à grande variação de demanda tem sido o uso de linhas de montagem do tipo monofluxo, conforme ilustrado na Figura 1.

Desta forma, questiona-se: É possível atender uma demanda flexibilizada em uma linha comum de montagem mista e não ter impactos de redução de produtividade em função dessa flexibilização?

As principais vantagens das linhas monofluxo para uma produção mista são citadas por Rao (1971) como: i) permite um fluxo contínuo de cada produto ou modelo, ii) reduz inventário de produtos e peças; iii) elimina a necessidade de mudanças de configurações e *setup* da linha e permite uma grande flexibilidade na produção. A flexibilidade tem sido uma grande vantagem para responder às demandadas dos consumidores cada vez mais exigentes e que procuram produtos diferenciados. Este fato contrasta com um ambiente de produção em massa que visa a otimização máxima na operação, buscando-se o maior nível de produtividade. Por outro lado, as necessidades de customizações nos produtos acabam gerando perturbações que podem impactar na produtividade. Outro aspecto importante é a diminuição dos investimentos em várias linhas dedicadas a um único produto e também a diminuição dos riscos de insucessos de produtos que não atinjam a demanda esperada e, consequentemente, o retorno dos investimentos sobre os ativos.

Como pode ser observado na Figura 2, as linhas monofluxo têm sido uma alternativa técnica e econômica à necessidade de mercado na indústria automobilística ao longo das últimas décadas. Nesta figura indica-se, no eixo horizontal, o tempo (~décadas) e no eixo vertical os modelos de veículos fabricados, evidenciando-se a crescente diversidade presente no mercado. Esses modelos geralmente são variações de uma mesma plataforma de produtos, que possuem uma estrutura de base comum, mas que permite produzir diferentes produtos do ponto de vista do mercado. Contudo, com esses diferentes produtos numa mesma linha induz-se a desvios do tempo de produção ao longo da linha. Nesse tipo de arranjo de modelo misto ocorre uma dispersão de tempos de operação mais complexa de ser observada do que em uma linha de montagem simples, como será evidenciado no decorrer do trabalho.

O balanceamento otimizado da linha de produção, ou seja, a adequada atribuição de tarefas a estações de trabalho/trabalhadores ao longo da linha fica dependente da determinação de uma sequência programada de passagem dos diferentes produtos na linha. A atividade de balanceamento e sequenciamento da linha de montagem passa a ser um importante problema de planejamento para conservação dos níveis de produtividade.

Para os casos de linha mista, com tempo de operação diferente para cada produto, é necessário encontrar formas de operação que permitam a flexibilidade demandada e a otimização operacional da linha de montagem. O objetivo principal é o de gerar uma vantagem competitiva para a planta, ao melhor nível de performance operacional. Entre os diversos sistemas que compõem o processo da manufatura, a eliminação das perdas no engajamento dos operadores, ou seja, na

atribuição das tarefas que estes realizam na linha de montagem, é uma das formas de melhorar a produtividade geral da operação, sem perder a habilidade de responder rapidamente às variações de demanda. As empresas precisam gerir de forma eficaz o rendimento da força de trabalho, pois esta representa uma importante parcela dos custos de transformação e é um fator chave para a competitividade do negócio.

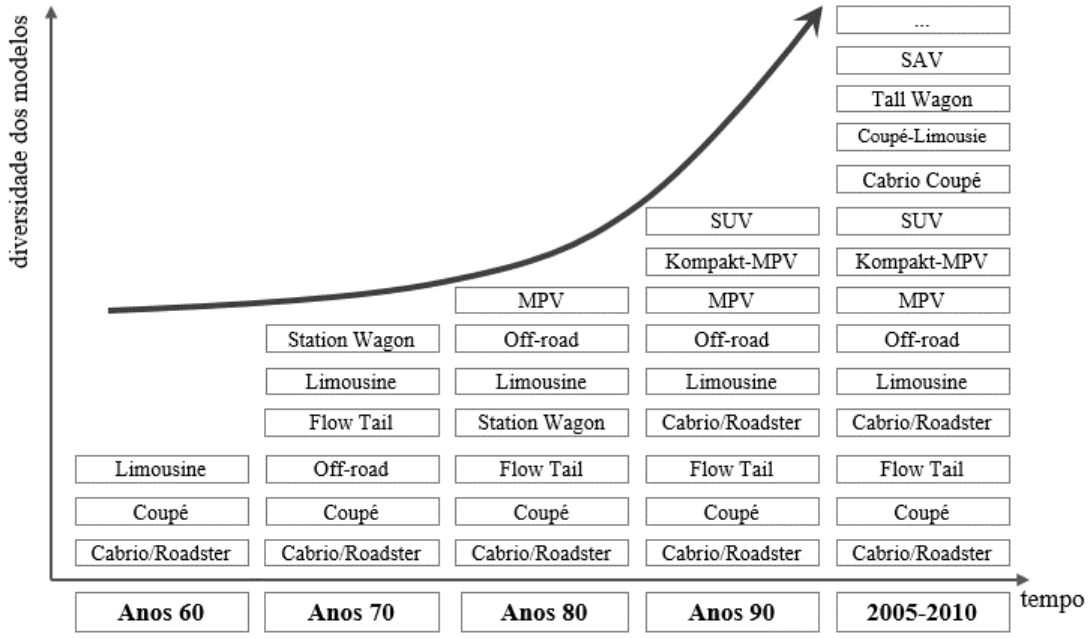


Figura 2 - Desenvolvimento do mercado automobilístico (ELMARAGHY, 2008)

Na indústria automobilística há uma tendência de contornar os problemas de balanceamento/sequenciamento recorrendo-se a recursos adicionais de força de trabalho, com algumas variações de estratégia. Uma primeira estratégia seria dimensionar toda a cadeia da linha de montagem por um tempo médio que absorveria todos os picos de tempo de produção dos diferentes modelos a produzir. Essa geralmente é a forma mais utilizada, pois a ineficiência não é facilmente percebida. Na segunda estratégia, algumas montadoras adotam a prática de flexibilizar a capacidade de produção através da adição de recursos especializados polivalentes. As principais práticas utilizadas neste contexto são: (i) desvio para retoque, (ii) utilização de força de trabalho adicional fixa e, (iii) utilização de força de trabalho flexível, todos termos na sequência detalhados. Assim, a prática (i) é a de desviar os veículos para uma área final da linha e os retocadores experientes ficam à disposição para realizar os trabalhos adicionais dos veículos que tiveram dificuldades provenientes das diversidades. Essa forma de trabalho acaba gerando complexidade de fluxos no escoamento da produção e deve ser evitada. A alternativa (ii) é a de utilizar os operadores em postos adicionais ou

temporários conforme as variações da entrada do produto na linha. Esses operadores são escalados para auxiliar a montagem das peças com tempo maior nos postos. E, por fim, a alternativa (iii) é o uso do recurso de operadores polivalentes em diversas operações, distribuídos ao longo do processo, alternativa que é pautada em operadores que não têm um posto fixo, mas teriam seu conteúdo de trabalho planejado em função da quantidade de cada produto alocado ao longo do período congelado de planejamento. Todas as alternativas mencionadas impactam no aumento do uso de mão-de-obra adicional e polivalente, afetando os custos produtivos.

1.2 OBJETIVOS

Como descrito na introdução do presente capítulo, a questão da flexibilidade para produzir diversos modelos de veículos numa mesma linha e, ao mesmo tempo, manter os níveis de produtividade será o tema principal desse estudo de caso. Na Figura 3, é ilustrado o desafio industrial em análise, que envolve as características do produto a ser manufaturado, o processo de montagem na linha monofluxo e as demandas orientadas pelo mercado. Busca-se ter um processo flexível, que permita produzir diferentes modelos de/ou produtos diferentes para responder a demandas variáveis. Especificamente, a linha objeto do estudo, é do tipo de modelo misto, de passo assíncrono e compartilha na mesma linha três produtos diferentes. Um dos produtos ainda tem três variantes sensíveis ao processo. No total são cinco diversidades de produtos passando ao longo de uma linha de montagem comum composta, inicialmente, de nove postos em série capaz de produzir em torno de 14 v/h (veículos por hora). Salienta-se que alguns dos termos citados como característica da linha serão detalhados no capítulo 2, seção 2.2.

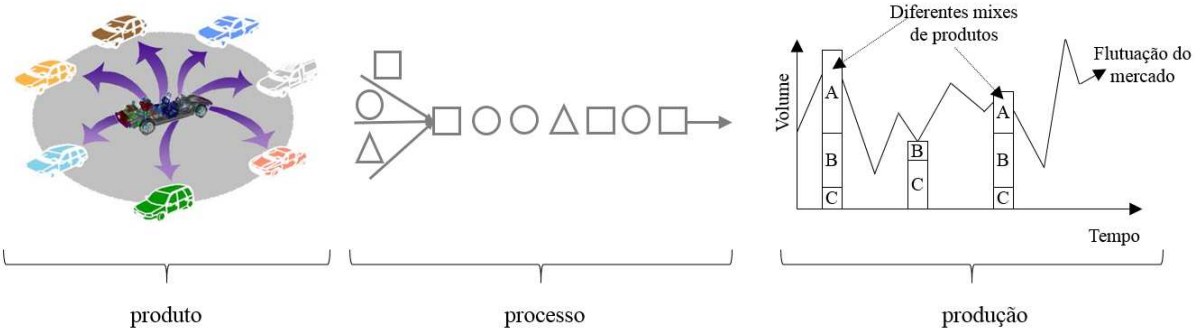


Figura 3- Fatores de influência na produtividade da linha de montagem

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do estudo é investigar, do ponto de vista da produtividade, as condições de melhor desempenho operacional de uma linha de montagem manual do tipo mista com acionamento assíncrono. Para isto, realiza-se o balanceamento da linha seguido do sequenciamento dos produtos a entrar na linha por meio de modelos em Programação Linear Inteira Mista. Adicionalmente, uma simulação discreta é utilizada para verificar os resultados obtidos com os modelos matemáticos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir de um estudo de caso real aplicado na indústria automotiva, objetiva-se quantificar as possíveis perdas de produtividade relacionadas a três fatores a analisar. O primeiro deles é em relação à variabilidade dos tempos de operações, dadas as diversidades de produtos e *mixes* desses produtos, provocados pelas variações de demanda. O segundo fator a investigar é como as sequências dos produtos que entram na linha interferem na taxa de produção. Por fim, é avaliado como a alocação de *buffers* na linha de montagem de produto misto pode influenciar na produtividade. Destaca-se que para esse estudo, o modelo de balanceamento utilizado foi desenvolvido no trabalho de Neut (2013).

A partir do acima exposto, os objetivos específicos que serão desenvolvidos ao longo do presente trabalho de pesquisa são:

(i.) Desenvolver um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista capaz de otimizar o sequenciamento da produção na linha em estudo, indicando a melhor sequência de produtos a entrar na linha de forma a diminuir o tempo de produção, nominado *WS*[1].

(ii.) Mensurar no estudo de caso as diferenças de tempo de produção por alocação de *buffer* ao longo da linha do tipo mista assíncrona.

(iii.) Quantificar o quanto as variações da demanda de produção geram perturbações de produtividade na linha.

(iv.) Mensurar o quanto as variações do *mix* produtivo interferem num balanceamento otimizado.

[1] Tempo *WS* para esse estudo, é definido como tempo de atravessamento do lote de produção no período analisado. Será explicado mais detalhadamente e exemplificado na sequência do trabalho.

(v.) Verificar os resultados através da simulação discreta, usando-a como uma ferramenta de auxílio para identificar eventuais discrepâncias da abstração do modelo de Programação Matemática em relação ao problema real. Desta forma, objetiva-se uma verificação das conclusões realizadas antes de mudanças serem implementadas no ambiente industrial.

Para a solução do balanceamento e sequenciamento são aplicados modelos de Programação Matemática, especificamente modelos de Programação Linear Inteira Mista, no intuito de se obter indicadores de como o balanceamento e a sequência de produção influenciam no desempenho da linha de montagem. A partir da análise e conclusões do estudo, a ideia é propor formas para assegurar um bom desempenho, seja no nível de programação de produção (inclusão de restrições para um nível adequado de produtividade), ou implementar soluções que concedam flexibilidade, assegurando um certo nível de desempenho no chão de fábrica.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo é apresentada a motivação do estudo e os objetivos. O que levou ao questionamento sobre o impacto de montar produtos diferentes em uma única linha comum e o objetivo de avaliar as perdas de produtividade.

No capítulo 2 realiza-se uma revisão da literatura sobre balanceamento e sequenciamento produtivos, com foco na indústria automobilística, especificamente no setor da carroceria e com viés em produtividade.

No capítulo 3 foi realizada a descrição do estudo de caso real em uma montadora de veículos utilitários de baixa cadência de produção (~15 veículos/hora) com a caracterização do processo, do produto e também a abordagem adotada para a questão da variação da demanda.

No capítulo 4 foi reintroduzido o modelo matemático de balanceamento desenvolvido anteriormente por Neut (2013), e também foi descrito o modelo matemático do sequenciamento de carrocerias dos três veículos na linha comum de montagem das partes móveis das carrocerias. O aprimoramento do modelo do balanceamento foi o escopo inicial do presente trabalho de pesquisa, posteriormente expandido para também englobar o sequenciamento produtivo.

No capítulo 5 apresentam-se os principais resultados obtidos com o estudo de caso realizado, com destaque ao fator de influência da correta alocação de *buffers* que interferem tanto no balanceamento quanto no sequenciamento. O capítulo menciona resultados da otimização matemática

e da posterior verificação por meio de simulação discreta. A simulação discreta foi desenvolvida em um *software* comercial, que será descrito na seção 2.4.1. O seu uso serviu para uma verificação e comparação com a situação real do processo antes da implementação das modificações de melhoria de produtividade na linha de produção.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais relevantes do trabalho e indicados algumas propostas de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo realiza-se uma revisão da literatura, abordo em oito secçoes. Na primeira seção, foi realizado um breve histórico da linha de montagem com o surgimento da produção em massa nas plantas da *Ford Motor*, que introduziu os conceitos de melhoria da produtividade, discutidos até os dias atuais. No segundo tópico foram apresentados os principais fundamentos e características da linha de montagem. Num terceiro tópico foi realizado um resumo sobre Programação Matemática. Em quarto, foi introduzido o tema sobre simulação discreta e um breve resumo do funcionamento do *software* WITNESS. Em quinto foi abordado o problema de balanceamento (simples e misto) e o sequenciamento de produtos na linha de montagem. No sexto tópico, foram apresentadas algumas abordagens de solução do problema de balanceamento e sequenciamento. Na sétima subseção foi realizada uma revisão do conceito de produtividade e alguns índices utilizados na indústria automobilística, os quais quantificam o objetivo principal do trabalho e servem para explicar o ganho obtido a *posteriori,* no capítulo 6 sobre as conclusões. Finalmente, o oitavo e último item descreve a síntese de fechamento do capítulo 2.

2.1 HISTÓRICO DA LINHA DE MONTAGEM

Em 1901, Ransom Olds desenvolveu a primeira linha de montagem para a *Olds Motor Vehicle Plant* em Detroit, Michigan. Este método permitiu aumentar a taxa de produção anual do *Oldsmobile Curved Dash* de 425 veículos/ano em 1901 para 2500 veículos/ano em 1902. Segundo Thomopoulos (2014), com esse processo de montagem chamado de montagem progressiva, as operações eram repetitivas, os postos de trabalhos eram fixos e os veículos eram movimentados de uma operação a outra através de uma base com rodízios para melhorar o deslocamento da peça a montar e permitir a velocidade de produção.

Em 1909, *Ford* iniciou o processo de aplicação dos métodos de montagem, onde aos poucos as melhorias foram sendo implementadas. A linha de montagem como novo processo de manufatura, utilizando um sistema de esteira para produção em massa foi aplicada em 1913 na planta da *Ford* de Michigan descrita por Ford (1922). Segundo o próprio *Ford*, a ideia surgiu do sistema por correntes aéreas que era utilizado para o transporte, o corte e o empacotamento de carne bovina de Chicago. Nesse processo, a carcaça de um boi inteiro era transportada pelo sistema de ganchos em

forma de uma linha suspensa onde os operadores dos cortes ficavam em postos estacionários realizando os cortes específicos das partes do boi.

A primeira experiência foi um teste realizado na planta da *Ford Motor Company* conduzido na linha de alternadores. Os alternadores eram montados pelo método usual, com um homem realizando o trabalho completo, o qual conseguia realizar trinta e cinco a quarenta peças em nove horas de trabalho, ou em torno de vinte minutos para uma montagem completa de um conjunto. O que o operador fazia sozinho foi, então, dividido em vinte e nove operações, o que diminuiu o tempo de montagem de vinte minutos para treze minutos e dez segundos. Uma nova alteração da linha foi feita em relação à altura de trabalho, que permitiu melhorar a posição para realizar a tarefa e reduzir ainda mais o tempo para sete minutos. Outras modificações foram ainda realizadas até chegar a cinco minutos. A partir dessa experiência, conforme ilustrado na Figura 4, foram conduzidos outros estudos para ampliar o método para todas a demais áreas de montagem do veículo na planta de *Highland Park*.

Figura 4 – Montagem de rodas magneto na fábrica da *Ford Motor* (FORD, 1922)

Outra experiência bem-sucedida foi na montagem do chassi. Inicialmente, no processo estacionário de montagem do chassi, levava-se, em média, doze horas e vinte e oito minutos por chassi. O processo foi, então, arranjado num formato de linha reta num comprimento de aproximadamente setenta e seis metros com pilhas das peças ao longo da linha, onde os operadores pegavam as peças para montar. Esse experimento permitiu reduzir o tempo para cinco horas e cinquenta minutos por chassi. Na sequência foram aplicadas melhorias em relação à altura da linha, arranjo das peças e estudos de decomposição das operações, o que permitiu melhorar ainda mais o tempo. Com a política de homem em posição em pé e com altura da linha ajustada, conforme a melhor

posição no sentido de diminuir movimentos desnecessários, o tempo de trabalho reduziu para uma hora e trinta e três minutos por chassi. Essa transição de processo, além de aumentar a capacidade de produção, permitiu grandes ganhos de produtividade. Cabe ressaltar que esses ganhos de produtividade foram obtidos durante a transição do sistema de produção artesanal, que segundo *Ford* era similar à forma de produzir uma casa (sistema posicional onde os operários se movem e a peça de trabalho fica parada), para o sistema de linha de montagem (*flow shop*, onde o operário fica restrito a um posto e a peça a ser trabalhada é movimentada por um sistema de esteira).

Entre os vários exemplos descritos sobre os ganhos obtidos pelo novo processo, o estudo feito pelo encarregado da operação de montagem do conjunto motor foi outra modificação importante na planta da Ford da época, que comprovou a vantagem do sistema. O encarregado da planta observou que das nove horas do tempo de montagem do motor, quatro horas o operador estava desperdiçando apenas andando, ou seja, 44% de perda de produtividade. Após uma análise detalhada da operação, algumas mudanças foram realizadas na organização do posto, de forma que o operador não precisasse mais mover seu pé de lugar, permitindo que todo o seu tempo de trabalho estivesse efetivamente sendo aplicado na montagem do motor.

De acordo com *Ford* (1922), havia dois princípios gerais para a operação e três princípios para a montagem. Os dois princípios gerais em todas as operações foram: i) um operador não deveria dar mais que um passo, se possível evitado, ii) nenhum operador deveria ficar inoperante. Com esses princípios gerais, estava se eliminando, ou reduzindo ao mínimo, as operações que não agregavam valor (andar) e eliminando a inatividade (operador ficar parado). Os princípios de montagem, eram: i) dispor as ferramentas e o operador em uma sequência de operação que cada componente pudesse estar o mais próximo possível no momento da montagem; ii) utilizar sistemas de escorregamento ou algum tipo de carregamento que permita o operador descarregar o conjunto montado para a próxima operação, se possível utilizando um sistema de transporte por gravidade; iii) utilizar linhas de montagem deslizantes no qual o componente a ser montado fosse entregue a uma distância adequada.

Desde os experimentos e as aplicações empíricas de *Ford* em 1913 na planta de *Highland Park*, várias foram as contribuições teóricas para o desenvolvimento do processo de produção em massa como método de manufatura até os dias atuais, entre vários trabalhos, um resumo de algumas referências históricas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo de algumas contribuições do estudo sobre linhas de montagem (RAO, 1971)

Ano	Autor	Contribuição
1913	Ford	Primeiras informações sobre os experimentos de arranjo da linha de montagem e a produtividade obtida.
1935	Held *et al*.	Formulação geral em programação dinâmica do problema de ALB (*Assembly Line Balancing Problem*) com objetivo de minimizar a quantidade de postos para um determinado tempo de ciclo.
1954	Bryton	Em seu mestrado apresentou o problema de balanceamento de forma analítica.
1955	Salveson	Primeira publicação com definição analítica do problema de balanceamento de linha com modelo de Programação Linear (PL) para minimizar tempo de inatividade
1956	Jackson	Algoritmo baseado na técnica de programação dinâmica que obteve uma solução ótima para o problema em análise.
1957	Bellman	Método de programação dinâmica aplicado a balanceamento de linhas.
1960	Bowman	Primeiras duas formulações em LP desenvolvidas para o problema de ALB.
1961	White	Adaptação da primeira formulação de Bowman.
1962	Killbrige e Wester	Revisão de literatura dos problemas de ALB.
1962	Grant	Apresentou a primeira solução computadorizada para o problema de balanceamento de linhas mistas.
1963	Klein	Proposição de um método de balanceamento por sequência linear factível.
1963	Held et al.	Solução matemática para o ALB baseada na programação dinâmica de Bellman.
1963	Little et al.	Desenvolvimento de algoritmo pelo método *Branch and Bound* (BB)
1964	Gutjahr and Nemhauser	Tratado o ALB como uma rede finita e direcionada com uma fonte e um sumidouro para encontrar a rota mais curta entre os nós.
1964	Wester e Kilbridge	Propuseram que a solução ótima de um modelo de balanceamento de linhas deve ter duas soluções separadas, mas relacionadas em: divisão do trabalho entre os operadores e a sequência otimizada dos modelos na linha.
1965	Moodie e Young	Definição do índice de suavidade de uma linha de montagem através da raiz quadrada dos desvios de tempo ao quadrado.
1966	Thomopoulos	Apresentou os conceitos fundamentais relativos aos problemas de ineficiências das linhas de montagem como inatividade, saturação, desabastecimento e eficiência na base de um turno de produção.
1967	Cnossen	Usando lista de tarefas, foram desenvolvidas heurísticas para minimizar a perturbação conhecida como TJLB e utilizado pela empresa *Ford Motor Company*.
1967	Thomopoulos	Considerou o problema da linha de modelo misto assumindo os tempos do processo de montagem como determinísticos.
1967	Freeman and Jucker	Revisaram as formulações sobre minimizar apenas o tempo de ciclo ou número de postos e propuseram um novo modelo para minimizar o custo total de produção por unidade produzida de acordo com as situações encontradas no mundo real.
1968	Cauley	Revisão dos algoritmos para ALB.
1969	Okamura e Yamashima	Desenvolveram o primeiro algoritmo para identificar todas as sequências factíveis e encontrar uma sequência otimizada, através do algoritmo de BB de Little *et al*. (1963).
1970	Sahgal	Indicou que apesar do mérito da linha de montagem mista, não é incomum encontrar linhas de produção mista onde a produtividade é de apenas 70% da capacidade.
1970	Roberts e Villa	Desenvolveram dois métodos para otimização, um em modelo PI e outro em Caminho Mínimo.
1971	Rao	Proposição do método BALB (*Back Tracking Method*) desenvolvido em Fortran-IV para balancear ambas as linhas simples ou de modelo misto considerando os tempos das operações como determinísticos e normalmente distribuídos.

2.2 FUNDAMENTOS DA LINHA DE MONTAGEM

Num sistema de linha de produção, o produto é montado em uma sequência de postos de trabalho, na maioria das vezes arranjados em formato de linha. Ou seja, é um arranjo orientado ao produto. Geralmente utiliza-se um sistema de transporte do produto a ser montado seguindo uma sequência imposta pela estrutura do produto, podendo ser do tipo contínuo (síncrono) ou intermitente (assíncrono). Alguns princípios foram fundamentais para tornar a linha de montagem possível: o princípio da intercambiabilidade, o princípio da divisão de trabalho, o princípio do tempo de atravessamento da produção e o princípio da conservação de material descrito em Askin e Standrige (1993). Nas seções a seguir, apresenta-se um resumo dos principais fundamentos que permitem o bom funcionamento da linha de montagem.

2.2.1 PRINCÍPIOS DA LINHA DE MONTAGEM

O princípio da intercambiabilidade prevê que, num contexto de linha de montagem, uma peça qualquer, proveniente de estoque ou que se encontra na "borda da linha", pode ser montada em um produto qualquer que passa pela linha e, no final, obtém-se um produto operacional.

Já o princípio da divisão do trabalho considera os princípios de simplificação do trabalho, padronização e especialização. De acordo com esses princípios atividades complexas podem ser subdividias em tarefas elementares.

O princípio do tempo de atravessamento da produção[2], é provavelmente o princípio do sistema de manufatura mais amplamente reconhecido. O WIP (*Work In Process*) é diretamente proporcional ao tempo de produção. A proporcionalidade é constante, definindo a taxa de produção (no estado estacionário, a taxa de produção é também a taxa de produtos que entra no sistema de produção). Considere o sistema como um simples processo. Considere uma taxa de produção "X" num estado estacionário. Há "N" operações no sistema. Considere o sistema formado por "N" espaços, cada espaço ocupado por uma atividade. Cada "$1 \ / \ X$" intervalo de tempo uma nova tarefa chega no sistema e cada operação no sistema avança uma posição. Quanto tempo esta atividade vai demorar para atravessar o sistema? Levando "$1 \ / \ X$" unidades de tempo a cada "N" pontos, o tempo no sistema será "$T = N * (1 \ / \ X)$" ou o equivalente, "$N = X * T$", de acordo com a lei de Little. A lei aplica-se em todos os níveis: equipamento de uma peça individual, centro de trabalho, setor e sistema. Apenas assume-se que o sistema está em estado estacionário.

[2] citada como "Lei de Little" em (ASKIN e STANDRIDGE, 1993) e (CURRY e FELDMAN , 2011).

De acordo com Askin e Standridge (1993), a lei de Little tem uma consequência muito importante. Aumentando o nível de WIP por envio de mais material para o fluxo do processo, irá aumentar ambas: a taxa de produção e o tempo de produção. À medida que a taxa de produção se aproxima da capacidade (quando uma máquina é totalmente utilizada ou um operador é totalmente engajado), os aumentos da taxa de produção não são mais possíveis e forma-se o gargalo do processo, que é a restrição de capacidade.

Finalmente, o princípio de conservação de material prevê que os sistemas de manufatura existem para processar materiais ou realizar montagem de subcomponentes. As operações em linhas de montagem são de, basicamente, acoplar subcomponentes ou peças no conjunto principal. Os produtos acabados são movidos para a próxima operação. O modelo deve satisfazer o balanço de equação indicando a diferença de material entrando e saindo da estação de trabalho igual ao inventário. A grosso modo, um sistema estacionário não pode ter nenhum sistema de acumulação de inventário. A entrada deve ser igual à saída. Este princípio serve não só para a estação de trabalho, mas também para toda a planta.

2.2.2 TERMOS BÁSICOS DA LINHA DE MONTAGEM

Scholl (1999) descreveu alguns dos termos básicos da linha de montagem, como operação, tempo da tarefa, estação de trabalho, tempo de inatividade, atraso de balanceamento, entre outros. Segundo o autor, a operação de montagem é o processo de pega e encaixe de várias peças para criar um produto acabado. A operação (tarefa) é definida como uma porção do trabalho total contido no processo de montagem. O tempo da operação como o tempo necessário para realizar a tarefa, no limite de ser considerado indivisível. Estação de trabalho é uma parte da linha onde certa quantidade de trabalho é realizado. É caracterizada por suas dimensões, e ou tipo de equipamento, ou tipo de trabalho alocado. Tempo de ciclo é definido como a quantidade máxima de tempo que uma peça a ser trabalhada ou processada no posto, para um caso de linha sincronizada contínua (esteira). Relacionado ao tempo de ciclo, está a taxa de produção no fim da linha que é igual ao inverso do tempo de ciclo. A diferença de tempo positiva entre o tempo de ciclo e o tempo do posto é chamada de tempo de inatividade, pois o operador está aguardando para realizar a próxima operação (inativo) durante esse período de tempo. A soma de todos os tempos de inatividade da linha é chamada de tempo de atraso de balanceamento.

O gráfico de precedência está relacionado às restrições tecnológicas e ao ordenamento no qual as operações que precisam ser executadas devem estar pré-especificadas. Essa operação de ordenação das tarefas é conhecida na literatura como diagrama de precedência. Geralmente os

diagramas ou gráficos de precedência são constituídos de um nó, representando as operações e arcos (*i*, *j*) se uma operação *i* deve preceder uma operação *j*. Os nós, na maioria dos gráficos, são representados por um círculo com a sequência da tarefa e o tempo da operação. Os arcos com seta, indicam a sequência que a montagem deve respeitar (restrições de sequência de tarefa). No exemplo da Figura 5, os tempos de operação estão indicados pelos números fora e logo acima dos nós representados pelos círculos. Nesse exemplo, a tarefa um, a qual possui duração de seis unidades de tempo, deve ser executada antes da tarefa dois e cinco. A tarefa três vem antes da tarefa 4, e assim por diante.

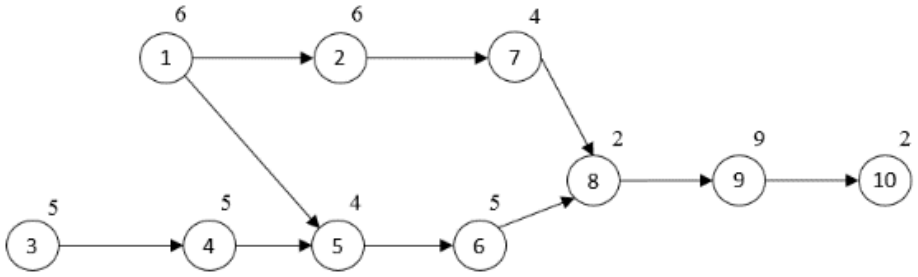


Figura 5 – Gráfico de precedência (SCHOLL, 1999)

No balanceamento dessas operações do exemplo, considerando que as atribuições de tarefas sejam factíveis, considera-se que cada tarefa é atribuída para um único posto, respeitando as restrições de precedência e o tempo no posto, não ultrapassando o tempo de ciclo da linha. Para o exemplo da Figura 5, tem-se como parâmetro que o tempo de ciclo é de 11 unidades de tempo, considerando que o tempo dos postos (ou a média dos tempos) não exceda o tempo de ciclo. Assim, uma possível alocação de atividades para a composição dos postos seria {1,3}, {2,4}, {5,6}, {7,8}, {9,10}, para os postos de um a cinco. Ou seja, as tarefas um e três seriam realizadas no posto um, as tarefas dois e quatro no posto dois, etc. Nos postos três e quatro ocorre tempo de inatividade de dois e cinco, respectivamente. O atraso de balanceamento é de sete unidades de tempo (u.t.), conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo do exemplo da Figura 5

tempo de ciclo	11	11	11	11	11
um possível agrupamento	{1,3}	{2,4}	{5,6}	{7,8}	{9,10}
somatória dos tempos no posto	11	11	9	6	11
tempo inatividade	0	0	2	5	0
tempo de atraso de balanceamento	7				

Na descrição realizada por Thomopoulos (2014) o processo de balanceamento é considerado como a atribuição do elemento de trabalho, e, para n operadores na linha, de forma a espalhar o mais uniformemente possível o tempo de trabalho entre os operadores, de uma forma que não viole as restrições de precedência. O tempo ciclo, c, é considerado como sendo a medida do tempo entre duas unidades de produtos acabado saindo no final da linha. O tempo de ciclo c pode ser calculado como como $c = \frac{T}{N}$, onde T seria o tempo de trabalho do turno e N como o número de peças programadas para realizar. Ainda, de acordo o autor, as informações chave necessárias para controle da linha de montagem são as tarefas elementares, os tempos padrões para realização das tarefas, a relação de precedência, o tempo da produção por unidade, o tempo do período de produção, e a quantidade planejada para o período de produção. Através desses dados é obtido o número de operadores necessários na linha de montagem, o tempo de ciclo, o tempo médio por operador, o atraso de balanceamento, e a taxa de eficiência.

A tarefa, ou elemento de trabalho é definido como $e = 1$ a Ne. Cada elemento identifica a tarefa a ser realizada e o tempo padrão da tarefa t_e . O tempo por unidade é a soma total do tempo para completar a produção de uma unidade e é designada por $\sum t_e$. O tempo do período de produção, T, representa o tempo total disponível para produção. Numa situação do período de trabalho onde o turno de produção começa às 8h00 e termina às 16h30, com um período de 30 minutos de intervalo para o almoço e mais dois intervalos de 15 min pela manhã e à tarde, o período de produção seria $T = 450$ min. Considere-se um exemplo de uma linha de montagem que precisa produzir um produto qualquer com uma quantidade de 45 por dia. O responsável pelo planejamento identificou que o produto possui $Ne = 30$ elementos e possui o tempo padrão de cada tarefa t_e. Assumindo que para o exemplo em questão $\sum t_e$ = 38,2 min. O número de operadores n' necessário para a linha é calculado como: $n' = N * \sum {t_e}/{T}$ = 45 ∗ 38,2/450=3,82. Como o número de operadores deve ser um número inteiro, ($n = \lceil n' \rceil$), n' é arredondado para cima, nesse caso, $n = 4$. Com o número de operadores definido é possível medir o tempo médio por operador, $\bar{c}$. Para o exemplo, tem-se: $\bar{c} = \sum {t_e}/{n}$= $\frac{38,2}{4} = 9{,}55\ min$. Como $c = \frac{T}{N}$, tem-se $c = \frac{450}{45} = 10\ min$. Com isso, é possível calcular alguns indicadores da eficiência potencial da linha através do atraso de balanceamento e da razão de eficiência. O atraso de balanceamento (d) mede a porção de tempo ocioso na linha e é definido por $d = \frac{(c-\bar{c})}{c}$. Como exemplo, tem-se: $d = \frac{(c-\bar{c})}{c} = \frac{(10{,}00-9{,}55)}{10{,}00} = 0{,}045\ ou\ 4{,}5\%$. Portanto, para o exemplo, a linha apresenta 4,5% de ociosidade.

Outra forma de medir desempenho da linha é a razão da eficiência (E), que indica o quanto a linha é produtiva. A razão de eficiência é definida como $E = \bar{c}/c$, conforme exemplo: $E =$

$\frac{\bar{C}}{c} = \frac{(9{,}55)}{10{,}00} = 0{,}955 \ ou \ 95{,}5\%$. Também em Scholl (1999) é definido o índice de suavidade, que indica a igualdade de distribuição das tarefas entre as estações de trabalho. Algumas fórmulas de cálculos dos principais índices são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais definições utilizadas no balanceamento de linha de produção

Definição	(RAO, 1971)	(ASKIN e STANDRIDGE,1993)	(SCHOLL, 1999)	(THOMOPOULOS,2014)
Elementos de trabalho ou tarefa	$\boldsymbol{I}$	$\boldsymbol{i}$	$\boldsymbol{n}$	$\boldsymbol{e}$
Tempo elementar de trabalho	$\boldsymbol{t_i}$	$\boldsymbol{t_i}$	$\boldsymbol{t_j}$	$\boldsymbol{t_e}$
Tempo de ciclo	$\boldsymbol{c = \frac{T}{Q}}$	$\boldsymbol{C = \frac{M}{p}}$	$\boldsymbol{c \geq t_{max}}$	$\boldsymbol{c = \frac{T}{N}}$,
Tempo médio por operador	$\boldsymbol{T_k}$, $\boldsymbol{t_i \leq T_k \leq c}$			$\boldsymbol{\bar{c} = \sum t_e / n}$
Tempo de trabalho do turno	$\boldsymbol{T}$			$\boldsymbol{T}$
Tempo padrão	$\boldsymbol{t_i}$		$\boldsymbol{t_j}$	$\boldsymbol{t_e}$
Número de operadores ou postos	$\boldsymbol{m}$		$\boldsymbol{m}$	$\boldsymbol{n' = N \sum t_e / T.}$
Atraso de balanceamento	$\boldsymbol{d = \frac{(c-\bar{c})}{c}}$**x100**	$\boldsymbol{D = \frac{K.C - \sum_{i=1}^{N} t_i}{K.C}}$	$\boldsymbol{BD = \sum_{k=1}^{m} I_k}$	$\boldsymbol{d = \frac{(c-\bar{c})}{c}}$
Taxa de eficiência da linha			$\boldsymbol{E = t_{sum}/T}$	$\boldsymbol{E = \frac{\bar{c}}{c'}}$
Índice de suavidade	$\sqrt{\sum_{k=1}^{m} (d_k)^2}$		$\sqrt{\sum_{k=1}^{m} (c_r - t(S_k))^2}$	
Tempo total para montagem	$\boldsymbol{T}$	$\boldsymbol{T = N * (1/X)}$	$\boldsymbol{T = m.c}$	
Taxa de produção	$\boldsymbol{Q = \frac{T}{c}}$		$\boldsymbol{p = \frac{1}{c}}$	
Tempo de Inatividade	$\boldsymbol{D = \sum_{k=1}^{m} (c - T_k)}$		$\boldsymbol{I_k = c - t(S_k)}$	

2.2.3 CLASSIFICAÇÃO DA LINHA DE MONTAGEM

Considerando os estudos proposto por Boysen *et al*. (2008) a linha de montagem pode ser classificada nas seguintes características principais: em relação ao número de modelos, forma de controle da linha, frequência de alteração, nível de automação e atividade do negócio. Em relação a número de modelos, a linha pode ter a característica de produzir um único modelo de forma contínua em grande quantidade (linha de modelo simples). Geralmente para esse caso o sistema de esteira com passo fixo é o mais indicado, pois o fluxo é constante, as variações do tempo de produção estão relacionadas apenas com o comportamento estocástico da operação e o desbalanceamento é mínimo por repetir as mesmas tarefas num produto sem diversidades. A margem de manobra é o limite do percurso fixo do posto (perímetro do posto) podendo, ainda, ser do tipo fechado ou aberto (ultrapassar ou não o limite físico do espaço).

De acordo com Scholl (1999), numa linha do tipo contínua com passo sincronizado (*paced lines*) um sistema mecânico de movimentação como uma esteira percorre o posto de uma maneira contínua. Cada peça a ser montada é movida de forma progressiva de um posto para outro numa velocidade constante. Todos os postos são separados por distâncias iguais, definido como passo da linha l, e têm a mesma quantidade de tempo (tempo de ciclo) disponível para atribuição de tarefas. A velocidade da esteira v é definida como o espaço percorrido no passo da linha l sobre o tempo de ciclo c , conforme ilustrado na Figura 6.

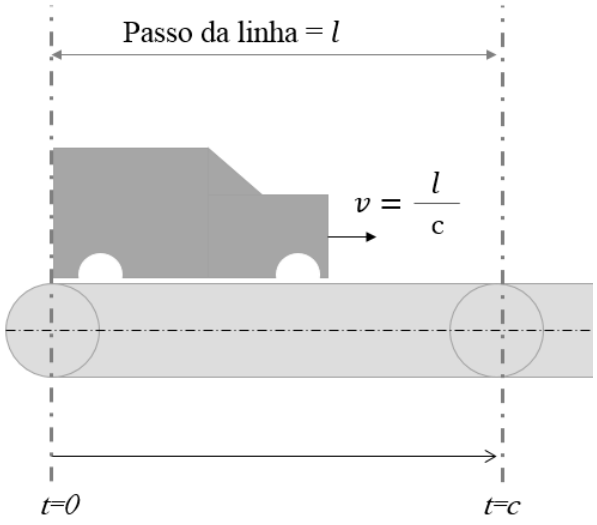


Figura 6 – Esquema da esteira de passo sincronizado (RAO, 1971).

Enquanto a peça a ser montada se desloca para a direita, na Figura 7 o operador acompanha a peça principal realizando a operação de montagem das peças e se deslocando em direção a peças que serão montadas e voltando para a peça principal. Na última peça a montar, o operador retorna ao ponto inicial da primeira peça a montar fechando o ciclo do posto. Este arranjo das peças a montar na borda da linha é o tipo comum de *layout.*

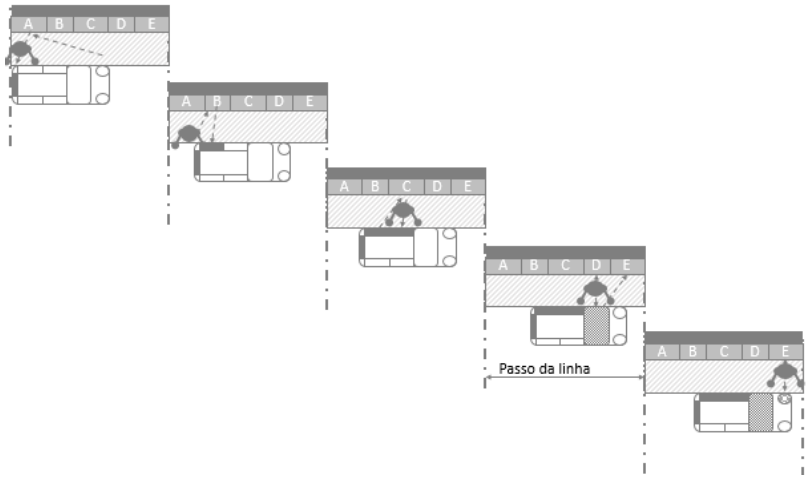


Figura 7 – Linha passo contínuo com borda de linha clássica

Já para as linhas que possuem um sistema de passo não sincronizado, a linha fica parada enquanto o operador realiza o trabalho, conforme indicado na Figura 8. O deslocamento da peça principal ocorre somente no final do trabalho. Nesse caso, o sistema de passo ainda difere em duas situações. Na primeira situação a peça é liberada para seguir ao posto da frente, desde que o posto da frente esteja vazio. Por isso, é recomendado a alocação de *buffers* entre cada posto nesse tipo de linha. Quando não existe a alocação correta de postos pulmões (*buffers*), duas novas ineficiências podem ocorrer. A perda número um seria pelo bloqueio da peça por impossibilidade de avançar para o próximo posto, impedindo dar continuidade ao trabalho. A perda dois seria o desabastecimento do posto que ocorre quando o posto pulmão permanecer vazio além do tempo previsto.

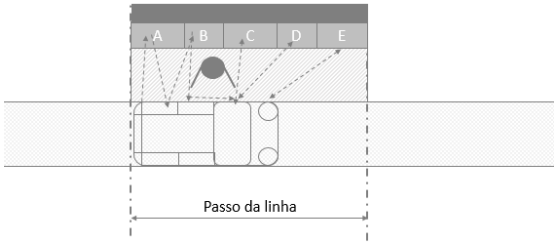


Figura 8 - Borda de linha passo não sincronizado e não contínua (*stop-and-go*)

Scholl (1999) faz referência ao uso de *buffer* para linha de montagem em série do tipo passo não sincronizado. O autor conclui que a existência de *buffers* entre os postos da linha tem uma influência direta com a taxa de produção da linha. Em linhas de montagem do tipo de passo não sincronizado é recomendado que os postos sejam intercalados com *buffer* que permita a alocação de estoque. O autor argumenta que quando as peças estiverem saindo dos postos e ainda estiver sendo executada uma tarefa no posto subsequente, o posto pulmão recebe a peça e a armazena para espera antes de seguir para o posto posterior, sem bloquear o posto anterior. Contudo a capacidade do *buffer* é normalmente restrita, e o posto estará bloqueado quando o *buffer* estiver cheio.

Askin e Standridge (1993) reforçam que a vantagem da linha de passo não sincronizado é maximizada quando as estações mais carregadas (com tempo maior), são alocadas nos primeiros postos. Também se alerta para a dificuldade de medir a performance geral da linha dada aos desbalanceamentos devido às variações dos tempos de processamentos dos postos terem um comportamento randômico. Nesse caso um *buffer* entre os postos é recomendado pois desempenha uma função de absorver a variabilidade dos tempos de processamento. Para o caso em estudo pelos autores são considerados postos de trabalho idênticos, tempos de processo randômicos, sem *buffer* e sem falhas de manutenção. Assim, o sistema passa a ser considerado como um sistema de *M* estágios idênticos em série.

Ainda de acordo com Askin e Standridge (1993), um fator importante para determinar a taxa de produção é o coeficiente de variação do tempo de processamento dado por $CV = \sigma/\mu$, onde CV indica coeficiente de variabilidade dos tempos de produção; a dispersão dos tempos é representada por σ; já a média dos tempos das tarefas é representada por μ. De acordo com esse coeficiente de variação, a taxa de produção diminui com o aumento de estágios em série (ou postos de produção), até estabilizar a perda (em torno do oitavo ou nono estágio). Por outro lado, numa situação de postos idênticos, operações randômicas, *buffers* alocados entre pares sucessivos de postos, conforme Figura 9 e Figura 10, e sem considerar quebras por manutenção, a situação é outra. A taxa de produção não diminui necessariamente com o aumento de estágios, pois há diversos outros fatores interagindo no processo.

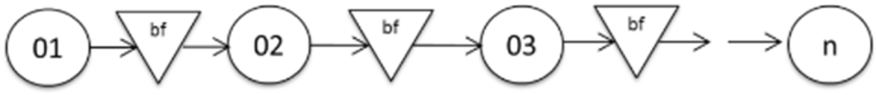


Figura 9 – *Layout* típico recomendado para linha de passo não sincronizado (SCHOLL, 1999).

Para essa nova situação, a produção vai depender da taxa da capacidade do *buffer* (*Z* para cada *buffer*) para um coeficiente de variação do tempo de processo CV. O percentual de capacidade perdido na linha sem *buffer*, que é recuperada pela adição de *buffer* possui uma relação direta com o comprimento da linha. Para cada relação de Z/CV haverá uma recuperação percentual da perda da taxa de produção por causa da variabilidade dos tempos das operações.

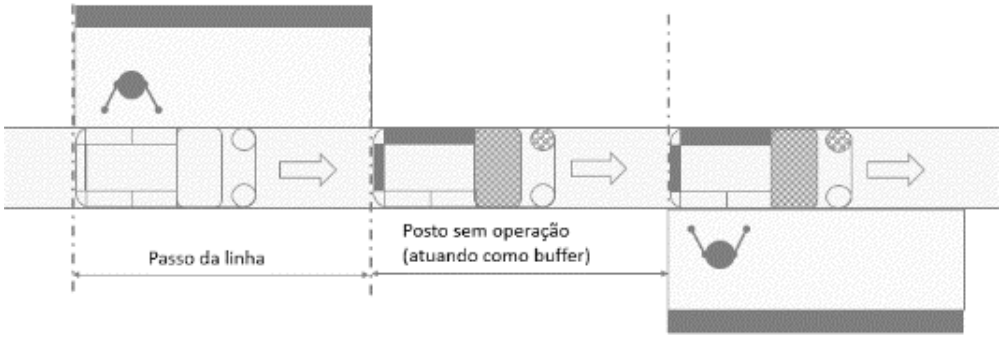


Figura 10 – Configuração para linha de passo não sincronizado com *buffer* entre postos

A título de exemplo, considere-se um caso de linha de montagem com "n" postos idênticos, tendo a mesma distribuição de tempos de operação, sem *buffers* e sem perdas por panes, e tempos de operação randômicos, com um $CV = 0{,}3$. Neste caso, uma linha de dois estágios poderia atingir apenas 85% da taxa de produção de uma linha de um único estágio. Contudo, para oito ou mais estágios, a perda da taxa de produção é estabilizada a 75% de uma linha de um único estágio.

Em uma outra possibilidade de configuração, a linha de passo funciona com um avanço sincronizado, ou seja, somente após todos os postos terminarem suas operações o sistema de transporte é liberado para movimentar a peça a trabalhar, simultaneamente. Os tempos de realização das tarefas podem assumir um comportamento determinístico ou estocástico. De acordo com Scholl (1999) o tempo de operação pode variar mais ou menos em relação a variabilidade dos tempos das operações, dependendo da natureza das tarefas e operadores. É de se esperar que a variação dos tempos seja bem pequena para tarefas simples ao passo que para operações complexas, tenham um comportamento instável, sejam suscetíveis a falhas e tendam a sofrer uma variação considerável. Principalmente no caso de operações realizadas pelo trabalho humano, onde os tempos de operações estão sujeitos às influências de fatores psicológicos, físicos e sociais, os tempos das tarefas são influenciados pela habilidade e motivação do operador, por sua taxa atual de trabalho, entre outros fatores. Tempos excessivos de tarefas alocados erroneamente resultam em ineficiências como inatividades ou paradas totais da linha.

Os balanceamentos de linha são normalmente baseados num tempo de operação fixo e determinístico. A adoção dessa simplificação é justificada quando a variabilidade dos tempos é suficiente pequena. Para que se possa considerar os tempos de tarefas quase estacionários, ou tempos-padrão, em uma linha de montagem sendo operada por trabalho humano, o método de produção deve ser robusto o suficiente para garantir que os operadores executem a sequência padrão das operações com um alto nível de qualificação e motivação. Já para um caso de uma linha com operações automatizadas, ou operada por robôs, característica de, por exemplo, linhas *transfer*, as tarefas tendem a ser realizadas a uma velocidade constante (dependendo apenas da disponibilidade do equipamento). Já em relação a operações com tempo que assume um comportamento estocástico, normalmente característico de trabalho humano com treinamento deficitário, a significativa variação dos tempos das tarefas tende a influenciar a performance do sistema como um todo.

Para o caso de linha contínua (*paced lines*) o trabalho alocado do posto não deve ultrapassar o tempo de ciclo da linha. Caso ocorra, a consequência é de parada total da linha, até que as operações sejam concluídas para prosseguir com as operações seguintes. Eventualmente, nesse caso, são utilizados os recursos de chamada ao posto, onde um operador líder ou auxiliar é alocado para completar o trabalho, ou o produto é desviado para um posto de retrabalho no final da linha. Mesmo nos casos de tempos de tarefas quase constantes em sistemas de produção com fluxo automatizado, pode ocorrer variação das taxas de produção em relação às quebras de máquinas, que também podem causar a parada completa da linha. Estas quebras influenciam a disponibilidade, gerando um fator estocástico, o qual representa a probabilidade de quebra de equipamento. Em muitas aplicações reais as variações dos tempos da linha de montagem podem assumir uma distribuição normal ou exponencial.

No caso de uma linha com passo não sincronizado e com tempos com uma distribuição exponencial, pode ocorrer o comportamento conhecido como "*bowl-phenomenow*". Estudos empíricos de Scholl (1999) indicam que a taxa de produção pode aumentar introduzindo algum desbalanceamento (em termos de média de tempos dos postos) no sistema. Ou seja, na prática é permitido que se aloque os postos do início e do fim com uma quantidade de tempo maior e que se deixe os do meio ligeiramente menos carregados. Essa consideração também é verdadeira para posicionamento de postos pulmões, onde o tamanho desses postos no centro é ligeiramente maior que os postos de início e fim da linha.

Outra questão a ser elencada é a possibilidade de comportamento dinâmico da variação dos tempos das tarefas. Existe uma redução sistemática possível devido aos fatores de aprendizagem ou de sucessivas melhorias no processo. As formulações das curvas de aprendizagem tiveram como base a função descrita por Thomopoulos (2014), onde a teoria prevê que o tempo de montagem por

unidade diminui a uma percentagem constante a cada vez que o número de unidades é duplicado. Matematicamente tem-se: r o número de rth repetição e $t\ (r)$ o tempo requerido para montar a rth unidade, então $t\ (r) = \ ar^b\ r = 1, 2, \ldots$ onde a é o tempo para montagem da primeira unidade, b é uma constante negativa e r^b é a porção de a (tempo na primeira unidade) para a rth repetição. Onde, $\frac{t(2r)}{t(r)} = R;\ \ r = 1, 2, \ldots$ Para $0{,}5 < R < 1$, R é definido como taxa de aprendizagem. Ainda, conforme indicado por Thomopoulos (2014), a relação entre R e b é definida como $R = \frac{a(2r)^b}{ar^b} = \ 2^b$. A relação seguinte mostra como obter o valor de b, que corresponde ao valor $R : b = \ln R \,/\, \ln 2$.

Bukchin (1998) descreve em seu estudo sobre medições de desempenho de uma linha mista de produção em um ambiente de produção puxada – JIT (*Just In Time)* – a questão da "variabilidade de modelo" e a "variabilidade de posto". A variabilidade do modelo resulta da dificuldade de obter um perfeito balanceamento de cada modelo de produto de forma separada, devido às restrições tecnológicas e de precedência. A variabilidade de posto está associada aos tempos de montagem totais não serem idênticos para cada modelo. A variabilidade de posto ainda existe, mesmo quando um perfeito balanceamento para cada modelo é atingido. Esses dois tipos de variabilidade causam, hora bloqueio, hora inatividade dentro dos postos resultando numa baixa taxa de produção. Fremerey (1991), *Apud* Bukchin (1998) introduziu um modelo matemático para balanceamento da linha que enfatizava a necessidade de diminuir a variação de tempo dentro do posto (entre diferentes modelos de produtos), enquanto aumenta a taxa de produção.

Nesse sentido, foi definido o Coeficiente de Variação de um posto como: $CV_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{I}\left[\propto_j p_{ij} - p_i\right]^2}{J}}}{p_i},\ \ \forall i = 1,2, \ldots I$. Onde: $\propto_j$ representa a proporção da demanda para o modelo j, p_{ij} representa o tempo de montagem alocado para um único modelo j no posto i, p_i representa o tempo médio ponderado do modelo do produto no posto i.

Já para a medição da variabilidade do modelo do produto, Bukchin (1998) *apud* Bukchin (1995), demonstrou que uma solução ótima, em relação à variabilidade de modelo, pode ser obtida balanceando perfeitamente cada modelo em separado. A medição da variabilidade do modelo é a soma ponderada da variabilidade de cada modelo. O fator de ponderação é a proporção de demanda $\propto_j$. A função objetivo fica como $Min\ \sum_{j=1}^{J} \propto_j\ \sum_{i=1}^{I}\left(P_{ij} - \ p_j\right)^2$.

Na Tabela 4, foi realizado um resumo das principais características das linhas de montagem com base na classificação proposta por Boysen *et al.*, (2008). Sendo [a,e,i,o,u] produtos diferentes; [´,~,^, ",] variantes de um mesmo produto; [–] tempo de inatividade; e, [_] tempo de *setup*.

Tabela 4 – Classificação de linha de montagem (BOYSEN *et al*. 2008).

Sequência dos modelos	á'aaâ"aâ"aaã"aaaaâ"aã"aaaaaa	-aa-eee-aa-bb-cccc-aa-â"ù"ú"-u-	_aaâ"aaã"a __bbbbb __ccccc_
Nº de modelos	Modelo simples	Modelo misto	Multimodelos
Controle da linha	Paced / defile – linha de passo contínuo V=l/t	Unpaced asynchronous – linha de passo não sincronizado (stop-go / pas-a-pas)	Unpaced synchronous - passo sincronizado (march a avalant)
Exemplo	Ex. linha final de montagem sobre esteira contínua	Linhas com grande diversidade de produtos	Ex. Linha de robôs.
Nível de automação	Manual / Automatizada	Manual / Automatizada	Automatizada
Linha de Negócio	Produção automobilística com poucas variações de modelos, Linha branca, etc.	Automobilística com grande variação de modelos, linha de caminhões, etc.	Outros exemplos
Variação do tempo operação	Estocástica / Determinística	Estocástica / Determinística	Determinística
Implantação da linha	Linha Reta; em formato "U"	Linha Reta; em formato "U"	Linha Reta
Implantação da borda da linha	Posição fixa; sistema sequenciado	Posição fixa; sistema sequenciado	Sistema sequenciado
Existência de *Buffer*	Melhorar a confiabilidade da instalação	Melhorar o balanceamento e confiabilidade da instalação	Melhorar a confiabilidade da instalação

Na primeira linha da tabela, estão a representação através de letras indicando os produtos a montar. Por exemplo, para a linha de modelo simples, tem-se apenas a letra "a", sendo apenas um produto, com poucos acessórios ou sem nenhuma diversidade de acessórios (representado pelos sinais de "acentos"). Para a segunda coluna, temos além das letras diferentes que indicam a existência de produtos diferentes na mesma linha e também com e sem acessórios (acentos), caracterizando o caso de uma linha do tipo modelo misto. Aqui fazemos uma adaptação na proposta original de Boysen *et al.* (2008), pois na sua hipótese inicial é considerado diversidade de modelos de um mesmo produto. Na consideração desse trabalho, estamos supondo não somente a diversidade como modelo de um único produto, mas também produtos diferentes utilizando a mesma linha (existência de consoantes e vogais juntas). Para a última coluna, temos o caso denominada multimodelo, onde se observa que se prepara a linha para produzir um produto/modelo e segue-se com um novo ajuste da linha para seguir com outro modelo/produto e assim por diante. As demais informações classificadas na Tabela 4, servem apenas como referencial, pois variações desse tipo de arranjo pode acontecer na prática, dependendo da solução/aplicação.

2.2.4 IMPLANTAÇÃO DA BORDA DE LINHA

A linha de montagem hoje pode ter diversas possibilidades e formas de configurações de implantação. O *layout* irá afetar diretamente sua performance em termos de fluxo de material e a interação dos operadores nos postos. As principais atividades que não agregam valor, como deslocamentos e movimentos inúteis, entre outras perdas de produtividade, são resultado do tipo da implantação e solução de abastecimento. Em geral a linha de montagem típica possui três zonas principais distintas, conforme ilustra a Figura 11: (i) zona de estoque de peças a montar; (ii) zona de trabalho estacionário, onde o operador se movimenta entre a peça de trabalho e a peça a montar; e, (iii) zona de trabalho em movimento da esteira, onde o operador está estacionário em relação à peça de trabalho, mas está em movimento em relação à peça a montar.

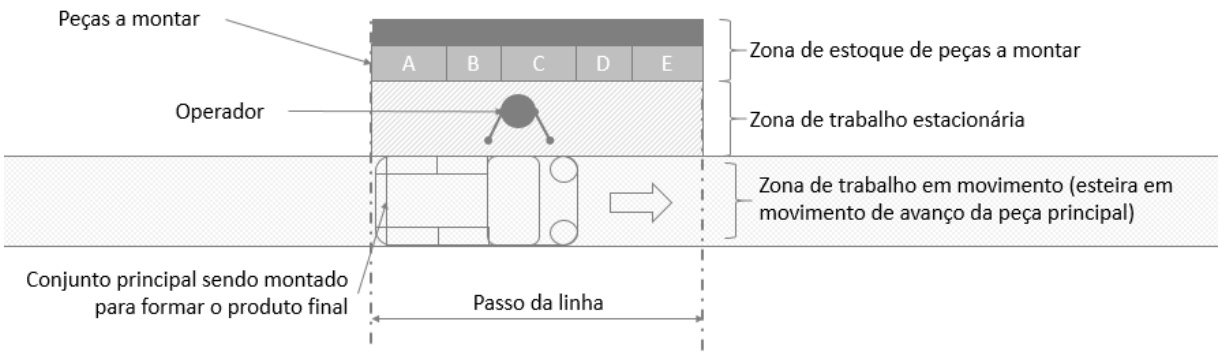


Figura 11 - Implantação da linha de montagem clássica com peças na borda da linha

Iniciando pela implantação típica de uma linha de montagem modelo simples, a borda de linha clássica dispõe de um *layout* das peças a montar em uma posição fixa representada na Figura 11. Essa posição requer uma sequência com um melhor arranjo das peças a montar que permita o operador buscar a peça conforme o avanço do produto a montar no menor percurso. O operador se desloca constantemente da peça sendo montada para a peça a montar durante todo o intervalo do passo da linha. Para algumas etapas do processo, como linha final da montagem das partes móveis da carroceria, ou a montagem de fechamento (*dress up*) de motores, algumas iniciativas têm sido testadas e que levam em conta o conceito de RMS (*Reconfigurable Manufacturing Systems*). A ideia é de que a peça principal vai ao encontro da peça a montar, ao invés das peças a montar irem ao encontro da peça principal. A principal vantagem nesse caso seria em relação ao fluxo de peças ser menor pelo item principal se deslocar no sentido de ir ao encontro das peças a montar. Por outro lado, a peça principal possui maiores dimensões para o deslocamento e tem limitações do tempo tecnológico para realizar as operações.

Uma alternativa entre essas duas soluções é a adoção das técnicas de produção enxuta do JIT (*Just In Time*), conhecidas como “carrinhos *kitting*”. Esses carrinhos são preparados com o conjunto de peças a montar alocados para um determinado posto específico ou para uma sequência de postos. Nessa solução, a borda de linha fica limpa, sem estoque de peças nas prateleiras com apenas os carrinhos entregando de forma sincronizada a quantidade exata das peças a montar para um determinado modelo de veículo a ser montado. Na Figura 12 é ilustrado como os “carrinhos *kitting*” são alimentados em uma “zona de *picking*” para serem transportados para a borda da linha. As peças a montar são dispostas nesse “carrinho *kitting*” numa sequência adequada que permita ao operador na borda da linha simplesmente pegar a peça sem nem mesmo olhar para ela. É possível customizar mecanismos nos carrinhos em conjunto com as diversas interações com os diversos sistemas de transporte automatizados como, por exemplo, os AGV´s. (*Automated Guided Vehicle*). A adoção do sistema *kitting*, além de melhorar a produtividade por redução de NVA (Não Valor Agregado) por deslocamentos para pega de peças, também simplifica as considerações de modelagem matemática do problema por reduzir/eliminar a necessidade de incluir restrições de zoneamento para as posições das embalagens na borda da linha.

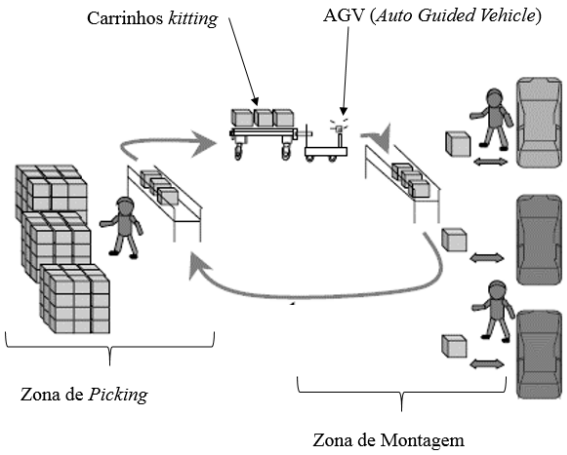


Figura 12 - Sistema de abastecimento por *kitting*

2.2.5 PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA FORMULAÇÃO DO MODELO

A proposta de uma representação do processo de concepção e síntese do modelo da linha de montagem através de um diagrama de causa e efeito foi proposta em Rao (1971). A Figura 13 ilustra as causas prováveis a serem consideradas na correta definição das características práticas da linha a serem abordadas na formulação do problema ALB (*Assembly Line Balance*). Esta é uma

representação básica e de referência do processo no qual precede a concepção e a síntese de um modelo. A visualização ajuda a compreender as técnicas da Pesquisa Operacional (PO), dos sistemas de engenharia e inferências estatísticas que precisam ser visualizadas para ajudar a definir o problema e desenvolver um método prático de solução com a devida aderência ao processo real auxiliando a organizar o raciocínio a ser empregado.

Alguns procedimentos de soluções exatas foram descritos por Scholl (1999) tanto para SALBP-1, SALBP-2 e SALBP-E. Para SALBP-1, os métodos de programação dinâmica e *branch and bound* são analisados. O autor focou no método *branch and bound* por ser relativamente superior à programação dinâmica em relação a tempo computacional e a requisitos de espaço de armazenamento. Conforme descrito anteriormente, o termo SALBP, em inglês definido como *Simple Assembly Line Balancing Problem*, representa uma linha de montagem que possui como características principais: produção em massa de um produto homogêneo, realizando n operações de um processo de produção. A linha é cadenciada com um tempo de ciclo fixo, os tempos de operação são considerados determinísticos e integrais; não há restrições operacionais além das restrições de precedência.

A implantação do sistema produtivo é no formato de linha reta com um lado com operações. Todas as estações de trabalho são igualmente equipadas com máquinas e operadores, é realizada uma taxa fixa de lançamento de produto na esteira com intervalo de lançamento igual ao tempo ciclo, para o caso de linha com passo sincronizado, típica das linhas finais de montagem. Em resumo, todas as estações de trabalho repetem as mesmas tarefas em peças idênticas e a quantidade da carga de trabalho permanece constante ao longo do tempo. A característica principal da linha de montagem é a produção de alto volume de um item unitário ou de itens similares de uma família de itens. O sistema de linha de montagem não requer grandes filas de produto em fluxo e inventários. Consequentemente, requer menos espaço com menor inventário com menor custo e com um tempo de atravessamento menor. Apesar da linha ser tradicionalmente linear, onde uma esteira transporta a peça a ser montada de um ponto para o outro, linhas em formato “U”, ou linhas paralelas, também são usadas, com ou sem pulmões intermediários (*buffers*).

Simaria (2001) descreve a linha de montagem como um conjunto de postos de trabalho dispostos sequencialmente e interligados por um sistema de transporte de materiais. Também classifica a linha de montagem como sistema de produção discreta em forma de organização de produto, diferenciando linha de produção e linha de montagem. Na linha de produção geralmente há o uso de equipamentos especializados e o custo de investimento é alto com pouca utilização de mão de obra. Já na linha de montagem as tarefas são realizadas basicamente de forma manual, com investimento em capital relativamente reduzido.

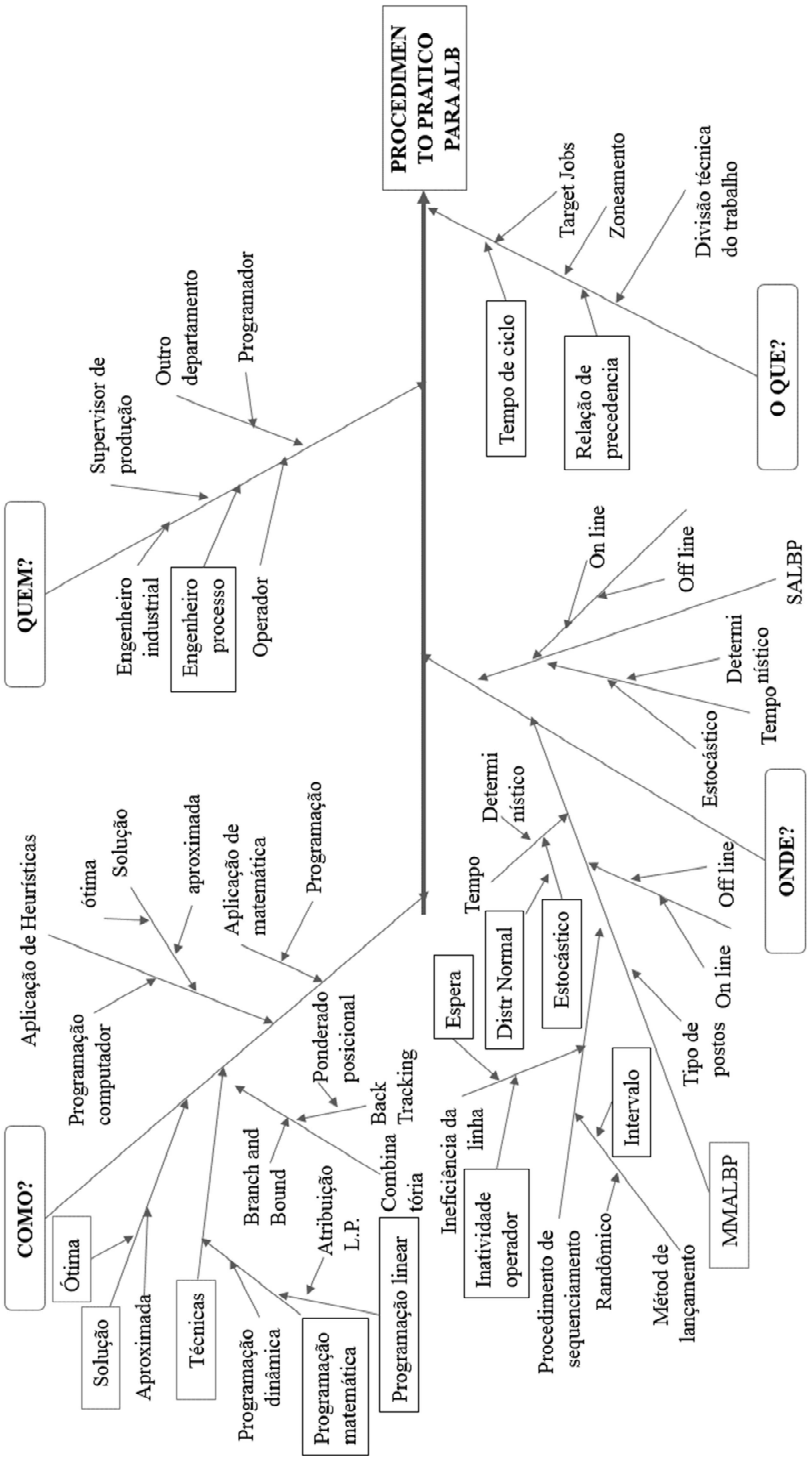


Figura 13 - Diagrama de Causa do procedimento prático de balanceamento (RAO, 1971)

2.3 INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Pesquisa Operacional (PO) é uma abordagem científica para auxiliar no processo de tomada de decisões. A PO procura determinar como melhor projetar, planejar e operar sistemas, usualmente sob condições que requerem alocações eficientes de ciência da gestão ou administração, ou ciência da decisão, ou da metodologia operacional descrita em MIGUEL *et al*. (2012). A Pesquisa Operacional é geralmente aplicada quando são estudados modelos mais próximos aos processos operacionais reais, que possam ser validados e cujos resultados sejam testados na prática. Dessa forma, são obtidas informações da qualidade do modelo utilizado e das soluções obtidas nas análises. Dentro da Pesquisa Operacional, os modelos de Programação Matemática podem ser entendidos como um conjunto de equações, inequações e dependências lógicas que correspondem a estruturas reais.

De acordo com Miguel *et al*. (2012), a utilização de modelos permite compreender melhor o ambiente estudado para auxiliar na tomada de decisão. Um modelo pode ser definido como uma representação de uma situação ou realidade, construída de forma a auxiliar o tratamento da situação de uma maneira sistemática. Um modelo deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais e representar o sistema real. Mas também deve ser simplificado para ser tratável por métodos de análise e resolução disponíveis. Em particular, modelos quantitativos são modelos abstratos descritos em linguagem matemática e computacional, que utilizam técnicas analíticas (matemáticas, estatísticas) e experimentais (simulação) para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão, podendo ser usados para analisar resultados de diferentes ações possíveis no sistema. Os modelos são construídos para vários propósitos. Os principais usos incluem: otimização – encontrar os melhores valores para as variáveis de decisão; previsão de desempenho – verificar os planos potenciais e sensibilidade; controle – auxiliar a seleção de regras de controle desejadas; *insight* – proporcionar uma melhor compreensão dos sistemas; e, justificação – auxiliar na venda de decisões e apoio aos pontos de vista.

Segundo Williams (2013), a característica essencial de um modelo matemático na Pesquisa Operacional é que envolve um conjunto de relações matemáticas (como equações, inequações e dependências lógicas) que representam as relações com as situações práticas do mundo real, como relações tecnológicas, leis físicas e restrições. Pode haver vários motivos para construir um modelo, entre eles o próprio exercício de construir um modelo pode revelar relações que não são evidentes, num primeiro momento, no sistema real. Isso pode permitir um melhor entendimento do objeto sendo modelado. No processo de construção do modelo, durante a análise da parte matemática,

é possível encontrar sugestivas correções de curso que de outra forma não seriam percebidas. Através do modelo é possível realizar experimentações, fato nem sempre possível com o objeto modelado.

Em um modelo de Programação Matemática, são encontrados três elementos principais: variáveis de decisão/parâmetros, restrições e função objetivo. A modelagem de problemas de Programação Linear pode ser descrita por meio de uma função objetivo e de um conjunto de restrições, todas lineares, conforme a seguir ilustrado:

$$\{Max, Min\}\, Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \cdots + c_n x_n$$

Sujeito a:

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \cdots + a_{1n} x_n \{=, \leq, \geq\}\, b1$$
$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \cdots + a_{2n} x_n \{=, \leq, \geq\}\, b2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \cdots + a_{mn} x_n \{=, \leq, \geq\}\, bm$$
$$x_1, x_2, \ldots, x_n \geq 0$$

onde, $x_1, x_2, \ldots, x_n$ = conjunto de variáveis reais não-negativas estruturais do modelo;

$c_1, c_2, \ldots, c_n$ = coeficientes de ponderações da função objetivo (pesos);

$a_{ij}\ e\ b_j$ = coeficientes das variáveis e restrições.

A representação $\{Max, Min\}\, Z$ indica que a função objetivo será de maximização ou minimização, de acordo com a meta que se deseja atender. Adicionalmente, a representação $\{=, \leq, \geq\}$ significa a presença de somente uma dessas três relações em cada restrição.

De acordo com as características da aplicação a ser abordada, uma vertente difundida da Programação Matemática é a Programação Linear Inteira Mista (MILP ou MILP – *Mixed Integer Linear Programming*), que considera que certas variáveis devam assumir valores inteiros e outros contínuos. As variáveis que somente assumem valores inteiros são empregadas para representar condições de indivisibilidade. Por exemplo, o número de veículos montados em um período de produção. Ou seja, o resultado esperado é um número inteiro.

De acordo com Magatão (2005), os problemas de otimização combinatória (COP – *Combinatorial Optimization Problems*) estão presentes em situações quotidianas e são resolvidos pela escolha otimizada de uma solução num conjunto muito extenso de alternativas. A formulação de COPs através da Programação Linear Inteira Mista é obtida através de especificações algébricas de um conjunto de alternativas viáveis, bem como os critérios dos objetivos de comparação das alternativas.

Os passos para obter essa formulação são: i) introduzir variáveis de decisão, normalmente binárias $(0-1)$, para representar as alternativas do modelo; ii) expressar o critério de avaliação como uma função linear das variáveis criadas; e, iii) representar o conjunto de alternativas factíveis como a solução da conjunção de equações lineares e das desigualdades das variáveis. MILP possibilita uma estrutura geral para modelagem de uma grande variedade de problemas como planejamento, alocação de tarefas, armazenamento, projetos de redes, gerenciamento de cadeias de suprimentos, etc.. No entanto, a resolução de modelos MILP ainda é um desafio do ponto de vista computacional.

Em geral uma formulação MILP é composta conforme a expressão (1) e (2). Na expressão (1), os $c_j's$ e os $c_i's$ são referenciados como coeficientes de custos (caso de minimização). Já na restrição (2) os $a_{kj}'s$ são referenciados como coeficientes de restrições de variáveis contínuas $x_j's$ e os $a_{ki}'s$ são referenciados como coeficientes de restrições de variáveis inteiras $y_i's$. Os $b_k's$ são os requisitos da restrição, J é o conjunto de variáveis contínuas e I o conjunto de variáveis inteiras. K é o conjunto de restrições. O símbolo ρ representa a relação matemática de $\leq$, $\geq$ e $=$.

$$min\ z = \sum_{j \in J} c_j\, x_j + \sum_{i \in I} c_i\, y_i \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\begin{gathered} \textstyle\sum_{j \in J} a_{kj}\, x_j + \sum_{i \in I} a_{ki}\, y_i \ \ \{\rho\}\ b_k \quad \forall k \in K \\ x_j \geq 0 \quad \forall j \in J \\ y_i \ \in Z_+ \quad \forall i \in I \end{gathered} \tag{2}$$

Uma explicação detalhada sobre formulação e resolução de modelos MILP pode ser encontrada em Guéret *et al*. (2000), Magatão (2005) e Williams (2013). Os autores indicam recomendações sobre técnicas de modelagem em relação à formulação MILP, como uso das variáveis binárias, número de restrições, formulação *Big-M*, condições lógicas e demais funcionalidades e potencialidades dessa técnica de solução.

Também as técnicas de modelagem MILP permitem expressar algumas condições lógicas entre as variáveis 0-1 (*e.g.*, ou, e, não, ou exclusivo) por meio de restrições lineares. No entanto, a falta de construções de modelagem de alto nível para disjunções e restrições combinatórias torna o processo de modelagem ainda difícil e propenso a erros, Magatão (2005).

Os modelos MILP são elaborados, via de regra, dentro de linguagens de modelagem declarativas, como AMPL, GAMS, LINGO, XPRESS-MP e OPL Studio. O modelador pode construir o modelo sem descrever o procedimento de solução e o modelo pode ser passado para outro *solver* diferente por meio de formatos padrão. O crescente uso de MILP tem contribuído para difundir o uso dessa técnica da Pesquisa Operacional em diversas aplicações do mundo real, com resultados satisfatórios.

2.4 INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO

A característica da Simulação é a de imitar ou simular as operações de vários tipos de instalações ou processos do mundo real de forma manual ou em um computador descritas em Law e Kelton (1991) e Banks *et al*. (1996). O comportamento do sistema através do tempo é estudado para desenvolver o modelo de simulação. As instalações ou processos de interesse são definidos como o sistema a ser simulado. Com o objetivo de estudar o processo de interesse, são assumidas algumas hipóteses de como o sistema funciona. Essas hipóteses são representadas por relações matemáticas e lógicas, as quais fundamentam o modelo desenvolvido. O modelo é usado para conseguir compreender o comportamento do sistema em estudo. No caso das relações que compõem o modelo serem simples o suficiente, pode ser possível utilizar métodos matemáticos como a álgebra, cálculos, ou teoria da probabilidade para obter uma resposta exata para a questão proposta. Esta abordagem é chamada de solução analítica e pode ser explorada em detalhes em Curry e Feldman (2011). Contudo, muitos sistemas do mundo real são complexos o suficiente para que modelos realísticos não possam ser avaliados de forma analítica. Nesses casos a simulação pode ser um instrumento alternativo para avaliar os modelos numericamente por meio de um computador, onde os dados são reunidos de forma a estimar a característica esperada do modelo.

De acordo com Banks *et al*. (1996) os modelos de simulação podem ser classificados como sendo estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos e discretos ou contínuos. Um exemplo de simulação estática é a conhecida Simulação de Monte Carlo, a qual representa um sistema num ponto particular no tempo. Modelos de simulação dinâmica representam um sistema que muda ao longo do tempo, por exemplo, a simulação do funcionamento de um banco no período das 9h00 às 16h00. Modelos de simulação que não contém variáveis randômicas são classificados como determinísticos. Modelos determinísticos tem um tempo pré-definido tanto de entrada quanto de saída. Já a simulação estocástica tem ao menos uma ou mais variáveis randômicas na entrada. As variáveis randômicas na entrada irão influenciar variáveis de saída também de forma randômica. A Simulação de Eventos Discretos é relacionada à modelagem de um sistema que envolve um evento

no tempo, que é representado pelo estado das variáveis. Este estado das variáveis muda instantaneamente entre dois pontos separados no tempo. Esses pontos no tempo são aqueles nos quais o evento ocorre e muda o estado do sistema (LAW e KELTON, 1991).

O princípio da simulação de eventos discretos é descrito por Tamani (2008) como representar a evolução de um sistema no decorrer do tempo através das variáveis que mudam seu estado no instante de ocorrência dos eventos. A Figura 14 representa vários eventos ocorrendo ao longo do tempo, que interferem no estado do sistema. Um evento é definido como uma ocorrência instantânea que pode fazer mudar o estado do sistema.

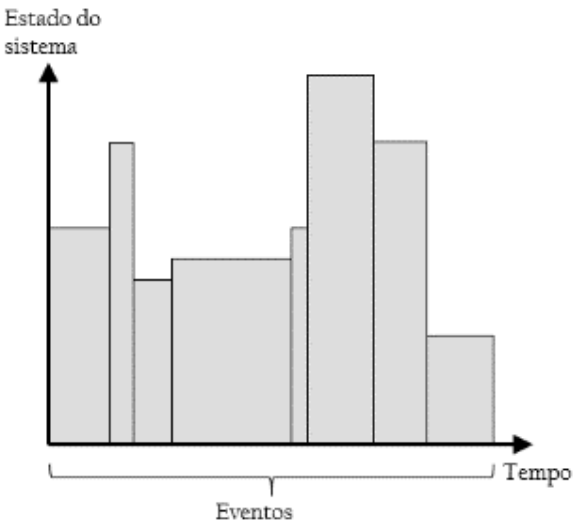


Figura 14 – Estados de sistema abordado por simulação de eventos discretos (TAMANI, 2008)

Esse princípio é simples, porém a quantidade dos dados a tratar e armazenar em função dos produtos é elevada. Fato que requer recursos importantes em termos de tempo de execução e espaço de memória computacional. A simulação de eventos discretos, implica mudanças de estados que ocorrem de maneira discreta ao longo do tempo. Nesse caso, o tempo progride em forma de saltos em função dos eventos a tratar.

A descrição do mecanismo de simulação de eventos discretos através da aproximação da modelização por componentes foi descrita em Tamani (2008). Esta ilustração foi baseada no conceito de Sistema de Tratamento do Produto (STP). No caso o STP é considerado como um processador (uma entidade), contendo todas as características de um recurso de produção. São realizadas, praticamente, três operações base: recepção, transformação e fornecimento. Cada uma dessas três operações traduzem uma parte do comportamento do recurso.

O comportamento do recurso é ilustrado na Figura 15 através da ideia do STP. Na operação de recepção é considerado que a peça a receber está disponível, que a capacidade do recurso não está impedida de seguir para a operação seguinte e que o recurso está pronto a recepcionar. A seguir, a operação de transformação consiste em manter a entidade durante um certo tempo *t* definido pela folha de produção (tempos operatórios). A retenção do recurso acima do tempo previsto, irá caracterizar um bloqueio do recurso. A duração de tempo *t* pode ser nula para certos recursos, como por exemplo no caso de um estoque. Finalizando com a operação fornecimento, onde ocorre a liberação do recurso transformado para a operação consecutiva, definido pela folha de operações. Nesse caso, a realização dessa operação supõe que o recurso seguinte esteja pronto para receber a peça a trabalhar.

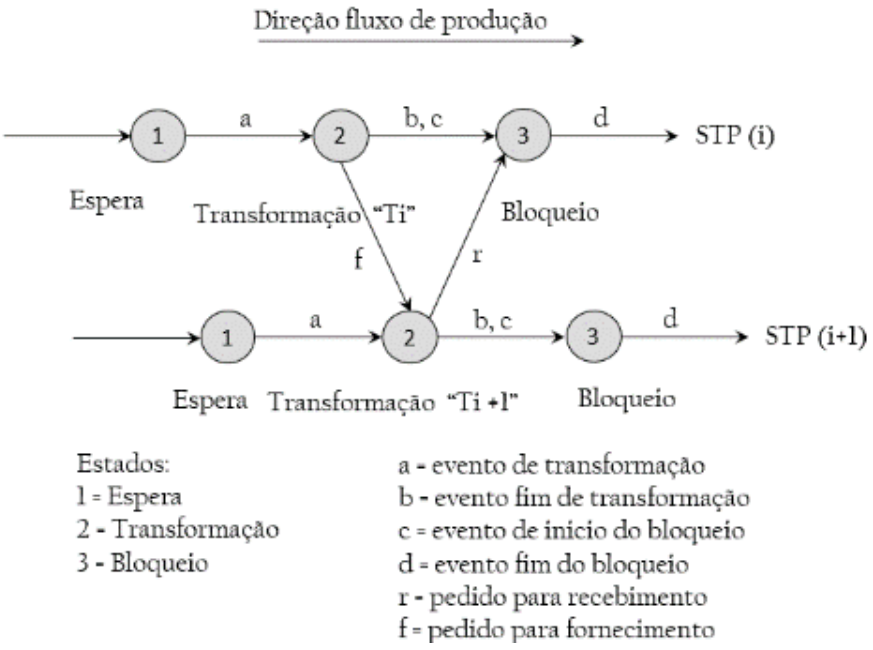


Figura 15 - Diagrama dos estados simplificados de um STP (TAMANI, 2008)

Adotando esse conceito, cada recurso do sistema de produção (máquina, estoque, etc.) pode ser modelado por um STP. Nesse caso, o modelo global pode ser visto como uma rede de vários STP em interconexão. A dinâmica do sistema é representada pelo fluxo físico que atravessa no sistema (o último conjunto de entidade que circula no sistema). Essa estrutura em forma de STP é fundamentada sobre uma simulação de eventos discretos ou a um ciclo interno executado por cada produto, conforme ilustra a Figura 14. Essa explicação é apenas para ilustrar alguns dos princípios básicos de simulação que estão por trás de alguns *software*. Para maiores detalhes de funcionamento, o *software* utilizado será descrito na seção a seguir.

2.4.1 O *SOFTWARE* DE SIMULAÇÃO *WITNESS*

Para o estudo de simulação discreta, além dos princípios básicos descritos, também serão mencionados os conceitos dos principais elementos do *software* de Simulação *WITNESS* que foi utilizado na Simulação. O *software* permite representar um processo do mundo real através de uma animação dinâmica do modelo no computador. O modelo de simulação permite incorporar características da situação real como variações de confiabilidade, tempos de processos, eficiência etc. Segundo descrito no manual do usuário em Lanner Group (2012), essa habilidade de incluir variabilidades do mundo real é uma vantagem chave sobre os modelos de planilhas eletrônicas. A versão do programa dedicada a manufatura é utilizada na empresa onde foi realizado o estudo de caso do presente trabalho. Também por esse motivo, foi utilizado esse *software* para verificar os resultados obtidos da otimização matemática antes da implementação no processo real.

O *WITNESS* usa a mesma combinação de peças, pessoas, máquinas e outros dispositivos de simulação, chamados elementos de modelagem através de blocos, para simular as operações que estão sendo estudadas. Os elementos discretos são mostrados como ícones dinâmicos e representam a situação da vida real sendo estudada. Entre esses elementos são descritas peças, *buffers*, máquinas, trabalho, esteiras, caminhos, trajetórias e veículos. A Figura 16 a seguir ilustra alguns dos elementos do ambiente de modelagem do *WITNESS*.

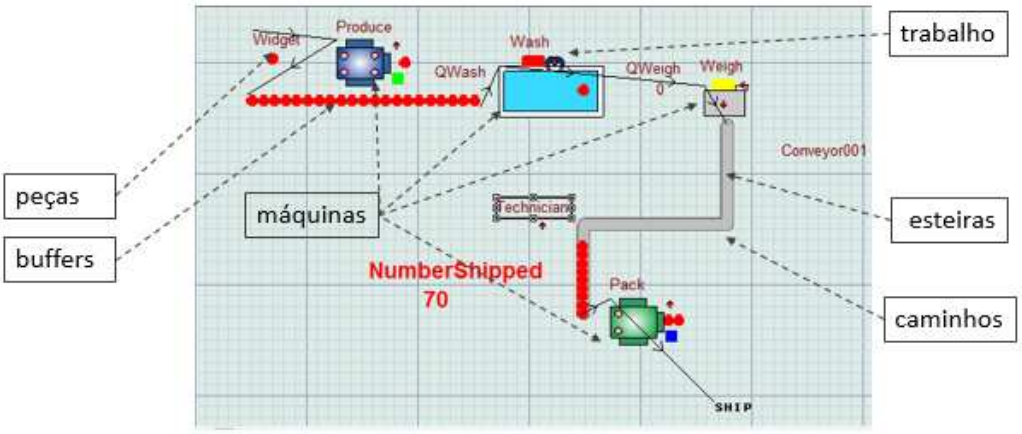


Figura 16 - Elementos do ambiente de Simulação WITNESS

No modelo da linha para o estudo do sequenciamento, construído no pacote de simulação, foram utilizados apenas alguns dos elementos disponíveis no *software*, conforme ilustrado na Figura 32 do capítulo 5. Em particular destaca-se o uso de: peças e atributos (modelo F, B, C, H e X),

máquina (como posto), variáveis “Tcy”, “Mov”, e expressões. A seguir explica-se brevemente os elementos utilizados.

No *WITNESS*, o elemento peça, flui através do modelo e pode representar produtos (carro, motor, eixo, etc.) ou lotes de produtos. A peça pode ser mostrada em diferentes formas, como um ícone ou uma descrição de texto. Ambos caracterizados por atributos como cor, comprimento, peso e também pode ser fixada para cada tipo similar.

O elemento máquina é o item mais versátil. Este elemento é usado para representar qualquer processo recebendo peças de algum lugar, processando e enviando para o próximo destino. Exemplos do elemento máquina podem ser uma máquina ferramenta, um torno, uma prensa ou uma oficina completa. Até mesmo uma planta inteira ou uma simples célula de trabalho individual. As máquinas podem assumir um em sete tipos diferentes de formas de manipulação. As máquinas têm os fatores de tempo no processo de produção de uma peça, o tempo entre panes, o tempo de *setup*, estações múltiplas, múltiplos ciclos, tempo de reparo de falhas e de ajuste de máquinas bem como os eventos da operação.

Os elementos lógicos e módulos são representações das informações através do modelo. Eles permitem manipular as informações facilmente, customizando relatórios e construindo lógicas cada vez mais complexas dentro do modelo *WITNESS*. Os principais elementos dessa categoria são os atributos, as variáveis, os arquivos de dados, distribuições, funções, arquivos de peças, turnos de trabalho e os módulos.

Os atributos possuem as características da peça ou a unidade de trabalho. Por exemplo o número de cilindros em um motor poderia ser um atributo, e poderia ser usado para determinar a quantidade de tempo para montagem e ajuste do motor. Cada atributo contém um número inteiro, real, uma cadeia de caracteres ou uma referência para outro elemento de modelagem.

Variáveis são valores que podem ser acessados por outras entidades do modelo. Por exemplo, uma variável para gravar o valor de itens num inventário. Além das variáveis a definir, o programa permite vários sistemas de variáveis (incluindo as do relógio da simulação, que relaciona o número de peças ou lote de produção). Uma variável pode conter um número inteiro ou real, um texto ou outras referências de modelagem. Também pode ser definida como uma expressão envolvendo atributos, para um valor constante, de uma amostra de uma distribuição para outra variável, além de mostrar o conteúdo de seu nome e valor na tela. Há, também, arquivos que permitem obter valores que são relevantes para a simulação e carregá-los dentro do modelo ou salvar do modelo para serem utilizados em outra aplicação.

O arquivo de peças contém uma lista com os atributos de cada peça como ícone, cor, peso e o tempo de chegada da peça no modelo. Este arquivo é utilizado na modelagem para programar os

problemas de produção. Outro recurso do arquivo de peças é que pode ser gerada informação a partir da execução do modelo de simulação para o arquivo de peças. Dessa forma é possível utilizar o arquivo de peças como uma saída do modelo para ser usada como entrada de outros modelos.

A manipulação dos elementos do programa, como regra, é realizada por expressões de ações. As regras das peças são transferidas entre os elementos de acordo com as regras de entrada e saída detalhadas nas caixas de diálogos de cada elemento. As regras podem permitir modelar uma decisão complexa sobre a transferência de peças a partir de critérios. Elas também podem ser inseridas de forma semiautomática usando a caixa de característica do simulador, que contém comentários sobre a lógica aplicada. A regra pode ser aplicada diretamente nas peças para uma variedade de locais para fora do modelo como, por exemplo, uma peça pode ser expedida ou sucateada. Uma regra também pode ser criada usando os botões padrões da barra de ferramentas.

Expressões são uma importante funcionalidade utilizada na geração dos valores utilizados na simulação. Uma das características do *WITNESS* é a flexibilidade com a qual são manipulados os valores das expressões. Onde quer que um valor seja necessário, pode-se especificar uma fórmula ou expressão. Dependendo do contexto, o simulador trabalha com um valor externo ou armazena a última expressão para uso futuro. Por exemplo, um tempo de ciclo de uma máquina pode ser especificada como uma expressão a qual é reavaliada a cada ciclo de tempo da máquina.

O *WITNESS* utiliza uma linguagem de programação baseada no conceito de “ações”. Estas ações tem uma similaridade com a linguagem de programação BASIC. Através das ações podem ser realizadas instruções específicas sobre a lógica do modelo, permitindo modelar os cálculos e fórmulas que sustentam as decisões na situação da vida real em estudo. Ações são usadas para introduzir uma interação entre modelo e o programador. Por exemplo, em uma caixa de diálogo podem ser especificadas instruções quando o modelo estiver executando para obter informações desejadas. Também pode ser utilizado como um estágio chave da operação de um elemento, por exemplo no final do ciclo de uma máquina quando a peça é liberada do modelo e pode ser plotada uma curva no tempo.

2.5 BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Uma linha de montagem consiste em estações de trabalho, geralmente dispostas ao longo de uma correia transportadora ou um equipamento de manuseio mecânico semelhante a um manipulador. As peças (tarefas) são consecutivamente lançadas na linha e são movidas de estação para estação. Em cada estação, certas operações são realizadas sobre o tempo de ciclo (tempo máximo ou média disponível para cada ciclo de trabalho).

A fabricação de um produto em uma linha de montagem requer a decomposição da quantidade total de trabalho em um conjunto V = {1, ..., n} de operações elementares chamadas tarefas. A execução de uma tarefa *j* tem um tempo *tj* e exige certos equipamentos ou máquinas e/ou habilidades dos trabalhadores. A carga total de trabalho necessário para a montagem de uma peça é medida pela soma dos tempos das tarefas. Devido às condições tecnológicas e organizacionais, restrições de precedência entre as tarefas devem ser observadas.

O problema de balanceamento de linha busca atingir o melhor compromisso entre realização de tarefas, uso de equipamentos e recursos operacionais necessários para atender a certa demanda de produção. Vários autores descrevem diferentes métodos para encontrar uma solução. Geralmente a formulação envolve um conjunto de tarefas com seus respectivos tempos de montagem, gráfico de precedência, restrições de zoneamento, etc.

Busca-se com esse processo obter o número de postos de trabalho (número inteiro) que atenda a uma determinada cadência de produção. Em linhas do tipo não contínuas (assíncronas) a taxa de produção não é dada por um tempo de ciclo fixo, mas é bastante dependente dos tempos de tarefas realizadas. Estes tempos podem ser estimados, desde que as funções de distribuição sejam conhecidas. No entanto, a ocupação dos recursos é consideravelmente influenciada pela atribuição de postos pulmão (*buffers*), o que também influencia o tempo de ciclo da linha.

Os três principais problemas de otimização relacionados ao balanceamento são classificados por School (1999) em SALBP-1, SALBP-2 e SALBP-E. O termo SALBP representa o caso do problema de balanceamento da linha de montagem simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem*), ou seja, de um único produto padronizado, sem ou com poucas variantes, ou que os tempos das diferenças de produtos possam ser desprezíveis. Em SALBP-1 busca-se minimizar o número m, de estações para um dado tempo de ciclo c . Já em SALBP-2, para um certo número de postos, busca-se minimizar o tempo de ciclo c. Finalmente em SALBP-E, o objetivo é maximizar a eficiência da linha com a equivalência de minimizar os dois fatores m e c.

Para exemplificar uma correspondência mais direta de SALBP com outros problemas clássicos de otimização combinatória, haveria necessidade de se simplificar o respeito às relações de precedência. Nesse caso o SALBP-1 reduziria ao caso clássico de problema de empacotamento, no qual o objetivo é empacotar uma quantidade de itens num número mínimo e de tamanho igual de pacotes. Já o SALBP-2, seria relacionado ao problema de programação de m máquinas paralelas idênticas, com o objetivo de diminuir o tempo de produção.

2.5.1 PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA MISTA (MALBP)

O uso de linhas de produção com modelo misto tem sido uma tendência na indústria automobilística, acompanhando as evoluções de diversidade de produtos, conforme ilustrado na Figura 2. Outra vantagem da linha mista, ou monofluxo, é a flexibilidade que o sistema permite absorver às variações de demandas. Também os lançamentos de novos produtos coexistindo com os produtos em produção, conforme ilustrado na Figura 17.

Em um modelo misto de produção, não há o inconveniente do tempo de *setup*, e várias sequências de modelos podem ser montadas sobre a mesma linha. Também há a grande vantagem de o inventário ser menor. Por outro lado, suavizar a dispersão de tempos das operações dos diversos modelos, na prática, não é uma tarefa fácil. Como consequência, numa linha típica de montagem é assumido que os modelos são variações do produto de mesma base e apenas diferem em atributos específicos de produtos personalizáveis, também referido como opcionais. A quantidade de engajamento, ou alocação de tarefas, por si só é uma medida da eficiência para que o equilíbrio da linha seja alcançado. É por isso que alguns estudos como o relatado em Ozturk *et al.* (2013) têm proposto a consideração simultânea dos problemas de balanceamento e sequenciamento. Contudo a carga computacional inerente à resolução simultânea do problema balanceamento-sequenciamento é uma barreira a ser superada.

Uma utilização eficiente da linha mista requer que se obtenha a solução dos dois problemas de forma separada, mas que sejam relacionadas entre: i) divisão do trabalho entre os postos e ii) sequência dos modelos/produtos sugerida em Rao (1971).

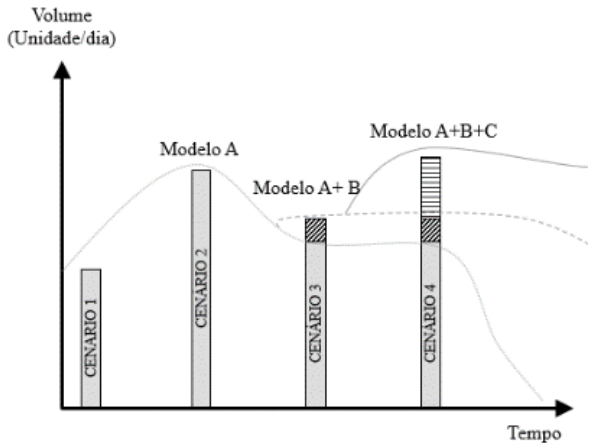


Figura 17 – Cenários de produção para três modelos diferentes de carrocerias de veículos (ELMARAGHY, 2008)

Linhas de modelo misto de montagem são amplamente utilizadas em uma gama de configurações de produção, como a montagem final das indústrias automotivas. Balanceamento da linha de montagem deve ser buscado para evitar as dificuldades inerentes do desbalanceamento e obter a suavização da carga de trabalho (balanceamento horizontal). A suavização da carga de trabalho é uma tarefa essencial em linhas de montagem de modelos mistos de acordo com Emde, Boysen e School (2010). Sempre que uma linha de montagem é instalada ou reconfigurada, o balanceamento de linha de montagem (ALB – *Assembly Line Balancing*) é um problema a ser resolvido, porque as partições do trabalho conjunto entre as estações, as restrições de precedência entre tarefas e o tempo de ciclo comum com relação a algum objetivo devem ser avaliados.

A abordagem do problema de balanceamento de linha simples (SALBP) é limitada para a montagem de um único produto, com seu gráfico de precedência. Para uma linha mista de produção, a técnica é unificar o gráfico de precedência de todos os modelos para obter um gráfico geral e os tempos das tarefas são calculados pela ponderação de pesos das probabilidades de ocorrência de cada modelo, estimadas do *mix* de modelos nos respectivos tempos de operação de cada tarefa. Assim, para lidar com múltiplos modelos de veículos a serem produzidos na linha, um gráfico de precedência conjunta, representando um “modelo com tempo médio” é introduzido, o qual serve como dado de entrada para um único modelo para o procedimento de montagem da ALB. Scholl (1999) comenta que em função das recentes tendências de um acréscimo cada vez maior de variações do *mix*, os prognósticos de um modelo misto confiáveis são cada vez mais complexos. Como sugere Boysen, Fliedner e Scholl (2009), as atividades passam a ser mapeadas ao invés dos modelos de produtos a produzir, então esta média de tempo de atividades pode ser calculada na base de uma expectativa de ocorrências.

Alguns autores discutem o uso de sistemas de montagem de modelo misto. Neste sistema vários tipos diferentes de produtos podem ser montados simultaneamente na mesma linha. Geralmente a sequência da ordem de entrada dos modelos é planejada e mantida numa proporção previamente definida. As linhas de modelo misto geralmente são do tipo não contínua (assíncrona) para permitir uma flexibilização do tempo de operação variável entre modelos conforme proposto em Askin e Standrige (1993) e Scholl (1999). Os três principais objetivos para o balanceamento de linha assumindo que a questão da factibilidade (MALBP-F) tenha sido resolvida, proposto por Scholl (1999) são:

> MALBP-1 – Para um dado tempo de ciclo *c*, minimizar o número de postos. Um modelo equivalente ao SALBP-1, para o caso da linha simples.

MALBP-2 – Para um dado número *k* de postos, o tempo de ciclo *c* é minimizado, ou seja, o volume de produção é maximizado. Também é obtido do modelo equivalente ao SALBP-2, apenas obtendo a proporção da média dos modelos.
MALBP-E – Tanto o tempo de ciclo *c* (taxa de produção) quanto o número de postos pode variar para maximizar a eficiência da linha. Ou minimizar *c* e *k*.

Nos problemas de modelo misto (MALBP – *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*) há necessidade de se encontrar uma sequência eficiente de produção dos diferentes modelos (versões) de produtos na linha, demandando-se um planejamento de curto prazo da sequência produtiva. Como descrito anteriormente, o objetivo do presente trabalho é otimizar um cenário que pode ser caracterizado como MALBP-2, ou seja, para um dado número de postos, deseja-se minimizar o tempo de ciclo.

2.6 ABORDAGENS DE SOLUÇÃO

Nessa seção é conduzida uma revisão das principais formas de solucionar o problema de perdas de produção por balanceamento e sequenciamento. Partindo desde as soluções práticas que não empregam nenhuma técnica formalmente elaborada, mas que simplesmente assumem uma perda de eficiência, até as soluções elaboradas com adoção de modelos de otimização por solução exata ou por solução aproximada, presentes na literatura.

2.6.1 SOLUÇÕES *AD HOC*

Nessa abordagem, pela prática do dia a dia da indústria, são admitidas perdas no processo que acabam sendo uma forma de simplificar as influências reais que ocorrem no sistema produtivo, facilitando o processo de solução do problema. A ocorrência de paradas por atraso na operação, ou inatividades, muitas vezes passam despercebidas em apenas um ciclo, mas quando o horizonte de análise passa para uma hora de produção, um turno ou para um dia inteiro, as perdas se tornam acumulativas e visíveis, e nem sempre explicáveis.

Em linhas com sistemas supervisionados que utilizam controladores lógicos programáveis (CLP) para monitorar o estado a cada unidade de tempo em diferentes postos de

trabalhos, é possível medir fatores que influenciam nas perdas. Assim, faz-se possível isolar somente a perda por inatividade, que é o objeto desse estudo. Não serão abordadas no presente trabalho outras perdas como quebra de máquinas, problemas de qualidade, fadiga dos operadores e taxa de absenteísmo.

Para assegurar o volume de produção na saída do processo, a fim de atender o tempo de ciclo programado, a perda de engajamento deve ser levada em conta para não comprometer o volume produtivo. As demais perdas, na prática, são consideradas de 2 a 10% de perda de rendimento do processo, variando conforme o processo. Uma forma de atender esse requisito, é dimensionar a linha pelo pico do tempo de ciclo. No entanto, nessa opção haverá uma grande perda de produtividade com vários postos inativos. Essa alternativa tem a vantagem de o volume de produção ser assegurado com uma certa folga. Outra forma é fazer pelo tempo médio ponderado pelos volumes. Geralmente é o procedimento observado no dia a dia do chão de fábrica, que considera o problema de forma estática e as perdas não seriam tão expressivas. Contudo, o que ocorre realmente é uma variação randômica não planejada de sequências de produtos entrando na linha de montagem provocando perdas de produtividade e volume de produção. Algumas montadoras utilizam técnicas para prevenir essas perdas como adoção de postos tampões (*buffers*), aplicação de restrições de sequenciamento, existência de operadores multifuncionais, ou as técnicas de operações deslizantes, entre outras.

Todas as formas práticas elencadas para tentar flexibilizar a demanda e evitar perdas de produtividade, ou perdas de volume, são utilizadas de forma reativa, apenas.

2.6.2 SOLUÇÕES EXATAS PARA O BALANCEAMENTO

Simaria (2001) propõem uma formulação do modelo de programação matemática para balanceamento de linha de montagem de modelo simples do tipo um (SALBP-1) como uma programação binária, conforme expressões (3) a (7) a seguir apresentadas. Vale notar neste modelo que N é o número de tarefas, S o número máximo de estações de trabalho, C o tempo de ciclo, t_i o tempo de processamento da tarefa i e F_a o conjunto de tarefas que só podem ser executadas depois da tarefa a estar concluída. A variável binária x_{ik} assumirá valor um se a tarefa i é executada no posto k, zero ao contrário. Nesse modelo é previsto que as tarefas sejam numeradas da origem para o final do diagrama de precedência, respeitando a sequência.

A equação (3) representa a função objetivo que minimiza o índice do posto no qual é realizada a última tarefa do diagrama de precedências (a tarefa de índice *N*), o que corresponde a minimizar o número de postos. Ressalta-se que este objetivo é obtido devido ao fato da última tarefa só pode ser alocada após todas as demais precedentes. A formulação do modelo pressupõe que as tarefas são numeradas da origem para o final do diagrama de precedência e que nenhuma tarefa pode preceder outra cujo número de identificação é menor se ($b \in F_a$ então $a < b$). As restrições (4) garantem que cada tarefa seja atribuída a uma e somente uma estação de trabalho.

$$\{Min\}\, Z = \sum_{k=1}^{S} k.x_{Nk} \tag{3}$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^{S} x_{ik} = 1 \;\; \forall i = 1,2,\dots,N \tag{4}$$

As restrições (5) obrigam o respeito das relações de precedência entre as tarefas fazendo com que o índice do posto que está alocada determinada tarefa seja não necessariamente superior aos índices das tarefas que estão alocadas nos postos que se sucedem no diagrama de precedência. O conjunto de restrições descrito em (6) garante que o tempo de ciclo não seja excedido em cada estação. As restrições (7) delimitam o domínio das variáveis de decisão.

$$\sum_{k=1}^{S} x_{ak} - \sum_{k=1}^{S} x_{bk} \leq 0 \;\; \forall a \in N, b \in F_a \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^{S} t_i \,.\, x_{ik} \leq C \;\; \forall k = 1,2,\dots,S \tag{6}$$

$$x_{ik} \;\in \{0,1\} \;\; \forall i = 1,2,\dots,N; k = 1,2,\dots,S \tag{7}$$

Askin e Standridge (1993) descrevem uma formulação básica do problema de balanceamento de linha como a atribuição de elementos de trabalho individuais a um posto e o objetivo é a minimização do custo de montagem. O custo de montagem é composto do custo do trabalho sendo empregado para realizar as tarefas mais um custo de inatividade. Deve ser assegurado que nenhum operador tenha atribuição de tarefas que exceda o tempo de ciclo C. A ordem na qual as tarefas devem ser executadas deve ser pré-definida seguindo uma restrição identificada por $IP = \{(u,v): tarefa\ u\ deve\, preceder\ v\}$. Adicionalmente, podem existir restrições de zoneamento que indicam que um conjunto de tarefas deve ser atribuída para um mesmo posto (ou conjunto de postos).

Na formulação do problema de otimização, proposta por Askin e Standridge (1993) os indicadores binários são usados como variável de decisão. Essas variáveis indicam quando uma tarefa i é atribuída a um posto k: $X_{ik} \in \{0,1\} = 1$, caso tarefa i seja atribuída ao posto k, ou zero caso contrário. A função objetivo da equação (8) é estruturada de forma a obter o menor número de postos antes de abrir um novo posto. As inequações (9) representam as restrições que asseguram que a soma dos tempos das tarefas para o conjunto de tarefas atribuídas em cada estação de trabalho não exceda o tempo de ciclo. Cada tarefa tem uma restrição na forma das equações (10) que garantem que as tarefas serão atribuídas a somente um posto de trabalho. As restrições (11) forçam a aderência às restrições de precedência. As imposições de operações casadas num mesmo posto são asseguradas pelas equações (12). Essas restrições permitem que cada tarefa possa ser atribuída somente a um posto de origem, e as relações são consideradas somente se a tarefa u e v são atribuídas a um posto comum. Finalmente as inequações (13) são restrições que proíbem que as tarefas u e v sejam associadas ao mesmo posto.

$$\{Min\}\, Z = \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} c_{ik} X_{ik} \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{N} t_i \, X_{ik} \leq C \;\; \forall k = 1,2,\dots,K \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{ik} = 1 \quad \forall i = 1,2,\dots,N \tag{10}$$

$$X_{ik} \leq \sum_{j=1}^{b} X_{uj} \quad \forall b = 1,2,\dots,K \; e \; (u,v) \in IP \tag{11}$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{uk} X_{vk} = 1 \quad \forall (u,v) \in \tag{12}$$

$$X_{ub} + X_{vb} \leq 1 \quad \forall k = 1,2,\dots,K; \; (u,v) \in ZD \tag{13}$$

2.6.3 SOLUÇÕES EXATAS PARA O SEQUENCIAMENTO

De acordo com Scholl (1999), o balanceamento e o sequenciamento são problemas fortemente interdependentes. Enquanto o balanceamento da linha decide sobre a atribuição de tarefas às estações e, portanto, determina o conteúdo do trabalho por estação e modelo, a sequência de produção de um *mix* de determinado modelo é organizada com base no que diz respeito aos engajamentos mínimos dos operadores nos postos.

Um resumo do estado da arte sobre as principais técnicas para otimização do sequenciamento de carros foi descrito por Solnon *et al*. (2005). As técnicas apresentadas nesse estudo foram resultado de um desafio apresentado ao ROADEF[3] 2005 para obter a melhor programação de carros na linha de montagem com regras violáveis e não violáveis (*soft and hard constraints*). No estudo industrial considerado, além das restrições de capacidade, também foi levado em conta otimização de lotes de pintura para economia de solventes. Foram abordados tantos os métodos exatos quanto os heurísticos.

Brasil *et al.* (2013, p. 289) abordam o conceito de restrição da sequência de produtos em função de um determinado *mix* de produção. Os autores apresentam o problema de sequenciamento de carros (PSC), que consiste em determinar a ordem em que carros devem ser produzidos na linha de montagem, de forma a minimizar o número de violações das restrições de capacidade da linha de montagem. No trabalho foram apresentadas heurísticas e meta-heurísticas utilizadas e a importância da estrutura de dados na tratativa computacional. Em sua análise sobre PSC, os autores abordaram os requisitos de montagem que geram as restrições de capacidade e o cálculo do número de violações

3 ROADEF : Sociedade Francesa de Pesquisa Operacional e Ajuda de Decisão.

dessas restrições de capacidade. Também descreveram as principais heurísticas construtivas para PSC, com a formalização do problema e a discussão sobre a adoção dos critérios gulosos para busca das soluções. Em relação à abordagem de solução por Meta-heurísticas foram avaliados métodos como colônia de formigas, algoritmo de busca rápida, do inglês *Very Fast Local Search* (VFLS) e algoritmo de busca local iterativa, do inglês *Iterated Local Search* (ILS).

Brasil *et al.* (2013) também chamam atenção para a estrutura de dados e sua influência na complexidade computacional, comparando as estruturas de dados de Estellon *et al*. (2008) *apud* Brasil *et al.* (2013), e Ribeiro *et al*. (2008) *apud* Brasil *et al*. (2013). Por exemplo, são apresentados os resultados de experimentos computacionais de se consultar o custo de um vizinho obtido pela troca de dois carros utilizando ambas as estruturas de dados avaliadas, utilizando heurísticas de busca local (ILS) e de busca local rápida (VFLS). Os autores dividiram o problema do sequenciamento de carros (PSC) em duas etapas. A primeira etapa busca determinar o dia de produção para cada carro encomendado, de acordo com as capacidades da linha de produção e com os prazos de entrega prometidos ao cliente. Já a segunda etapa consiste em detalhar os requisitos de montagem e calcular as violações das restrições. Os requisitos de montagem servem para sequenciar os carros a serem produzidos na linha de montagem em cada dia da produção, respeitando os requisitos operacionais do veículo. O processo inicia pela montagem da carroceria (*Body Shop*), pintura e montagem final. Considera-se que uma vez definido o dia da produção na primeira etapa, a sequência não deve ser alterada.

O problema de decisão associado ao PSC consiste em avaliar se é possível encontrar uma sequência satisfazendo todos os requisitos de montagem. Alguns opcionais como montagem de acionamento de vidro elétrico ou manual, teto solar ou ar condicionado, requerem operações adicionais de montagem. No entanto, os postos de trabalho possuem uma capacidade finita atingida pelo balanceamento e os carros não podem ser sequenciados de forma arbitrária com o prejuízo de paradas de linha por sobrecarga de trabalho nos postos. Com o objetivo de suavizar as cargas entre os postos, os carros que requerem operações mais elaboradas precisam ser distribuídos de forma otimizada ao logo da sequência de carros a serem produzidos. Para definir os requisitos de montagem, a capacidade da unidade para um opcional o_i, é considerado por uma restrição de capacidade de razão N_i/P_i, que impõe a condição de que no máximo N_i veículos com opcional i podem ser produzidos em cada subsequência consecutiva de P_i veículos da linha de montagem. Em uma situação onde determinado opcional está associado a uma restrição de capacidade na razão de 1/3, significa que não deve existir mais que um veículo com esse opcional em qualquer sequência consecutiva formada por 3 carros. Ou seja, se existe uma restrição de capacidade de razão $1/P$ para um opcional, dois veículos com este opcional devem ser separados por no mínimo $P - 1$ carros.

Na revisão de Boysen *et al*. (2009) foi apresentado um estudo sobre linhas de montagem típica com múltiplas estações arranjadas em dispositivo de movimentação tipo esteira (passo sincronizado), com movimento estacionário da peça a ser montada de estação a estação. Os operadores realizam operações em cada ciclo e a cada fim de ciclo o operador retorna para a posição inicial. As considerações adicionais do modelo foram: a não existência de *buffer* entre as estações, a peça a trabalhar teria uma posição fixa sobre o sistema de transporte, o planejamento do *mix* de produção seria conhecido, os diferentes produtos requerem diferentes tarefas com tempos diferentes e considera-se que não há outras perdas ou perturbações como quebra de máquinas. Nessa revisão os autores tratam do problema principal de sequenciamento de produtos num ciclo de produção.

Os cenários de análise são caracterizados por: horizonte de planejamento dividido em T ciclos de produção (com $t = 1, \dots, T$) e para cada modelo $m \in M$ a demanda d_m no final do horizonte de planejamento é dada e tem que ser atendida. Segue que a soma das demandas dos modelos é igual ao número de produção no ciclo disponível, descrito na equação (14) proposta por (BOYSEN *et al*., 2009). O problema de decisão é representado pela variável binária x_{mt} no qual uma cópia do modelo m é produzida no ciclo $x_{mt} = 1$, ou não se $x_{mt} = 0$, conforme definição da variável apresentada na expressão (15). Na equação (16) é assegurado que em cada produção do ciclo t apenas um modelo m é produzido. Finalmente na equação (17), todos os ciclos de produção da demanda para as cópias dos modelos dm são satisfeitos. As principais notações utilizadas nas equações foram M que representa o conjunto de modelos com $m \in M$, T é o número de ciclos de produção, dm como a demanda de cópias do modelo m.

$$\sum_{m \in M} d_m = T \tag{14}$$

$$x_{mt} \in \{0,1\} \qquad \forall m \in M; t = 1, \dots, T \tag{15}$$

$$\sum_{m \in M} x_{mt} = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \tag{16}$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{mt} = dm \qquad \forall m \in M \tag{17}$$

Já em relação ao problema de sequenciamento de carros (PSC), Boysen *et al*. (2009) afirmam que ao invés de programar o conteúdo de trabalho, o problema de sequenciamento de carros considera o controle de opcionais de produto para evitar sobrecarga de trabalho. Os produtos com

opcionais podem ser submetidos a regras de sequenciamento, no qual o objetivo é restringir o número máximo de ocorrências numa subsequência num dado período de análise. O problema de sequenciamento de carros (PSC) consiste na procura de uma sequência dos produtos que atenda a demanda requisitada, sem violação das regras de sequenciamento. A regra de sequenciamento segue a forma $H_o: N_o$, na qual significa que na produção de N_o produtos sucessivos, somente H_o produtos podem conter o opcional para evitar sobrecarga de trabalho. Essa restrição de sequência leva em conta a restrição de capacidade de produção. Através dessa regra de sequenciamento, o PSC pode ser formulado como um problema de satisfação de restrições, ou do inglês, SC - *Constraint Satisfaction*, consistindo das seguintes restrições:

$$\sum_{t\prime=t}^{t+N_0-1} \sum_{m\in M} a_{mo} * x_{mt'} \leq H_o \qquad (18)$$
$$\forall o \ \in O; t = 1, \dots, T - N_o - 1$$

onde, as restrições (18) indicam que os coeficientes binários a_{mo} serão iguais a um se o modelo m contém o opcional O, zero, ao contrário. Multiplicado por uma variável binária x_{mt} que será igual a um se o modelo m é produzido no ciclo t, zero se ao contrário.

A aplicabilidade das técnicas de otimização combinatória para resolução dos problemas de sequenciamento de carros foi estudada por Boysen *et al*. (2009). O estudo consistiu em transformar um problema de CS (*Constraint Satisfaction*) representado pelas equações (14), e (18) em um problema de otimização CO (*Optimization Problem)* indicado nas equações (19) e (20). Como o modelo de otimização tem a vantagem de encontrar uma sequência de produto que minimiza as regras de violação, já que na prática uma solução sem nenhuma violação geralmente não existe. Uma nova abordagem de solução descrita por Boysen *et al.* (2009) como técnica de janela deslizante é apresentada, onde uma penalidade de custo é atribuída para toda violação de restrição. Segundo os autores, esta abordagem tende a duplicar a contagem das violações e, por consequência, os pesos das violações em função da ocorrência na sequência. Uma nova alternativa de função objetivo foi proposta no intuito de corrigir a falha observada. Ao invés de contar as possíveis violações de restrições ocorridas, somente são contadas as ocorrências que efetivamente implicam uma violação.

$$\text{Minimize CO (X,Y)} = \sum_{o\in O} \sum_{t=1}^{T} z_{ot} \qquad (19)$$

O modelo proposto está sujeito às equações/inequações (14) e (20) e há a variável binária adicional z_{ot}, conforme função objetivo da equação (19).

$$\sum_{m\in M}\sum_{t'=t}^{\min\{t+H_0-1;T\}} a_{mo}.x_{mt'} - \left(1-\sum_{m\in M} a_{mo}.x_{mt}\right).BI \le H_o + BI.z_{ot} \qquad (20)$$
$$\forall o \in O; t = 1,\dots,T$$

A inequação (20) é baseada nas mesmas variáveis binárias das inequações (18), porém com a diferença de uma penalidade de custos atribuídos às variáveis e o parâmetro *BI* (*Big Integer*, ou *Big-M*) que multiplica a variável binária z_{ot}, a qual assume valor igual a um se a regra de sequência com respeito a opção o é violada no ciclo t, zero, ao contrário.

O problema de sequenciamento de carros foi classificado em dois elementos que compõem a tupla $[\alpha|\beta]$, onde α está associado aos objetivos e β as características operacionais. Em relação aos objetivos a tupla $\alpha \in \{o, Opt^{\lambda}\}$, distingue-se entre a factibilidade e o problema de otimização. Uma vez resolvida a questão da factibilidade, o problema de otimização passa ser considerado. Entre os parâmetros de otimização é colocado como objetivo de minimizar as diversas variações de violações, entre elas: o número de violações permissível entre N_o subsequências, número de possibilidades de ocorrências de violações, número de todo excesso de ocorrências de violações numa dada entrada de dados, e de inserção de modelos vazios.

Quanto às características operacionais, os autores consideram ainda quatro atributos β_1 a β_4. Os quatro atributos principais consideram o número de opções, regras de sequências violáveis ou não violáveis, tipo de regras de sequência e atribuição de restrições. Para maiores detalhes de cada parâmetro, tanto das variações de otimização quanto operacionais, vide Boysen *et al*. (2009).

De acordo com Saadani (2003) o sequenciamento consiste, basicamente, da solução de problemas combinatórios onde se busca encontrar uma solução boa num conjunto de soluções possíveis, atendendo certos critérios. Esses problemas de otimização combinatória são do tipo NP-Completo, e os casos de sequenciamento podem ser modelados analiticamente (com função objetivo e o conjunto de restrições), ou seja, uma resolução utilizando os recursos da Pesquisa Operacional. Em sua tese, Saadani (2003) investigou a otimização do *tempo de produção H* sobre a restrição de inexistência de inatividade (*no-idle*) para um problema de *flowshop*. O seu estudo de otimização buscou encontrar uma ordem de trabalho dando a menor data de atingimento global e assegurando

que se uma máquina começasse a trabalhar, ela não deveria parar até que todos os trabalhos alocados à respectiva máquina fossem atingidos.

É descrito por Marksberry (2013), que o nivelamento da produção permite à linha de montagem operar numa sequência adequada. Com uma sequência melhor planejada obtém-se a diminuição das variações de carga de trabalho nos postos. O nivelamento da produção pode gerar várias vantagens, resumidas na Tabela 5.

Para Boysen *et al.*, (2009), o nivelamento de produção geralmente está associado a suavizar os pedidos de materiais induzidos pela sequência da produção ao longo do tempo, que num sistema de abastecimento do tipo JIT (*Just- in-Time*) é facilitado pela minimização dos estoques de segurança. Nesse caso, cada item a ser consumido recebe um objetivo teórico de taxa de consumo, no qual é definido pela distribuição da demanda sobre um horizonte de planejamento. Portanto, é necessário definir uma sequência onde a taxa de consumo atual seja a mais real possível da taxa objetivo.

Tabela 5 – Vantagens do processo de nivelamento da produção (MARKSBERRY, 2013)

Vantagem Citada nos estudos	Referências do estudo (*apud* MARKSBERRY, 2013)
Maximizar eficiência	Xiaobo *et al*. (1996)
Redução de inventário	Coleman e Vaghefi (1994)
Aumentar a habilidade de produção para estoque	Swanson (2008)
Eliminar picos de produção	Andel (1999)
Evitar sobrecarga de trabalhos	Rinehart (1997)
Aumento da capacidade	Yano e Rachamadugu (1991)
Suavização de carga da cadeia de fornecedores	Monden (1998)

2.6.4 SOLUÇÕES APROXIMADAS PARA O SEQUENCIAMENTO

Em Brasil *et al.*, (2013), foram abordadas as principais heurísticas construtivas para PSC, apresentando-se a formalização do problema e avaliação de critérios gulosos. A formalização do problema de sequenciamento de carros foi definida como uma tupla (C, O, p, q, r), onde $C = \{c1, \dots, cn\}$ é o conjunto de carros a serem sequenciados e $O = \{o1, \dots, om\}$ é o conjunto de opcionais requeridos pelos veículos. As restrições de capacidade associadas a cada opcional $o_j \in O$ são representadas por uma razão $pj \ / \ qj$, que denota que, no máximo, pj veículos podem demandar

o opcional oj em cada sequência de carros consecutivos de tamanho qj. Dado uma tupla (C, O, p, q, r), o PSC consiste em encontrar uma sequência π^* tal que $custo\ (\pi^*)$ é mínimo.

As heurísticas construtivas estabelecem uma solução inicial escolhendo iterativamente o próximo carro adicionado à sequência de acordo com um critério intuitivo: em cada iteração, escolhe-se o carro que causa o menor número de novas violações de restrições, quando inserido na sequência de produção. Vários critérios gulosos adicionais são utilizados para resolver os empates das iterações. A escolha aleatória, a maior taxa de utilização estática, maior taxa de utilização dinâmica, soma estática das taxas de utilização, soma dinâmica das taxas de utilização e distribuição equitativa. Cada um desses critérios é detalhado em Brasil *et al.* (2013). Em sua avaliação das heurísticas da literatura, foram analisadas as seguintes propostas de estudos, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Heurísticas construtivas avaliadas por Brasil *et al.* (2013)

Autor citado	Heurísticas construtivas
Gottlieb *et al.* (2003)	Critérios gulosos para decidir empate
Ribeiro *et al.* (2008)	Heurística gulosa com critério de desempate de forma hierárquica
Solnon (2008)	Probabilidade de escolha aos carros candidatos

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo versou sobre o histórico e alguns dos fundamentos de linhas de montagem, enfatizando-se conceitos de linha de modelo misto de passo não sincronizado. Também foi realizado uma introdução sobre programação matemática e simulação discreta, seguido de uma breve revisão da literatura sobre balanceamento e sequenciamento. Na sequência foram apresentadas diferentes abordagens para soluções de problemas de balanceamento e sequenciamento em linhas de montagem.

No capítulo 3 a seguir, é apresentada a descrição do problema do estudo de caso propriamente dito, que parte da identificação das condições de operação real em seu estado inicial e faz uma análise para evidenciar a correta informação do sistema na construção do modelo matemático de otimização. Também é descrita a abordagem adotada de separação do problema combinatorial em duas etapas, a do balanceamento seguida do sequenciamento.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo descreve o problema de balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem, especificamente da linha de montagem das partes móveis da carroceria onde há três diferentes plataformas de veículos que compartilham uma mesma linha de montagem. Para o entendimento do problema, descreve-se o processo de fabricação dos automóveis em análise. Em seguida realiza-se uma descrição da parte específica do problema, com a apresentação das características do processo de carroceria. Também são apresentados os produtos, sua estrutura e características de variação de demanda. Em relação ao processo, descrevem-se as principais características de funcionamento da linha, com os principais indicadores de produtividade. Por fim, mostra-se o problema da variação da demanda, que somando às diferenças dos produtos, aumenta a complexidade para o planejamento otimizado da produção.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Apesar dos benefícios de flexibilidade da linha de montagem monofluxo, que permite a produção de produtos e ou modelos mistos, é apontado por Rao (1971) que o mérito desse benefício é derivado de um custo de eficiência. E não é incomum encontrar linhas mistas de produção onde a produtividade não ultrapassa 70% de sua capacidade.

Agora, ficam algumas questões a serem respondidas: Como ocorre o problema de perda de produtividade por variações do *mix* de produção em linhas de montagem mista? Como é a dificuldade de planejamento da produção devido às constantes flutuações de demanda? A diversidade dos produtos, que são diferentes em sua estrutura, pode gerar uma oscilação nos tempos de produção pelo fato de serem montados em uma linha comum? É este fato uma causa provável de perda de produtividade?

O parágrafo anterior elenca questões relacionadas a problemas que ocorrem em linhas de montagem mista. Apesar das etapas de processo dos diferentes produtos envolvidos serem similares, as diferenças de tempos de operação pelas diferenças de produto acabam gerando, por si só, uma dificuldade de combinação das atribuições de tarefas com tempos diferentes entre os produtos. Este fato contribui decisivamente para desbalanceamentos na linha. Outra grande dificuldade é a falta de conhecimento das condições ideais de operação no chão de fábrica. A complexidade combinatória inerente do tema balanceamento/sequenciamento de produção e a falta de ferramentas amigáveis para

aplicar no planejamento do dia-a-dia de linhas de modelo misto dificulta tratar os problemas de forma preventiva.

A Figura 18 a seguir ilustra as variações possíveis das demandas de produção ao longo do tempo (“Flutuação do mercado”) e o efeito que pode gerar na capacidade de produção com o uso (“Com nivelamento”) e sem o uso (“Sem nivelamento”) de ferramentas de balanceamento/sequenciamento. Em alguns períodos haverá sobrecarga de demanda, ultrapassando a capacidade de produção. Em outros períodos haverá perdas de produtividade pela inatividade provocada pela falta da demanda. Por isso o tema de planejamento da produção deve estar integrado com as atividades de balanceamento e sequenciamento, permitindo uma produção mais nivelada, não só operando dentro dos limites da capacidade, mas também numa condição de produtividade.

A expectativa de melhoria da produtividade com o balanceamento de linha pode variar de acordo com oscilações dos tempos das tarefas dos produtos e a distribuição ao longo dos postos (SCHOOL, 1999). Por exemplo, no estudo de otimização da sequência de trabalhos entre duas máquinas conduzido por Saadani (2003), conclui-se obter uma redução, em média, de 12% do tempo total de execução (*tempo de produção WS*).

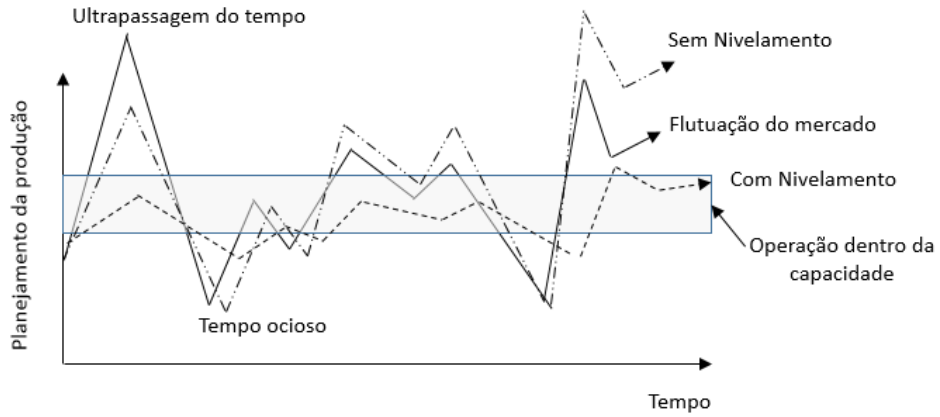


Figura 18 - Exemplo de variedade e complexidade do mercado (MASKSBERRY, 2013)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

O caso em estudo ocorre no departamento de carroceria, onde a linha é alimentada por outros três processos de cada tipo de produto conforme itens 1, 2 e 3 indicados na Figura 19. Esses processos precedentes apresentam restrições de capacidade, que limitam a máxima combinação possível de itens similares na formação da sequência. O item 4 representa as vagas disponíveis para retoques no final de linha, quando ocorre um problema de qualidade. No item 5 da Figura 19 está ilustrada a linha em análise. De forma complementar, a Figura 19 destaca a referida linha, a qual

possui a configuração de dez postos dispostos em linha reta (Posto B e Postos 01 a 09) com um sistema de mesas com rolos do tipo *stop and go* (linha de passo não sincronizado). Essas mesas de rolos são acionadas por um sistema de tração por correntes do tipo assíncrona e não contínua. Ou seja, quando o operador do posto *n* termina a operação, a peça do posto *n* só irá avançar se o posto imediatamente à frente, *n*+1, estiver livre para permitir o avanço da peça a trabalhar do posto anterior.

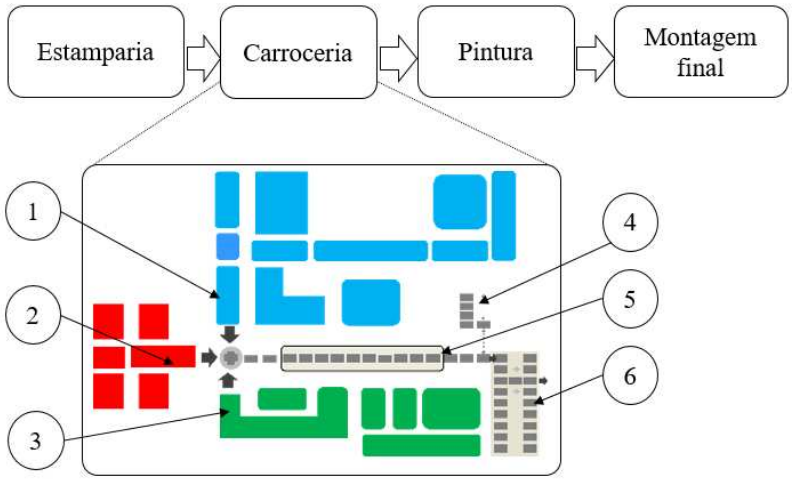


Figura 19 – Escopo do estudo – Setor de Carroceria

O item 6 na Figura 19 é um *buffer* de até 17 posições, que para as condições do problema em análise, possibilita recuperar um percentual da sequência de produção entre o processo de carroceria e pintura. Essa recuperação da sequência é necessária para atender as restrições dos processos posteriores, como otimização de lote de pintura em relação às trocas de cores nos equipamentos, como as purgas nas pistolas de pintura. Posteriormente à pintura, é necessário refazer a sequência dos produtos para atender a programação das entregas sincronizadas de fornecedores na linha de montagem final.

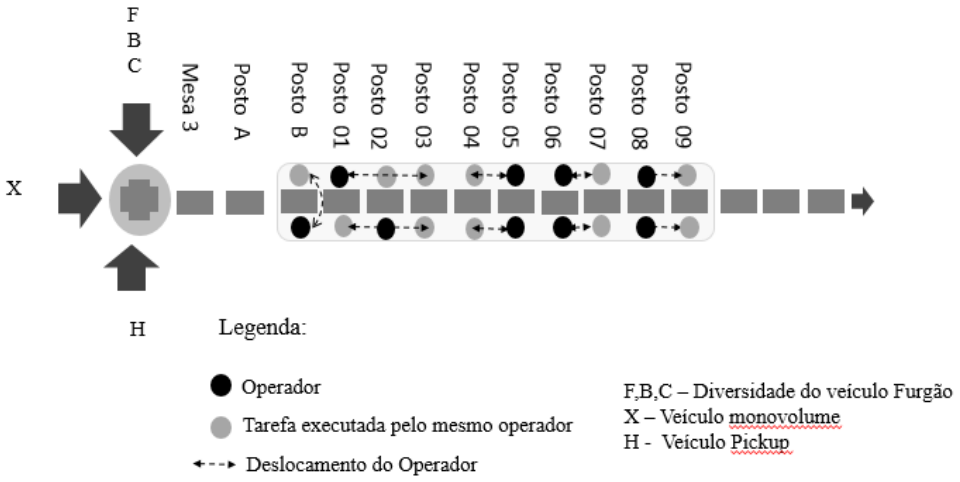


Figura 20 – Implantação do processo pelo Balanceamento (NEUT, 2013)

O problema detectado consiste, basicamente, da aparente perda de produtividade ocasionada pelas diferenças dos tempos de produção de três diferentes plataformas de carrocerias de veículos, que são montadas numa mesma linha comum. As carrocerias dos veículos em análise são as de um furgão, uma *pick-up* e um mono volume. No caso do furgão há, ainda, três variantes de produtos sensíveis ao processo, gerando diferentes operações nos postos. Assim, em termos de análise prática, existem cinco diversidades de produtos.

Essa variabilidade na duração das tarefas de um modelo para o outro são inerentes às diferenças entre os produtos. Na etapa de balanceamento da linha busca-se reduzir os desequilíbrios de carga de trabalho entre os diferentes postos, os quais são gerados pelas diferenças de duração das tarefas atribuídas aos postos (vide seção 5.1).

As sequências de produção a serem executadas na linha são alteradas ao longo do tempo, alterações estas influenciadas pelas variações de demanda. Assim, geram-se perturbações de sequenciamento na linha, as quais provocam: inatividade (i) ou ultrapassagem do tempo ciclo teórico (u). Tanto as perdas por inatividade quanto as perdas por ultrapassar o tempo de ciclo têm um forte impacto na produtividade, no tempo sem utilizar adequadamente o recurso disponível no posto, e no tempo sobrecarregando o recurso e ultrapassando o tempo de ciclo teórico.

Conforme ilustrado na Figura 21, o tempo de ciclo (Tcy) é o limite do tempo planejado para atender o *takt time*, que dita a cadência (ritmo) da produção. Caso esse tempo limite não seja respeitado, o número de peças a produzir não será atingido. No limite da produtividade máxima, o tempo de ciclo teórico (tempo obtido por meio de média ponderada dos tempos dos produtos pelo percentual do *mix* produtivo) tende a se aproximar do tempo *takt*. A minimização das perdas é obtida

pela atribuição de operações otimizadas (balanceamento) aos postos e também pelo correto sequenciamento dos produtos.

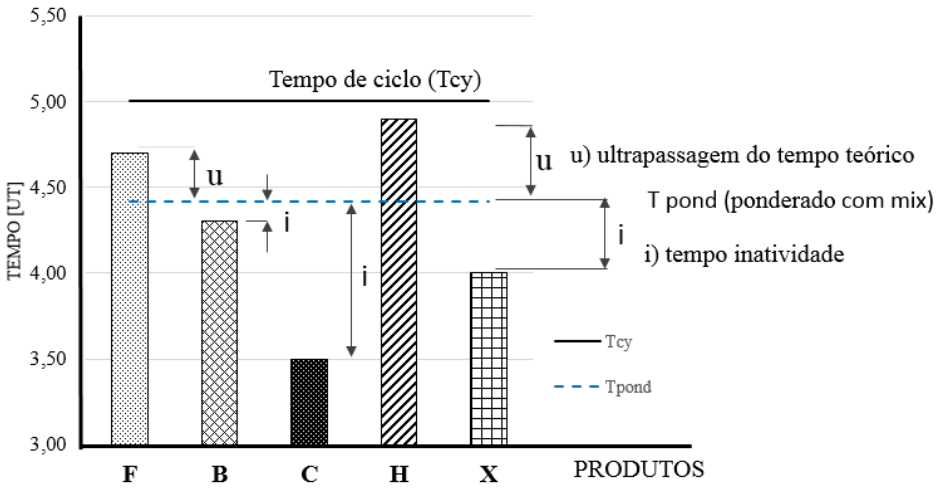


Figura 21 – Exemplo de variação da duração da tarefa entre os produtos

Os produtos F, B, C, H e X contém diferentes demandas de peças e diferentes tarefas com tempos diferentes de operação. Essa diferença nos tempos é inerente às características estruturais dos produtos, conforme será detalhado na seção 3.3 a seguir. Portanto, a duração do tempo de execução de tarefas em cada posto vai variar de produto para produto. A variabilidades dos tempos de cada produto em um determinado posto é ilustrado na Figura 21.

3.3 ABORDAGEM DA DECOMPOSIÇÃO ADOTADA

Como já comentado, o problema foi divido em duas partes, a questão do balanceamento e a questão do sequenciamento (*obs*.: a Figura 27 apresentada na seção 4.1 ilustra a decomposição adotada). Na primeira parte o problema do balanceamento foi desenvolvido por Neut (2013) e aplicado na mesma linha do estudo de caso.

Na segunda parte foi tratado o problema de sequenciamento que, a partir dos dados do balanceamento, consistiu em desenvolver o modelo de otimização do sequenciamento para obter a melhor produtividade da linha. Nessa etapa do sequenciamento foram associados os estudos de alocação de postos tampões (*buffers)* para melhorar o desempenho geral da linha. Portanto, uma avaliação dos conceitos de projeto de linha também foi levada em conta na formulação do modelo.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO E DA DEMANDA

Como já descrito, as estruturas dos produtos são completamente diferentes entre si, o que faz as diferenças dos tempos de operação serem relativamente altas. Contudo os processos são similares. Os processos considerados são os das montagens das partes móveis da carroceria, como portas, capôs, porta-malas, para-lamas, etc. As características consideradas no estudo de balanceamento são as sensíveis ao processo, que fazem parte do escopo do estudo. Já em relação ao sequenciamento, foram também consideradas as restrições de capacidade das linhas anteriores e posteriores.

O processo de montagem foi levado em conta na construção do diagrama de precedência, conforme elaborado por Neut (2013), que prevê uma sequência de montagem do sentido das portas traseira para a parte dianteira, permitindo o ajuste das folgas e jogos entre a montagem de portas, capô e para-lamas requeridos pelos critérios tecnológicos do processo.

Conforme ilustrado na Figura 22, o veículo monovolume X, é constituído de quatro portas, sendo duas dianteiras e duas traseiras, o capô, a porta malas e os para-lamas. Nesse produto não há outra variante de modelo sensível à montagem, e as peças são menores em tamanho. Após as montagens das peças, é realizado um controle e folga dos ajustes. Finalmente a última operação de identificação do número de chassis e verificação geral do aspecto superficial para seguir para a próxima etapa do processo.

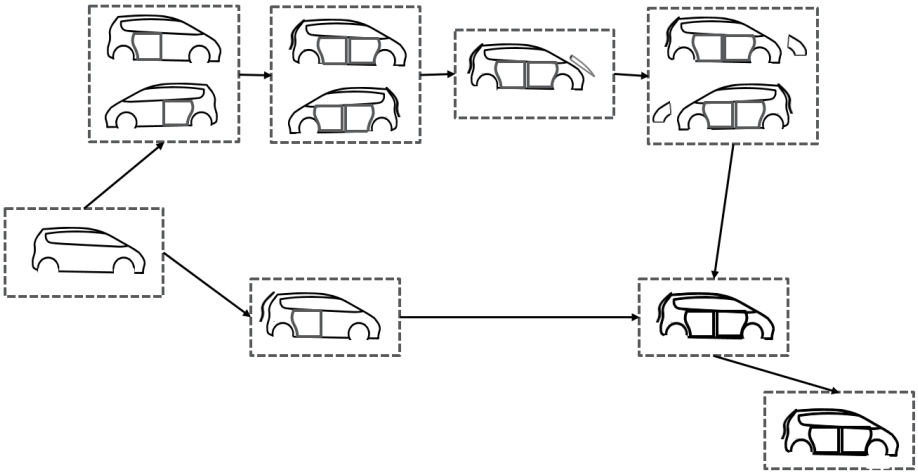


Figura 22 – Estrutura do produto X

Para o caso do furgão (Figura 23), a estrutura do produto é constituída de duas portas dianteiras, o capô e para-lamas, que é comum para toda a família de furgão. Já as portas traseiras têm

duas variantes de altura, H1 e H2. Também para ambos os casos existe a porta lateral corrediça, que também terá as mesmas duas variantes H1 e H2. O modelo C, por outro lado, terá apenas as duas portas dianteiras, o capô e os dois para-lamas. Também para as portas traseiras e portas laterais corrediças há, ainda, a diversidade de abertura para vidros ou fechada (Furgão).

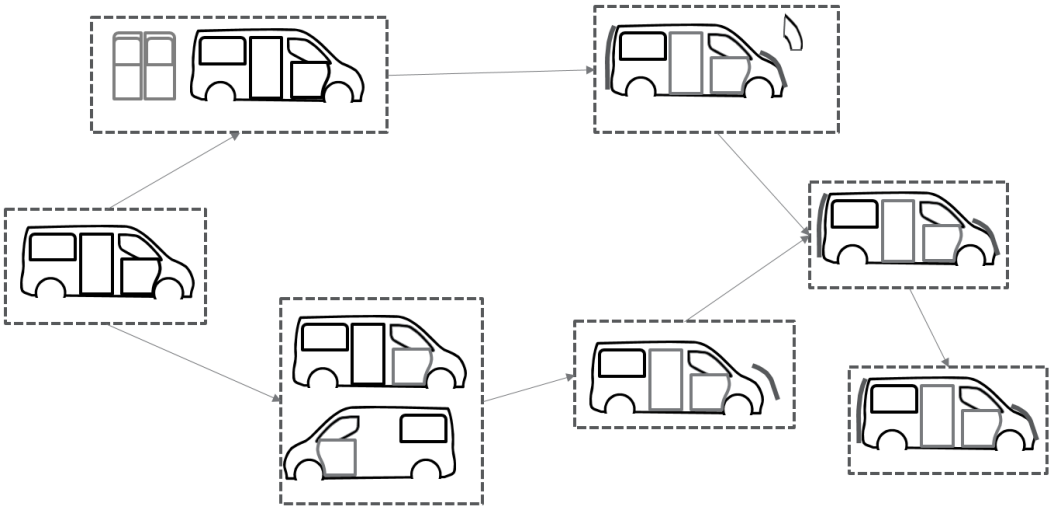


Figura 23 – Estrutura do produto F, B, e C.

Para o veículo H, na Figura 24, também há as quatro portas, o capô, e os para-lamas. O que difere dos demais veículos é a tampa da caçamba, que tem ainda duas diversidades: com furo para câmera de ré e sem furo.

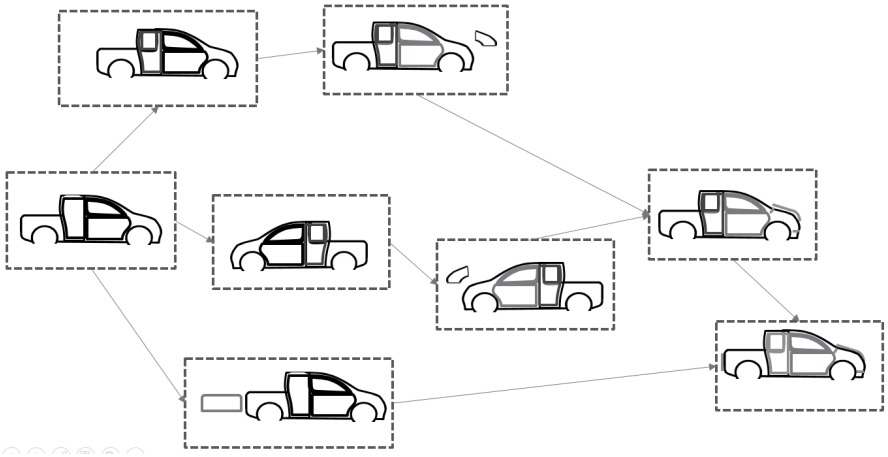
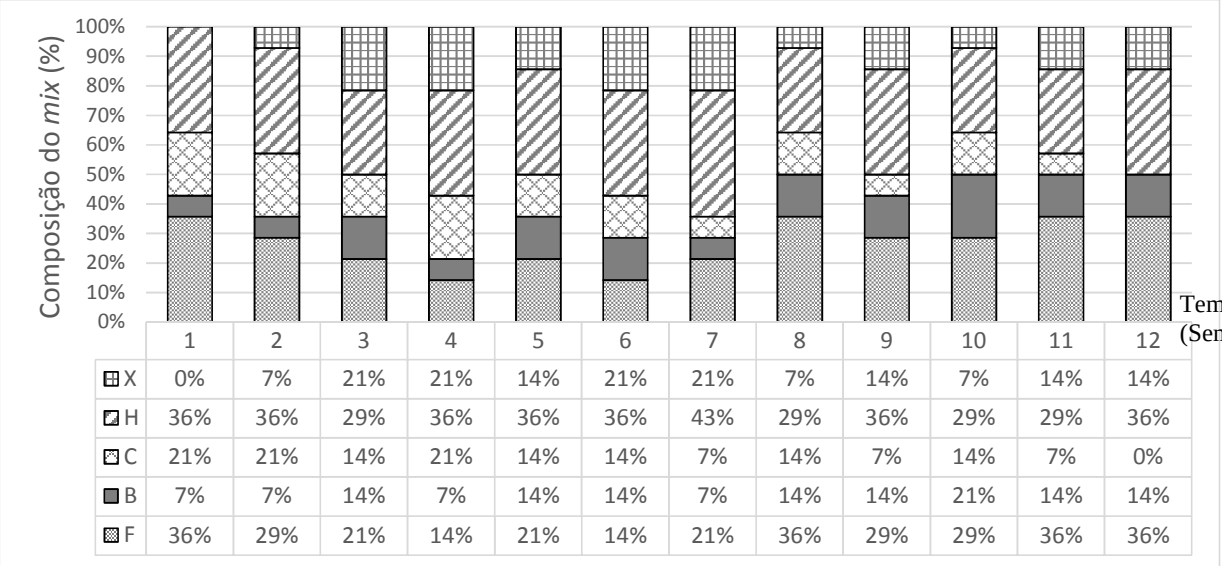


Figura 24 – Estrutura produto H

Uma síntese dos tempos de operações para todos os produtos em cada posto, bem como a média dos tempos por modelo e o desvio padrão pode ser encontrado no apêndice C.

Para o estudo, foram avaliados os pedidos de um determinado período de tempo. Estes pedidos representavam as variações de demanda mais frequentes. Foi realizado um período de observação de uma amostra de 12 semanas, equivalente a um trimestre, conforme ilustrado na Figura 25.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	0%	7%	21%	21%	14%	21%	21%	7%	14%	7%	14%	14%
H	36%	36%	29%	36%	36%	36%	43%	29%	36%	29%	29%	36%
C	21%	21%	14%	21%	14%	14%	7%	14%	7%	14%	7%	0%
B	7%	7%	14%	7%	14%	14%	7%	14%	14%	21%	14%	14%
F	36%	29%	21%	14%	21%	14%	21%	36%	29%	29%	36%	36%

Figura 25 – Variação do *mix* dos produtos no período de 12 semanas.

Por motivo de delimitar o problema, foram selecionados seis *mixes* durante o período de 12 semanas, conforme relacionado na Tabela 7. O critério para seleção dos mixes, a priori, foi o que mais representou variação de uma composição de produtos de uma semana para outra. Considera-se na elaboração dos valores referenciais dos *mixes* produtivos um total de 14 veículos produzidos, valor típico de uma hora de produção em uma linha de baixa cadência, conforme a analisada. O *mix* 1 foi sugerido a partir da composição de demanda da semana 01. Neste *mix* tem-se, por exemplo, um total de 5 veículos do tipo F, ou seja, ~36% (5/14) de veículos deste tipo na composição do *mix*. Os demais valores da composição do *mix* 1 são: veículo B ~7% (1/14), C ~21% (3/14), H ~36% (5/14), e X 0% (0/14). De forma análoga ao apresentado para o *mix* 1, os valores de referência para o *mix* 2 foram delimitados a partir da demanda da semana 4, o *mix* 3 da semana 5, o *mix* 4 da semana 7, o *mix* 5 da semana 9 e o *mix* 6 da semana 12.

As situações extremas, como não produção de algum modelo, foram consideradas apenas no *mix* 1 para o produto X e no *mix* 6 para o produto C. A intenção, neste caso, foi simular variações de demanda que de fato ocorrem em função de sazonalidades de demandas orientadas pelo mercado. Como consequência, na Tabela 7, foram relacionadas as proporções de quantidade por modelo, de forma que a soma total resultasse em quatorze. Esse número representa a unidade de referência escolhida para as comparações de tempo WS de produção (14 v/h). Percebe-se pelas indicações percentuais, e pelo gráfico da Figura 25, as flutuações de demanda que ocorrem de um período para outro. Essas flutuações geram a dificuldades para programar os recursos de força de trabalho para atender a produção com um bom nível de produtividade. Contudo, o processo também deve ser flexível de forma a permitir absorver essas variações de demanda.

Tabela 7 – *Mix* de produtos considerado nos estudos

	Mix1	***Mix2***	***Mix3***	***Mix4***	***Mix5***	***Mix6***
F	5	2	3	3	4	5
B	1	1	2	1	2	2
C	3	3	2	1	1	0
H	5	5	5	6	5	5
X	0	3	2	3	2	2
TOTAL	**14**	**14**	**14**	**14**	**14**	**14**

Apenas para esclarecer um outro *mix* que será citado na tabela do apêndice B, numa tentativa de encontrar um balanceamento que permitisse absorver várias demandas, foi realizado um experimento de otimização no modelo do balanceamento com um agrupamento de tempos definido como "*mix* 123". O balanceamento de tempos com *mix* 123 consistiu em entrar com os dados ponderados das demandas do *mix* 1 ao *mix* 3 no modelo matemático do balanceamento. O objetivo é gerar os tempos de operação do balanceamento de forma que o modelo matemático possa otimizar uma atribuição de tarefas para atender uma faixa de demanda. No caso, essa faixa compreende às variações de demanda do *mix* 1 *ao mix* 3. Portanto, em alguns experimentos iniciais, na fase de aprimoramento do modelo matemático do sequenciamento, foi utilizado o *mix* 123 como dado de entrada para o modelo de balanceamento. Com a evolução dos testes, esse *mix* foi desconsiderado por não ser possível observar vantagem significativa no seu uso, ficando somente os seis *mixes* indicados na Tabela 7 presentes nos experimentos.

3.5 A QUESTÃO DO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO

O estudo de caso abordado na presente dissertação trata de uma linha de modelo misto orientada à produção de veículos comerciais leves. Na Figura 26 são ilustrados os três princípios de produção de carrocerias em linhas de montagem: o princípio de linha simples, o principio flexível e o princípio da migração. No princípio de migração, o processo precisa responder à demanda de produção de vários modelos e com algumas variantes de cada modelo. Esse processo tem que ter a capacidade de se arranjar, e se reconfigurar para se adequar a uma nova carga de trabalho. Adicionalmente, há diversos fatores mercadológicos que afetam as demandas destes produtos como, por exemplo, quando é fechado um grande contrato de fornecimento de uma frota de veículos. Nem sempre o nivelamento e a suavização da demanda da produção com outros modelos ou produtos já programados é realizada de forma e evitar as perdas por custos extras ou uma produção ineficiente, gerando-se grandes variações do *mix* de produção.

A variação da demanda dos produtos do problema em questão é inerente da demanda do próprio segmento do mercado destes veículos leves, conforme ilustrado no princípio da migração na Figura 26. Diferentemente do seguimento de veículos de passeio, que possui um comportamento de produção mais estável, conforme o princípio da linha simples ou princípio flexível, ilustrado também na Figura 26 e que permite, em alguns casos, o uso de linha com apenas um modelo de carroceria com um grande volume de produção e poucas variantes. Já os veículos utilitários têm a característica de produção mais suscetível às variações de vendas, presença de vários modelos de carrocerias e plataformas diferentes.

Também existem outras questões práticas como a manufatura cruzada (*cross manufacturing)*, onde muitas vezes uma mesma instalação industrial é compartilhada por montadoras diferentes, até mesmo concorrentes, que realizam parcerias para utilizar as mesmas instalações, porém mantendo suas identidades nos produtos, que possuem diferenças. Essas práticas vão contra a orientação alegada por algumas filosofias de sistema de produção como o TPS (*Toyota Production System*), descritas por Marksberry (2013), onde prevê-se que uma redução da complexidade e variabilidade deve ser estabelecida na fase da concepção do ciclo de vida do produto, tanto na etapa da produção como na comercialização. No entanto, em casos como a manufatura cruzada, o maior fator de decisão é o estratégico: há oportunidade de redução de investimentos, em um mercado incerto de uma planta nova, em um mercado em desenvolvimento (g*reen field*). Assim, dividem-se os riscos do negócio em uma parceria.

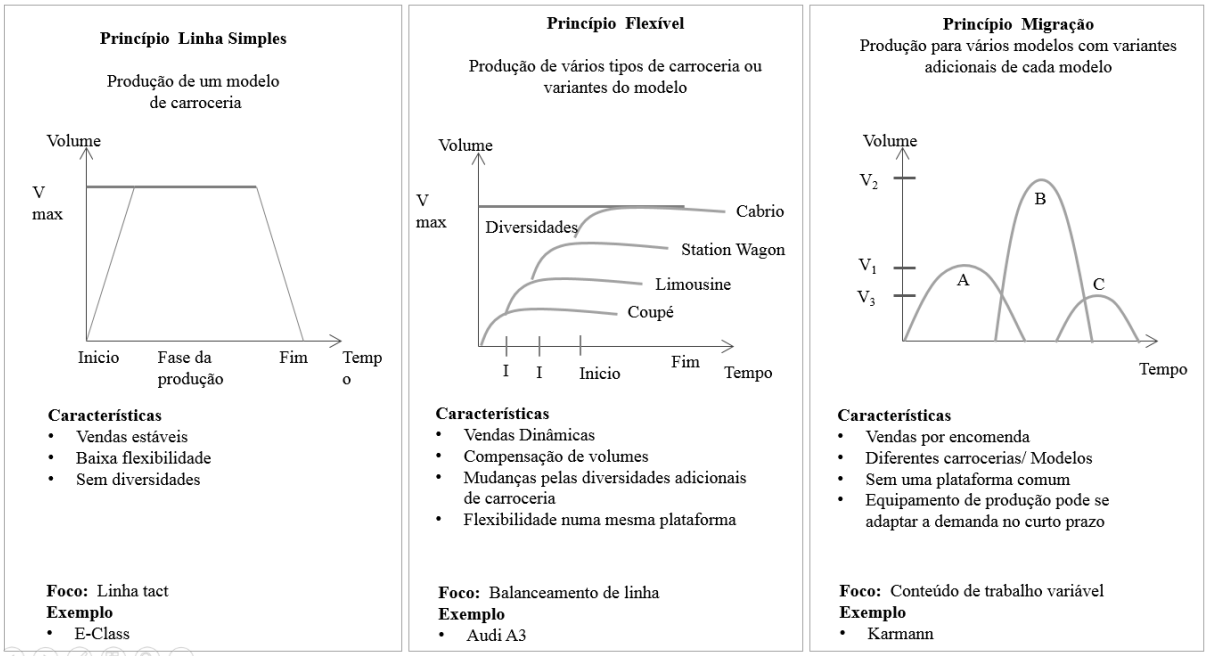


Figura 26 – Princípios de manufatura na produção de carrocerias de veículos (ELMARAGHY, 2008)

Por outro lado, diversos estudos apontam para a necessidade de flexibilidade da manufatura. Tolio (2009) descreve uma definição de flexibilidade como a habilidade de mudar ou reagir com o mínimo de dificuldade em tempo, esforço, custo ou performance. Cabe afirmar que sistemas de produção flexíveis têm sido o desafio da nova manufatura.

Para um sistema de uma produção com o princípio flexível, ou de migração, há necessidade que se faça uma gestão dos fluxos dos produtos entrantes. Tamani (2008) apresentou uma metodologia de gestão inteligente do sistema de produção com alta densidade de fluxo contínuo. A partir do modelo proposto na metodologia, foi obtida uma forma de melhorar a performance do sistema de produção, apesar de diversas perturbações. O sistema foi decomposto em dois níveis, o nível de comando local e o nível de supervisão dedicado. No nível de comando local o objetivo é de regular o fluxo de cada módulo de produção sobre uma base de informação local (com um sobre estoque). Esse princípio consiste em alocar a capacidade ajustada à taxa de produção de cada módulo que satisfaça a demanda para evitar rupturas ou bloqueios dos postos. O nível de supervisão é dedicado à coordenação dos controles locais para seguir os objetivos globais e melhorar a reatividade do pedido local.

Segundo Thomopoulos (2014) existem algumas estratégias de produção para facilitar e melhorar o planejamento e também minimizar as perdas. As três citadas pelo autor são: a produção para estoque, a produção por pedido e a produção postergada.

Na produção para estoque (*make-to-stock*), em linhas de montagem de modelo misto, é utilizada como uma forma de prever a demanda e diminuir as variações da produtividade, por planejar uma quantidade de operadores justo o necessário na linha em função da quantidade de modelos a produzir.

Já na produção por pedido, ocorre quando o cliente especifica as características e os opcionais para cada unidade a ser fabricada. Nesse sistema de gerenciamento a unidade é programada por um algoritmo de sequenciamento do *make-to-order*. Esse tipo de programação de montagem é muito utilizado nas montadoras de caminhões, onde o produto tem um grande valor para aquisição e é tipicamente produzido atendendo especificações do cliente. O cliente seleciona a característica e os opcionais, ou até mesmo eliminando algum opcional ofertado no produto.

Na estratégia de produção postergada as unidades são produzidas sem nenhuma variação de características e opcionais. A montagem é considerada como se fosse linha de montagem simples e essa produção é estocada num armazém. Quando os clientes pedem o produto com uma determinada característica ou uma combinação de opcionais, o produto é selecionado do armazém para atender ao cliente. A estratégia de postergação pode reduzir o inventário na planta e principalmente reduzir o prazo de entrega para o cliente.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capitulo 3, foi delimitado o problema de perda de produtividade em linhas de montagem de modelo misto em linhas do tipo assíncrona de baixa cadência de um exemplo da indústria automotiva. Foram descritas as principais características do processo de montagem das partes móveis da carroceria (*closures*), bem como as diferenças dos produtos. Também foi introduzida a questão da dificuldade do planejamento de uma demanda variável de produtos diferentes. No capítulo 4 a seguir, apresenta-se as formulações matemáticas dos modelos de balanceamento e sequenciamento pela técnica da Programação Linear Inteira Mista (MILP). Ambos os modelos foram desenvolvidos no ambiente de modelagem para programação matemática GAMS® e resolvidos por meio do *solver* CPLEX para a posterior compilação e geração dos resultados.

4. FORMULAÇÃO DOS MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Nesse capítulo apresenta-se uma descrição dos métodos utilizados para realizar o experimento, partindo da coleta dos dados reais para elaborar o modelo de balanceamento e, posteriormente, o modelo de sequenciamento. Ambos os modelos de balanceamento e sequenciamento foram construídos com a técnica da Programação Linear Inteira Mista (MILP). A abordagem adotada foi a de primeiro resolver o problema do balanceamento (atribuição de tarefas a estações/trabalhadores) da linha mista e, posteriormente, o sequenciamento dos modelos. Essa recomendação foi proposta por Wester e Kilbridge (1964), *apud* Rao (1971) como uma forma eficiente de utilização da linha de modelo misto. Como será detalhado mais a *posteriori*, essa abordagem continua sendo uma forma viável do ponto de vista computacional para a decomposição do problema. Os modelos matemáticos foram desenvolvidos no ambiente de modelagem GAMS/CPLEX.

4.1 METODOLOGIA ADOTADA

Como descrito no capítulo 2, seção 2.3, considerar todas as restrições reais do sistema e ter diversos objetivos simultâneos tornaria o problema de balanceamento-sequenciamento computacionalmente complexo para ser tratado. Por esse motivo, o problema foi divido em dois problemas separados, balanceamento e sequenciamento, conforme a seguir detalhado.

Em Ozturk *et al.* (2013) foram desenvolvidos modelos para tratar os problemas de balanceamento e sequenciamento de forma simultânea, mas os autores realizaram observações sobre a crescente complexidade computacional da referida abordagem. Nesse caso, o problema era relativo à montagem de cinco produtos com estruturas similares em uma linha sincronizada composta por apenas três postos em forma de uma linha reta. A abordagem da solução foi, inicialmente, por Programação Linear Inteira Mista (MILP) e, na sequência, utilizando-se Programação por Restrições (PR). Os autores consideraram simultaneamente os modelos de balanceamento e sequenciamento dentro da mesma formulação buscando otimizar a alocação de tarefas nos postos. Uma das conclusões apresentadas no estudo é de que a formulação por MILP para o problema tratado não foi computacionalmente eficiente. Assim, alternativamente, foi proposto o uso do modelo em PR que, no caso estudado, foi eficiente em termos de modelagem, com uma estrutura compacta, e relativamente mais efetiva em termos de esforço de solução computacional. Para uma linha

assíncrona, com três produtos totalmente diferentes e nove postos, não foram encontrados estudos para uma comparação de modelagem, apenas as recomendações de solução em Askin e Standridge (1993).

Tendo por base a inerente dificuldade de solução computacional de se tratar de forma agregada os problemas de balanceamento e sequenciamento, no caso estudado optou-se pela separação em duas etapas complementares: (i) realizar o balanceamento da linha comum de montagem da carroceria; (ii) seguir-se com o estudo de sequenciamento dos produtos a entrar na linha de produção. Na Figura 27 é ilustrado como o problema foi dividido. No balanceamento, o objetivo é realizar a "otimização vertical dos tempos", procurando pela melhor distribuição das tarefas ao longo dos postos de trabalho. Já no sequenciamento, o objetivo é a "otimização horizontal dos tempos", obtendo-se a melhor sequência de produção possível dentro dos limites do melhor balanceamento.

Com o objetivo de suavizar a carga de trabalho nos postos de linhas de modelo misto, Emde, Boysen e Scholl (2010) introduziram o conceito de balanceamento horizontal e vertical. Conforme a proposta dos autores, o balanceamento horizontal tem em sua função objetivo três propostas de otimização do tempo de processamento para suavização da carga de trabalho por posto, envolvendo: i) ao tempo de ciclo, ii) a média dos tempos de processamento de um modelo por posto e, iii) a média dos tempos de processamento por todos os modelos por postos. Já em relação ao balanceamento vertical, o objetivo é uma distribuição uniforme da carga de trabalho entre todos os postos. Para a adaptação do caso em estudo, os objetivos do balanceamento horizontal estão contidos no modelo MILP do balanceamento (forçando uma otimização vertical dos tempos) e o balanceamento vertical está inserido no modelo MILP de sequenciamento (forçando uma otimização horizontal dos tempos).

Em um passo inicial, foi recuperado o modelo matemático do balanceamento, desenvolvido por Neut (2013) como trabalho de conclusão do curso de graduação, o qual foi aplicado na mesma linha do presente estudo. No trabalho de Neut (2013), os resultados indicaram uma oportunidade de melhoria no balanceamento com reduções de tempo de 24% a 30%. Após verificação destes resultados por meio de simulação discreta, confirmou-se uma redução de pelo menos 15%. As discrepâncias otimização/simulação ocorreram devido ao fato de no modelo MILP não ter sido inserido o tempo de transporte entre postos, fato aprimorado no presente trabalho. Este tempo de transporte responde por ~7% da ociosidade total, fato explorado *a posteriori* na seção 5.3.

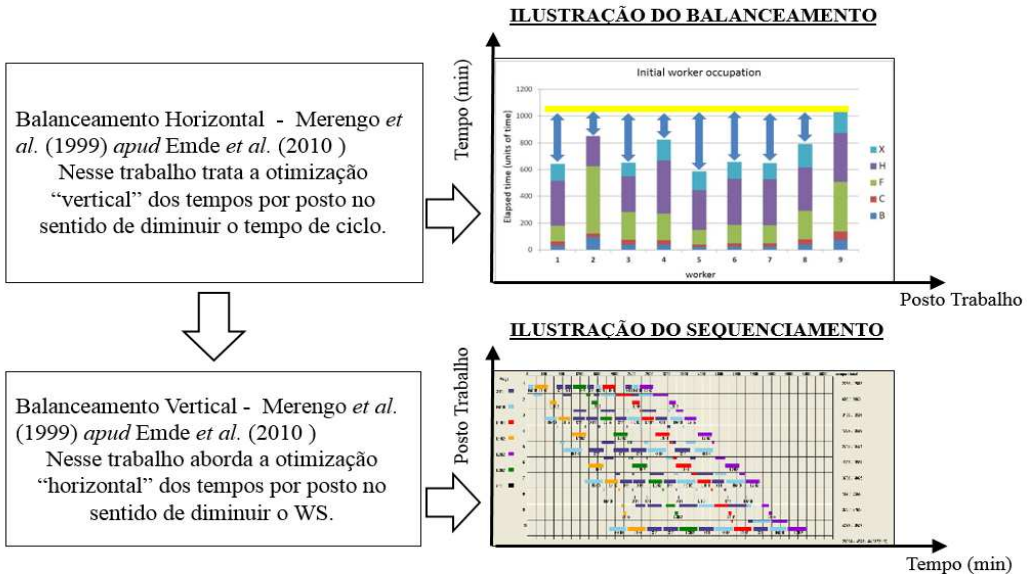


Figura 27 – Abordagem da solução do problema de otimização

O trabalho sobre otimização do balanceamento consistiu em aperfeiçoar a atribuição de tarefas de forma a minimizar os tempos de ciclo e as diferenças das sobrecargas de tarefas entre os postos. Nesse processo de otimização foi realizado o estudo da linha denominada comum, onde 240 tarefas comuns para os produtos F, B e C, outras 182 tarefas para o produto H e 190 tarefas para produto X foram levantadas dos dados das folhas de operação padrão. A partir da atribuição dos tempos de tarefas de um produto, obteve-se o resultado do agrupamento realizado, totalizando 288 tarefas comuns, conforme ilustrado na Figura 28. Essas 288 tarefas comuns foram reagrupadas em operações, respeitando um gráfico de precedência comum, de forma a racionalizar a montagem. Essa simplificação de quantidade de tarefas agrupadas em operações, simplifica o processo e faz uma ligação com o processo real de montagem, eliminando as possibilidades de combinações não factíveis na prática. Por exemplo, colocar o parafuso na porta e não realizar o aperto. Essa etapa do problema é bastante crítica e importante, pois além de simplificar o modelo matemático, faz uma ligação com o mundo real.

A técnica de restrição de precedência é necessária, mas não é suficiente para detalhar como fazer o agrupamento dos tempos das tarefas. Nem sempre esse agrupamento segue uma decomposição elementar da indivisibilidade de operação, mas leva em conta outros critérios, como etapas de operação importantes para o aprendizado ou que devem ter um ponto de alerta para a qualidade no desempenho do produto final.

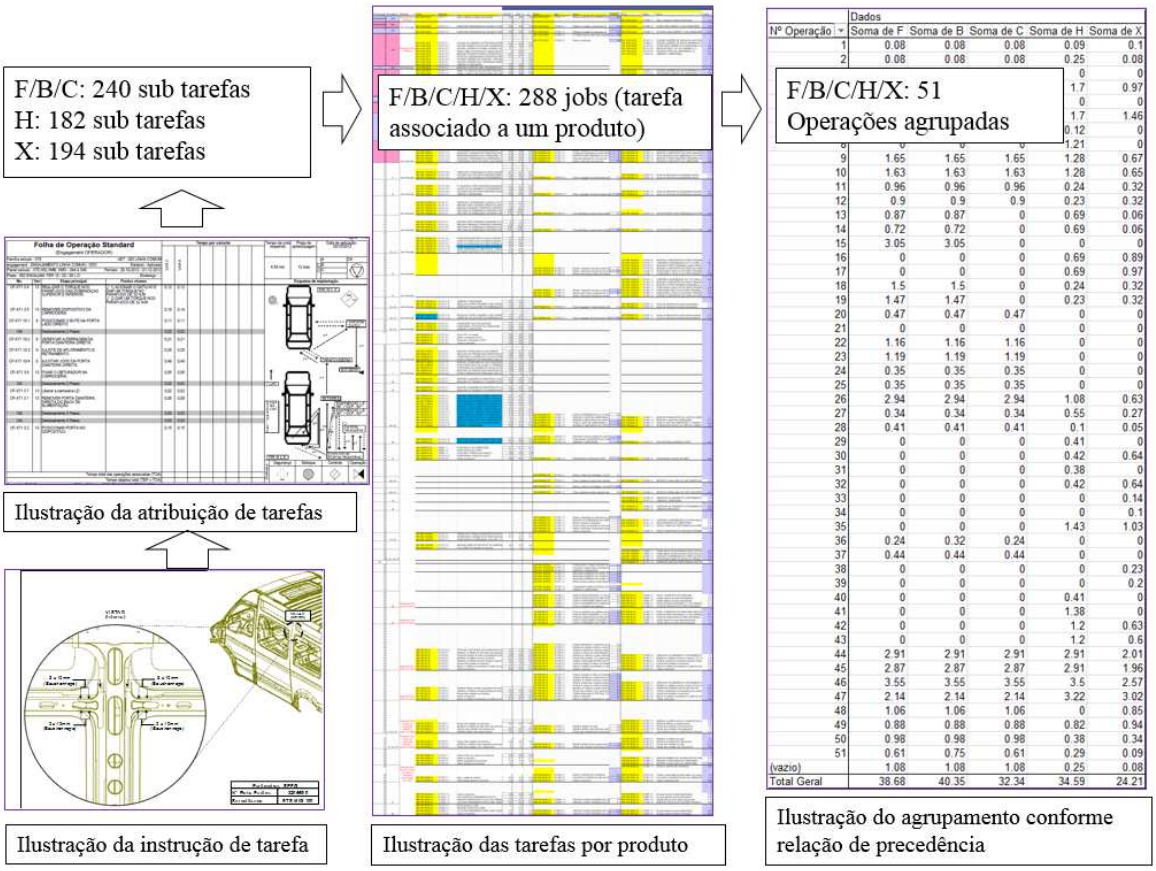


Figura 28 – Esquema do agrupamento das tarefas por produto

Scholl (1999) descreveu a relação das principais características das tarefas com a complexidade que impacta nos tempos computacionais. As principais características avaliadas foram o número de tarefas, tempo das tarefas em relação ao tempo de ciclo, a restrição de precedência e número de postos. Em relação ao número de tarefas, existe $n!$ sequências possíveis, portanto a complexidade pode crescer de forma não polinomial. Já em relação ao tempo das tarefas, se estes forem pequenos em relação ao tempo de ciclo, poderá haver menos postos com tempo ocioso, pois há relativamente mais possibilidades de se encontrar soluções que atendam a função objetivo, ou seja, a distribuição das tarefas ao longo dos postos tende a ser mais equilibrada, visto que a existência de muitas tarefas com durações longas tenderiam a causar maiores desequilíbrios nas alocações.

De acordo com Scholl (1999), a restrição de precedência tem duas influências principais: por um lado ela restringe o número de sequências factíveis para encontrar soluções válidas; do outro, ela contribui para diminuir a complexidade computacional teórica. Além da quantidade de restrições, a forma da estrutura do gráfico de precedência também influencia na complexidade. Para uma estrutura de gráfico de precedência no formato divergente, a complexidade tende a ser menor. Uma

descrição mais completa das características operacionais e sua influência na complexidade computacional, bem como algumas formas de medições dessa complexidade podem ser encontradas em Scholl (1999).

Em termos práticos, uma filmagem da operação e uma análise do trabalho foi importante para um correto agrupamento das tarefas. Essa etapa do trabalho requereu uma análise do produto e processo para delimitar a coerência dos agrupamentos das operações. Esse é um ponto chave para coerência do modelo matemático com o sistema real. Na grande maioria dos estudos os tempos são considerados como determinísticos, sendo uma forma de simplificação. Contudo, nos casos reais, os tempos assumem um comportamento estocástico dado as variáveis do processo que estão associadas ao sistema de gerenciamento da planta. Como exemplo, está o nível de habilidade dos operadores em determinadas operações, o percentual de absenteísmo entre outros diversos fatores das condições de trabalho.

Num sistema onde são colocados vários operadores em série, uma variação em um posto, irá provocar variações em toda a linha, podendo gerar o desbalanceamento dinâmico ao longo de um dia de produção. Contudo, nesse trabalho foi adotada a simplificação do tempo para determinístico. Outra simplificação também considerada foi sobre o conceito de confiabilidade (MTBF) e disponibilidade de sistema (MTTR). Ou seja, o rendimento próprio da linha não foi levado em conta na avaliação da otimização.

A partir dos dados do balanceamento, que indicavam as atribuições de tarefas adequadas para um dado *mix*, foi desenvolvido o modelo de otimização do sequenciamento. Assim, o objetivo passava a ser obter a melhor produtividade de uma linha balanceada, atuando-se na etapa de sequenciamento. Através de indicações parciais dos resultados obtidos, foram também realizados estudos de alocação de *buffers* no intuito de viabilizar uma melhora do desempenho geral da linha. Portanto, uma avaliação dos conceitos de projeto de linha também foi levada em conta na formulação do modelo matemático. No modelo de sequenciamento, o objetivo é reduzir o tempo de produção total do horizonte WS (*tempo de produção WS*) de uma determinada sequência de produção.

O gráfico de *Gantt* foi utilizado para ilustrar o resultado e facilitar o entendimento, conforme Figura 29. Nesta figura, a legenda a esquerda indica os produtos a serem produzidos diferenciados pelas letras e cores. Cada linha do gráfico representa os postos de trabalho. Cada coluna representa uma escala de tempo. Cada barra de cor seguida pela letra representa o tempo de operação que aquele produto tem de atribuição de tempo de tarefa naquele posto. A sequência de entrada no posto segue da esquerda para a direita, sendo que a primeira diversidade de veículo/ produto a produzir, seria o B, seguido de X, H, F, X, H, F, H, C, H, H, F, X e H, para o exemplo da Figura 29. O encadeamento da sequência completa do ciclo a produzir no posto, em sua somatória, resulta no

tempo total WS. Considere-se, ainda, que o maior tempo WS do posto mais carregado será o tempo de atravessamento ou "*tempo de ciclo* do lote" ou tempo de *lead time* a considerar para o escoamento do fluxo de produção. O índice "MP" indica a soma do tempo alocada à mão de obra nos postos. O índice "Pair" indica a ocupação de dois postos de trabalho associados, de forma simultânea, à mesma mão de obra. Esta é uma especificidade do problema para algumas operações que demandam a intervenção de operário(s) a dois postos vizinhos. Por exemplo, pegar e depositar o capô sobre o gabarito de montagem requer um operador de cada lado, mas esta tarefa era distribuída entre dois postos de trabalho devido ao abastecimento da "borda de linha". Ou seja, dependendo do modelo, realizava-se o depósito do capô em um entre dois postos de trabalho.

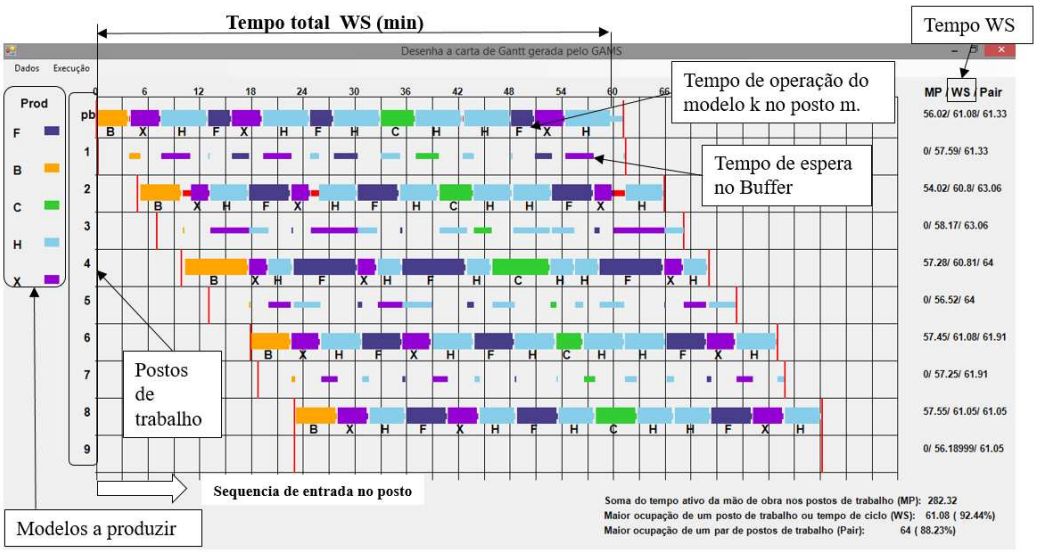


Figura 29 – Gráfico de Gantt do tempo de produção da sequência a produzir.

Como abordagem principal de solução, foi aplicado o processo de modelagem com as etapas: definição do problema, a formulação do modelo matemático, a resolução do modelo, a interpretação, a simulação em computador e a aplicação da solução do sistema real.

Na Figura 30, é ilustrada a abordagem adotada. Primeiramente, obteve-se os tempos das tarefas de cada modelo (Apêndice C) e as restrições de montagem em conjunto com a definição dos *mixes* de produtos. Com os dados obtidos, foi utilizado o modelo do balanceamento para realizar a "otimização vertical", ou seja, obter o balanceamento mais adequado possível. Na próxima etapa foi desenvolvido o modelo do sequenciamento. Balanceamento e sequenciamento foram elaborados no ambiente de modelagem GAMS/CPLEX. O modelo do sequenciamento sugeriu sequências otimizadas, representadas em cartas de *Gantt*, conforme Figura 29. A partir das sequências geradas, foram realizados testes no ambiente de simulação WITNESS.

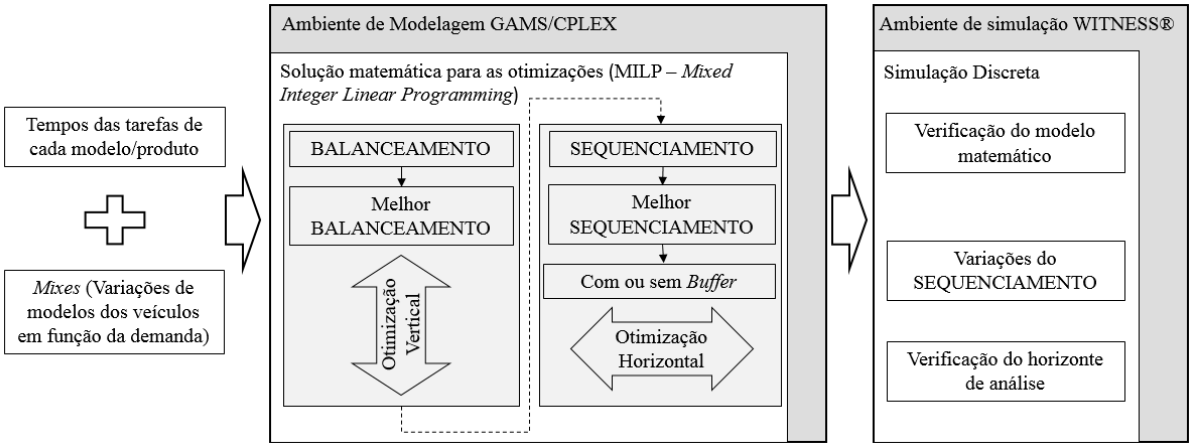


Figura 30 – Ilustração da abordagem de solução do problema

O fluxo operacional das tarefas a serem executadas no processo de obtenção das respostas de balanceamento/sequenciamento é representado na Figura 31.

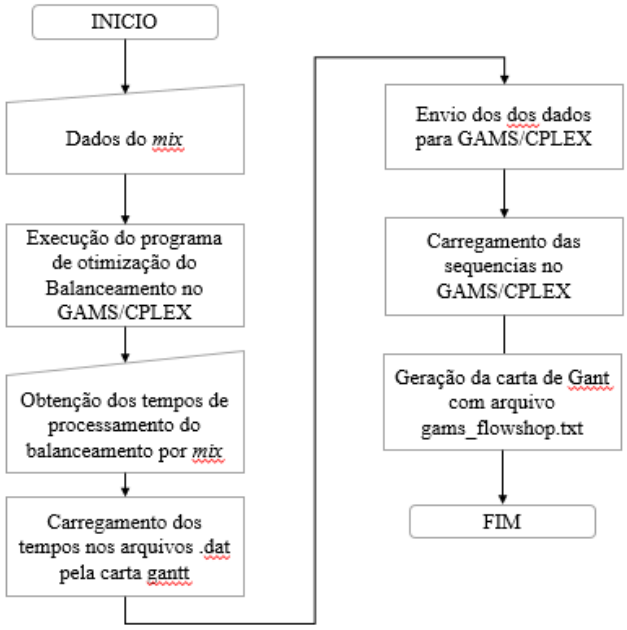


Figura 31 – Fluxo de atividades para gerar o sequenciamento no GAMS/CPLEX.

A partir dos dados do *mix* de produção, que indica a demanda de cada produto, foi realizado o balanceamento ótimo no *ambiente de modelagem* GAMS/CPLEX. O resultado de alocação dos tempos desse balanceamento foi utilizado como dado de entrada para o modelo de sequenciamento. Esses tempos foram carregados como arquivo externo lido no GAMS/CPLEX. Executa-se, então, o modelo de sequenciamento e gera-se o arquivo com a indicação da sequência e

os tempos de produção do lote de 14 veículos em série. O gerador de gráfico de *Gantt* toma o arquivo de saída obtido e apresenta o gráfico de *Gantt*, que facilita a visualização da melhor sequência de produtos de forma a minimizar o tempo WS, conforme ilustrado na Figura 29.

Para aplicação da simulação discreta, foi utilizado o *software* WITNESS. O propósito do uso do simulador foi o de funcionar como um recurso de verificação dos resultados do modelo matemático. No modelo do WITNESS não foram consideradas incertezas, a ideia foi de utilizar a simulação discreta para confirmar os resultados previstos no modelo matemático e evitar erros maiores oriundos de premissas de modelagem que não fossem representativas do sistema real. Também, no modelo matemático não foram considerados os fatores estocásticos e, por simplicidade, a mesma simplificação foi adotada na etapa de simulação.

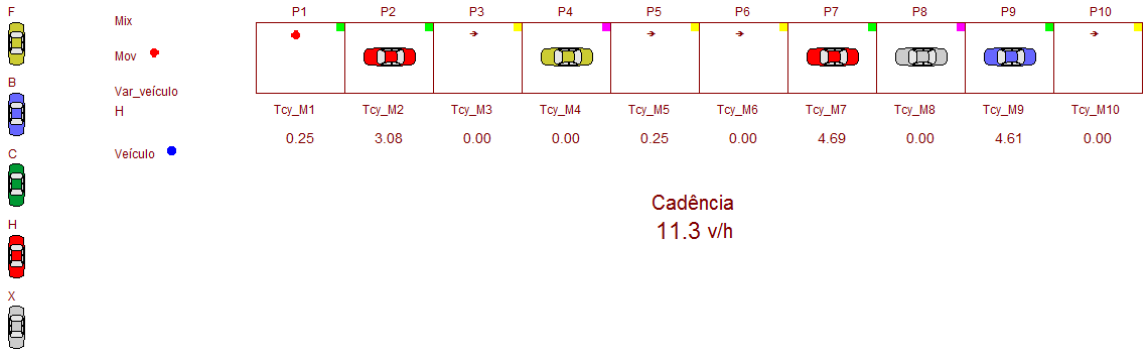


Figura 32 - Modelo da linha de montagem no WITNESS.

O modelo de simulação discreta foi construído com a representação gráfica de 10 postos (P1 a P10), representação esta sugerida pela otimização do sequenciamento, que indicou a colocação de postos pulmões entre postos de montagem. Na Figura 32, é ilustrado o esquema da linha de montagem das partes móveis da carroceria no ambiente de simulação, onde as figuras de veículos ilustrados a esquerda pelas letras F, B, C, H e X representam os veículos reais, com os tempos de operação associados. Essa implementação no WITNESS foi realizada a partir do elemento “Posto”. O elemento “*Buffer*” não foi utilizado. O posto é representado na figura como P1 a P10. Assim, o “Posto” emula também a existência de *buffers*. Os postos ímpares representam operações e os pares os *buffers*. Ressalta-se esta consideração de implementação, pois no Capítulo 5 apresenta-se a questão de bloqueio dos postos nos relatórios estatísticos do WITNESS. O bloqueio representa que o posto em análise está impedido de avançar o carro para o próximo posto e, na verdade, está desempenhando o papel de *buffer* (tempo de operação nulo) entre postos de montagem efetiva, os quais possuem tempo de operação conforme o produto da sequência a produzir. Abaixo de cada posto é indicada a

informação do tempo de operação que cada veículo (F, B, C, H, X) terá no posto, representado por Tcy_M1, Tcy_M2,... Tcy_M10. Ainda na Figura 32, é ilustrado o elemento variável indicado por cadência, que registra o número de peças produzidas no intervalo de uma hora (que passaram pelo posto P10).

Nos postos com operação, foram incluídas as variáveis “Tcy” de cada posto para cada produto F, B, C, H e X. Também foi criada a variável “Mov” para o tempo de transporte entre os postos. Nos postos que estavam atuando como *buffers*, os tempos das variáveis Tcy de cada produto foram adotados como zero. Apenas para a variável Mov foi adotado o tempo de 0,25 minuto. Como já mencionado, não foi considerado nenhum fator estocástico como os de perdas por panes (disponibilidade e confiabilidade), ou as perdas associadas a variação de velocidade em relação ao tempo de trabalhos manuais (rendimento).

A sequência a produzir foi incluída a partir de arquivo de entrada correspondente a cada *mix* do balanceamento, conforme apresentado na Tabela 7. Os testes foram realizados atribuindo-se valores de distribuição de carga de balanceamento ideal para os postos, em relação ao *mix* testado (valores obtidos do modelo matemático). O tempo de simulação *a priori* foi limitado a 2050 minutos, ou seja, equivalente a uma semana de tempo de operação (para um turno de produção de 410 minutos de tempo requisitado para a produção, excluindo as pausas). Esse horizonte de análise foi definido pois, a partir desse valor, não houve alteração significativa do valor da taxa de produção em veículos por hora. Também aqui foi realizada a simplificação de não considerar no modelo de simulação os períodos exatos de início e fim de cada intervalo de produção.

A partir desse regime estabilizado, foram gerados os indicadores dos postos pelo WITNESS (relatório estatístico). A cada sequência testada conforme o *mix*, foi realizada a avaliação da cadência atingida e os relatórios de estatística do WITNESS dos estados dos postos, conforme a Figura 33.

Machine Statistics Report by On Shift Time

Name	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
% Idle	0.00	30.62	0.25	66.99	10.40	44.62	1.99	77.44	3.46	94.77
% Busy	92.44	5.29	94.48	5.27	80.13	5.26	92.76	5.24	91.31	5.23
% Filling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Emptying	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Blocked	7.56	64.08	5.27	27.75	9.48	50.12	5.24	17.32	5.23	0.00
% Cycle Wait	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup Wai	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Broken Do	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Repair Wa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No. Of Opera	869	868	865	864	863	862	860	860	858	856

Figura 33 – Relatório estatístico dos postos conforme o *mix* utilizado.

4.2 MODELO MILP DO BALANCEAMENTO

Os resultados do balanceamento são derivados do trabalho acadêmico de Neut (2013), onde um modelo MILP foi utilizado no intuito de obtenção de balanceamentos otimizados. Os resultados obtidos são, então, utilizados como entrada para a otimização do sequenciamento.

Toda a tratativa dos dados a partir das tabelas de tempos das operações e restrições de precedência foi realizada para a obtenção dos parâmetros de entrada do modelo. Partindo-se das variáveis binárias e contínuas propostas, foram criadas a função objetivo e as restrições, formulações que serão vistas resumidamente a seguir. Os principais conjuntos de restrições do modelo envolvem: tempo de ciclo, tempo máximo de operação em um posto, número de postos, número de tarefas com operações simultâneas, relação de precedência entre as tarefas. As principais variáveis de decisão criadas para o modelo são descritas a seguir:

$aloca_{i,p,l}$	Variável binária que associa uma tarefa *i*, a um lado *l* de um posto de trabalho *p*.
$aloc_ar_{a}$	Variável binária que indica o arranjo utilizado.
$alocmo_{i,m,p,l}$	Variável binária que associa uma tarefa *i* a um operador *m*, a um lado *l* de um posto de trabalho *p*.
$aloc_pos_{a,m,p,l}$	Variável que associa a mão de obra a um posto de trabalho, ou seja, distribui o operador *m*, no lado *l* do posto *p* dentro do arranjo *a*.
$analisa_{i,p,l}$	Variável contínua inserida no modelo para que a configuração inicial da linha fosse levada em conta durante o balanceamento. Quanto menor a somatório dessa variável para as tarefas, postos e lados, menor a variação da configuração da linha antes e após o balanceamento.
$ciclo_{x}$	Variável contínua que indica o tempo de ciclo do *mix* de produção *x*.
$difer_{m,x}$	Variável contínua que corresponde ao módulo da diferença entre o limite inferior do tempo médio dos *mix* e a ocupação do operador *m* para produzir o *mix x*.
$diferenc_{o,m,p}$	Variável contínua que corresponde ao valor da ociosidade de um operador *m* no posto *p* enquanto espera o outro operador do mesmo posto *p* terminar seu trabalho para o produto *o*. Representa a diferença entre os tempos de operação de dois operadores alocados a um mesmo posto *p* realizando operações para um mesmo produto *o*.
$dur_posto_{o,m,p}$	Variável contínua que indica o tempo total de ocupação do operador *m* para produzir o produto *o* no posto *p*.

$dur_mo_{m,x}$	Variável contínua que indica o tempo total de ocupação do operador *m* para produzir o *mix* de produção *x*.
$maior_pos_{o,p}$	Variável contínua que indica o maior tempo de ocupação de um posto *p* que possua mais de um operador *m*, ou seja, se dois operadores estiverem trabalhando no mesmo posto essa variável retorna o tempo de ocupação do operador com maior tempo de operação para o produto *o*.
$media_x$	Variável contínua que corresponde ao limite inferior do tempo médio dos *mix*.
$total$	Variável contínua correspondente ao valor da função objetivo do modelo matemático.

Os parâmetros com os valores fixos de entrada necessários para o modelo foram:

$dem_prod_{o,x}$	Indica a quantidade de cada modelo *o* a ser produzida no *mix x*.
$dura_{i,o}$	Indica a duração da tarefa *i* para o produto *o*.
K	À constante K é atribuído o valor de 9999 como uma função *Big-M*, sendo esse valor o número que apresentou uma boa estabilidade nos resultados do modelo matemático.
$lado1_i$	Indica as tarefas *i* realizadas no lado direito.
$lado2_i$	Indica as tarefas *i* realizadas no lado esquerdo.
$mesposto_{i,i_1}$	Indica as tarefas *i* e *i1* que devem ser realizadas no mesmo posto.
M	Também é uma constante de valor aleatório de várias tentativas (peso) que durante os experimentos indicou estabilidade na convergência das respostas computacionais e diminuição do tempo de processamento, M=725.
N	Similar ao valor aleatório com função de *Big-M* para minimizar a diferença entre o tempo do posto e a média dos carregamentos dos postos, adotado N=500.
$posto_ini_{i,p,l}$	Indica a configuração inicial da linha para algumas operações, ou seja, coloca a tarefa *i*, no lado *l* do posto *p*.
$prece_{i,i_1}$	Indica as relações de precedência entre as tarefas *i* e *i1*,
sem_lado_i	Indica as tarefas *i* que podem ser alocadas tanto para operadores do lado esquerdo quanto do lado direito do posto.
V	Valor aleatório que fornece o peso num terceiro grau de importância para avaliar quando há dois operadores num mesmo posto, V=10.
W	Representa o número de postos existentes, no caso igual a 9 postos.

Os índices necessários para o modelo foram:

a	Índice para arranjo da mão de obra.
i	Índice para tarefa *i*, realizada no posto.
l	Índice para definir o lado do posto *l*, onde será executado a operação.
m	Índice para operador *m.*
o	Índice para produto o sendo processado (F, B, C, H e X).
p	Índice para posto *p.*
x	Índice para *mix* de produção a executar em função da demanda.

A seguir são apresentadas as restrições e definições de variáveis que foram necessárias para elaborar o modelo de otimização. As restrições (21) a (25) são relativas às alocações de tarefas a mão de obra. Elas são necessárias para que as tarefas sejam alocadas respeitando as limitações de lado necessário para executar a tarefa, fato vinculado à posição do operador no posto. A inequação (26) define a relação de precedência necessária para respeitar as condições tecnológicas do produto e processo que foram definidas no gráfico de precedência. A equação (27) verifica as operações *i* e i_1 que têm que ser realizadas no mesmo posto, definido pelo parâmetro *Mesposto*. A equação (28) define a variável contínua que indica o tempo total de ocupação do operador m para produzir o produto *o* no posto p .

As restrições (29) a (31) impõem condições temporais a serem respeitadas. Em (29) identifica-se o tempo total de ocupação do operador *m* para produzir o *mix x*, $dur_mo_{m,x}$. Pela equação (29) é garantido que os tempos do *mix*, definido pela demanda, sejam considerados no modelo. Em (30), o maior tempo total de ocupação do operador *m* para produzir o *mix x*, $dur_mo_{m,x}$, restringe o menor valor possível do tempo de ciclo. Já na inequação (31) o tempo de produção de um produto *o* num posto *p* por um determinado operador *m* restringe o valor do tempo de ocupação do posto *p* para produzir o produto *o*. As inequações (32) e (33) restringem o valor da ociosidade.

As inequações (34) e (35) definem a variável $analisa_{i,p,l}$ que tem a função de identificar o grau de modificação que a linha irá sofrer no processo de balanceamento, partindo de uma configuração inicial. A equação (36) define a variável $media_x$. O fator de divisão que aparece na referida equação é devido ao fato de se estar considerando nove postos produtivos. As inequações (37) e (38) representam a variável $dif er_{m,x}$, que assume o valor do módulo entre o limite inferior do tempo médio dos *mix* e a ocupação do operador *m* para produzir o *mix x*.

$$\sum_{p}\sum_{l} aloca_{i,p,l} = 1 \qquad ,\forall\, i \tag{21}$$

$$\sum_{a} aloc_ar_{a} = 1 \tag{22}$$

$$\sum_{m} alocmo_{i,m,p,l} - aloca_{i,p,l} = 0 \qquad ,\forall i,p,l \tag{23}$$

$$alocmo_{i,m,p,l} \leq \sum_{a} aloc_ar_{a} * aloc_pos_{a,m,p,l} \quad ,\forall\, m,i,p,l \tag{24}$$

$$\sum_{m}\sum_{p}\sum_{l} alocmo_{i,m,p,l} = 1 \qquad ,\forall\, i \tag{25}$$

$$\sum_{p}\sum_{l} p * aloca_{i,p,l} \leq \sum_{p}\sum_{l} p * aloca_{i_1,p,l} \qquad ,\forall\, i_1, i \in Prec\,(i_1) \tag{26}$$

$$\sum_{p}\sum_{l} p * aloca_{i,p,l} = \sum_{p}\sum_{l} p * aloca_{i_1,p,l} \qquad ,\forall\, i_1, \qquad i \in Mesposto\,(i_1) \tag{27}$$

$$\sum_{i}\sum_{l} \left(dura_{i,o} *\ alocmo_{m,i,p,l}\right) =\ dur_posto_{o,m,p} \quad \ldots, \forall m,o,p \tag{28}$$

$$\sum_{o}\sum_{p} dem_prod_{o,x}\left(dur_posto_{o,m,p} + diferenc_{o,m,p}\right) = \ dur_mo_{m,x} \qquad ,\forall\, m,x \tag{29}$$

$$dur_mo_{m,x} \leq ciclo_{x} \quad ,\forall\, m,x \tag{30}$$

$$dur_posto_{o,m,p} \leq maior_{pos_{o,p}} \quad ,\forall\, o,m,p \tag{31}$$

$$diferenc_{o,m,p} \geq maior_{pos_{o,p}} - dur_{posto_{o,m,p}} -\ K * \left(1 - \sum_{a} aloc_{ar_{a}} *\ aloc_{pos_{a,m,p,l}}\right), \qquad \forall\, o,m,p, \tag{32}$$

$$diferenc_{o,m,p} \leq maior_{pos_{o,p}} - dur_{posto_{o,m,p}} + K * \left(1 - \ \sum_{a} aloc_{ar_{a}} *\ aloc_{pos_{a,m,p,l}}\right) \quad ,\ \forall\, o,m,p,l \tag{33}$$

$$analisa_{i,p,l} \geq posto_{ini_{i,p,l}} - aloca_{i,p,l} \qquad ,\forall\, i,p,l \mid posto_ini_{i,p,l} = 1 \tag{34}$$

$$analisa_{i,p,l} \geq aloca_{i,p,l} - posto_{ini_{i,p,l}} \quad \forall\, i,p,l \mid posto_ini_{i,p,l} = 1 \tag{35}$$

$$media_x = (\sum_o \sum_l demprod_{o,x} * dura_{l,o})/\mathrm{W} \qquad ,\forall\, x \tag{36}$$

$$difer_{m,x} \geq dur_mo_{m,x} - media_x \quad ,\forall\, m,x \tag{37}$$

$$difer_{m,x} \geq media_x - dur_mo_{m,x} \qquad ,\forall\, m,x \tag{38}$$

A expressão (39) indica a função objetivo do modelo de balanceamento como uma ponderação de importância decrescente de quatro fatores. A primeira parcela da função objetivo (*fator*1), que é o fator mais importante, soma os tempos de ciclo de cada *mix x* ($ciclo_x$), multiplicados pela constante *M*. Esta constante força um peso maior ao fator ciclo. A segunda parcela da expressão (*fator*2) minimiza a diferença entre o tempo do posto e a média dos carregamentos dos postos, com peso *N*. A terceira parcela da expressão (*fator*3) avalia a soma das diferenças na ocupação da mão de obra (quando há dois operadores num mesmo posto), a qual envolve a variável $diferenc_{o,m,p}$. Por fim, a última parcela da expressão (*fator*4), a qual envolve a variável $analisa_{i,p,l}$, minimiza a realocação de tarefas do balanceamento em relação à condição inicial da linha, ou seja, busca-se minimizar os custos envolvidos em realocar tarefas.

$$\begin{aligned}(min)\ z_{bal} = M * \underbrace{\sum_x ciclo_x}_{fator\,1} + N * \underbrace{\sum_x \sum_m difer_{m,x}}_{fator\,2} + \\ + V * \underbrace{\sum_o \sum_m \sum_p diferenc_{o,m,p}}_{fator\,3} + \underbrace{\sum_i \sum_p \sum_l analisa_{i,p,l}}_{fator\,4}\end{aligned} \tag{39}$$

O modelo matemático completo do balanceamento em detalhes, inclusive no formato do ambiente GAMS/CPLEX pode ser verificado em Neut (2013).

4.3 MODELO MILP PARA O SEQUENCIAMENTO

Para a elaboração do modelo foram utilizadas, no total, 14 variáveis, 2 parâmetros e 25 restrições. Os índices principais do modelo são:

k	Índice que identifica uma posição na sequência de produção.
m	Índice que identifica um posto de trabalho.
p	Índice que identifica uma peça, item ou produto.

As únicas variáveis binárias utilizadas para a solução do problema de sequenciamento são:

$ordem_pc_{p,k}$	Variável binária que indica a ordem das peças a entrar na linha de montagem. Será igual a 1 se o produto *p* ocupa a posição *k* da sequência de produção. Caso contrário, esta variável será nula.

Já as principais variáveis contínuas identificadas como necessárias para a solução do problema de sequenciamento foram:

dur_max	Variável que apresenta o valor da duração da ocupação da mão de obra mais carregada, ou seja, no par de postos mais carregado.
$dur_{m,k}$	Variável que indica o tempo de produção no posto *m* do produto que ocupa a posição *k*.
$espera_{m,k}$	Variável que indica a espera no processamento do produto na posição *k* após ele passar pelo posto *m*.
$final_{m,k}$	Variável que identifica o instante de fim do processamento, no posto *m*, do item na posição *k* da sequência de produção.
$inicio_{m,k}$	Variável que identifica o instante de início do processamento, no posto *m*, do item na posição *k* da sequência de produção.
$ociosi_{m,k}$	Variável que indica a ociosidade na ocupação do posto *m* após produzir o produto na posição *k*.
$ocupa_m$	Variável que mede o intervalo de tempo entre o fim do processamento do último produto (do *mix*) em *m=2* e o início do processamento do primeiro produto em *m=1*. E por fim os parâmetros *soma* e *transporte*.

Os principais parâmetros necessários para a solução do problema de sequenciamento foram:

BigM	Uma constante auxiliar para formulação de restrições; para esse problema foi adotado o valor de 10E7.
dem_prod_p	Parâmetro que identifica a demanda do produto *p* neste *mix* de produção, indicando o número de posições onde $ordem_pc_{p,k} = 1$
transporte	Variável que define o tempo de transporte entre dois postos vizinhos
$TP_{m,p}$	Valor do tempo de processamento do produto *p* no posto *m*

A equação da função objetivo que apresentou melhores resultados é definida como a ponderação de dois critérios, conforme ilustrado na equação (40). O primeiro critério ou objetivo é a minimização da duração (tempo total de ocupação) da mão de obra mais carregada (alocada sempre a dois postos neste problema). Esta parcela é a principal em termos de importância, e por isso é atribuído um peso com a multiplicação de um fator *BigM*. O segundo critério, é a soma dos tempos de ocupação de todos os postos de trabalho, onde $ocupa_m$ identifica o tempo de ocupação do posto *m.* A alocação dos produtos às posições da sequência de produção é controlada pelas restrições das expressões (41) a (52).

$$(min)\ z_{seq} = BigM * dur_\max + \sum_{m} ocupa_m \qquad (40)$$

A equação (41) é constituída pela variável binária $ordem_pc_{p,k}$ que será igual a 1 se o produto *p* ocupa a posição *k* da sequência de produção. Caso contrário, esta variável será nula. A equação é constituída pelos índices *p* que identificam uma peça, item ou produto e *k* que identifica uma posição na sequência de produção. Esta restrição será gerada para todo produto *p*, onde há um somatório de todas as posições *k* que podem ser ocupadas pelo produto *p*. O parâmetro dem_prod_p identifica a demanda do produto *p* neste *mix* de produção, indicando o número de posições onde $ordem_pc_{p,k} = 1$. Também haverá uma expressão (ou restrição) escrita para cada posição *k*. O significado desta restrição é que toda posição *k* deve ser ocupada por algum produto.

$$\sum_{k} ordem_pc_{p,k} = dem_prod_p \qquad ,\forall p \qquad (41)$$

As equações (42) a (48) são responsáveis pelo controle da sequência de produção. As expressões representadas nas inequações (42) e (44) fazem o controle das sequências de produção como uma restrição e representam uma situação particular da linha de produção estudada. Lembrando que a linha estudada tem três alimentações em seu início, referentes aos três produtos distintos que ingressam na linha, há um limite para o número de veículos similares que entram em sequência na linha. Essa restrição está associada a problemas de capacidade dos processos anteriores e ou a informações de restrições de fornecimentos da cadeia de fornecedores, bem como alguma restrição nos processos sucessivos como pintura e montagem. Por isso, foram propostas as restrições (42) e (44) que impõem que, o produto *X* e o produto *H*, para cada seis veículos produzidos (da posição *k* até a posição *k+5*), no máximo três podem ser *X* ou *H*.

$$\sum_{p \in\ prod_1} \sum_{\substack{k1 \\ k \le k1 \le k+5}} ordem_pc_{p,k} \le 3 \qquad ,\forall k \le K-5 \tag{42}$$

A restrição (45) também pode ser representada como indicado em (46), definindo-se $p = X$:

$$\begin{aligned} &ordem_pc_{X,k} + ordem_pc_{X,k+1} + ordem_pc_{X,k+2} + \\ &\quad ordem_pc_{X,k+3} + ordem_pc_{X,k+4} + ordem_pc_{X,k+5} \le 3 \qquad ,\forall k \le K-5 \end{aligned} \tag{43}$$

onde, $prod_1$ representa um agrupamento de produtos do modelo X : $prod_1 = \{X\}$.

Já a inequação (44) a seguir restringe o produto H.

$$\sum_{p \in\ prod_2} \sum_{\substack{k1 \\ k \le k1 \le k+5}} ordem_pc_{p,k} \le 3 \qquad ,\forall k \le K-5 \tag{44}$$

onde, $prod_2$ representa um agrupamento de produtos do modelo H: $prod_2 = \{H\}$

As duas restrições, (45) e (47), serão geradas para toda posição *k*, desde que $k \le K\text{-}5$. É uma restrição particular desse problema. Estas restrições limitam o número máximo de veículos produzidos próximos (ou seja, a cada seis veículos). As restrições (45), (47) e (48) complementam as restrições (42) e (44), impondo que, para os três tipos de produtos, para cada seis veículos produzidos, ao menos um veículo será de um dos três tipos.

$$\sum_{p \in\ prod_1} \sum_{\substack{k1 \\ k \le k1 \le k+5}} ordem_pc_{p,k} \ge 1 \quad ,\forall k \le K-5 \tag{45}$$

A restrição (48) também pode ser representada como indicado em (49), definindo -se $p = X$:

$$\begin{aligned} &ordem_pc_{X,k} + ordem_pc_{X,k+1} + ordem_pc_{X,k+2} + \\ &\quad ordem_pc_{X,k+3} + ordem_pc_{X,k+4} + ordem_pc_{X,k+5} \ge 1 \quad ,\forall k \le K-5 \end{aligned} \tag{46}$$

$$\sum_{p \in\ prod_2} \sum_{\substack{k1 \\ k \le k1 \le k+5}} ordem_pc_{p,k} \ge 1 \qquad ,\forall k \le K-5 \tag{47}$$

Esta inequação (47) impõe que pelo menos um produto entre os três será do tipo H. A inequação (48) impõe que pelo menos um produto entre os três será do tipo F, B ou C.

$$\sum_{p \in prod_3} \sum_{\substack{k1 \\ k \le k1 \le k+5}} ordem_pc_{p,k} \ge 1 \qquad ,\forall k \le K-5 \tag{48}$$

onde, $prod_3$ representa um agrupamento de produtos do tipo F, B ou C: $prod_3 = \{F, B \text{ e } C\}$

A equação (49) define o tempo de processamento do produto que ocupará a posição *k* (da sequência) no posto *m*. Esta equação é necessária porque o tempo de processamento de cada produto em cada posto é conhecido, mas quais serão as posições ocupadas por um produto não. Assim, precisamos saber qual é o produto *p* que ocupará a posição *k* (definido por: $ordem_pc_{p,k} = 1$) para definir a variável $dur_{m,k}$.

$$dur_{m,k} = \sum_{p \mid TP_{m,p} > 0} \left(TP_{m,p} + transporte\right) * ordem_pc_{p,k} \qquad ,\forall m,k \tag{49}$$

Portanto a $dur_{m,k}$ identifica o tempo de processamento, no posto *m*, do item na posição *k* da sequência de produção. Também foi somado o tempo de transporte, dado pelo parâmetro *transporte*, no valor desta variável que define o tempo de transporte entre dois postos vizinhos, porém, só se o valor do tempo de processamento do produto *p* no posto *m* ($TP_{m,p}$) for maior que zero. Também há um teste na expressão do somatório. O teste consiste em verificar se, para um dado produto *p*, $TP_{m,p} > 0$. Ou seja, se $ordem_pc_{p,k} = 1$ e $TP_{m,p} > 0$, para um produto *p* na posição *k*, então $dur_{m,k} = TP_{m,p} + transporte$. Mas, se $ordem_pc_{p,k} = 1$ e $TP_{m,p} = 0$, então o valor de $dur_{m,k}$ será nulo.

A equação (50), é constituída pela variável $ociosi_{m,k}$, que indica a ociosidade na ocupação do posto *m* após produzir o produto na posição *k*, pela variável $espera_{m,k}$, que indica a espera no processamento do produto na posição *k* após ele passar pelo posto *m*, e pela variável $dur_{m,k}$, variável que indica o tempo de produção no posto *m* do produto que ocupa a posição *k* .

$$ociosi_{m,k} + dur_{m,k+1} + espera_{m,k+1} = espera_{m,k} + dur_{m+1,k} + ociosi_{m+1,k}$$
$$\forall m = 1,\ldots,M\text{-}1; k = 1,\ldots,K-1 \tag{50}$$

A explicação desta equação é melhor compreendida se observarmos a Figura 34. As variáveis $ociosi_{m,k}$ (identificada por $empty_{m,k}$ na figura 35) e $espera_{m,k}$ (identificada por $wait_{m,k}$ na figura 35) são equivalentes, respectivamente. Um ponto bastante importante é relacionar as variáveis $ociosi_{m,k}$ e $espera_{m,k}$ com a variável $ordem_pc_{p,k}$. A Figura 35 mostra um exemplo de uma transição entre peças (produtos) em uma máquina e de uma peça entre máquinas, auxiliando na formulação da expressão que define a relação entre as variáveis. Segundo Guéret *et al.* (2000), a relação entre as variáveis $ociosi_{m,k}$ ($empty_{m,k}$) e $espera_{m,k}$ ($wait_{m,k}$) com a variável $ordem_pc_{p,k}$ pode, então, ser escrita como na equação (50).

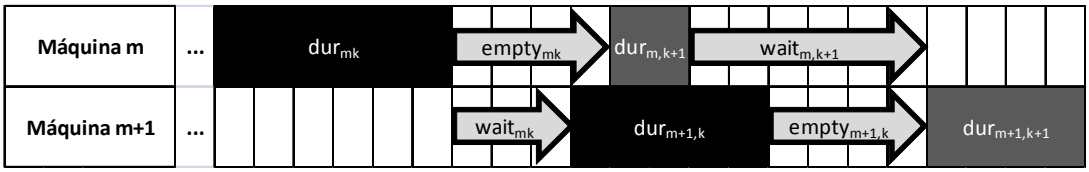


Figura 34 - Representação das variáveis ociosidades e esperas (GUÉRET *et al.*, 2000).

A equação (51) trata de uma restrição que impõe que o início do processamento do produto que ocupa a posição *k* no posto *m+1* ocorrerá no instante de fim do processamento deste mesmo produto no posto anterior ($inicio_{m,k} + dur_{m,k}$) somado ao tempo de espera ($espera_{m,k}$) entre o fim do processamento no posto *m* e o início do processamento no posto *m+1*.

$$inicio_{m+1,k} = inicio_{m,k} + dur_{m,k} + espera_{m,k} \qquad ,\forall m < M, k \tag{51}$$

A equação (52) é uma restrição que impõe que o início do processamento do produto que ocupa a posição *k*+1 no posto *m* ocorrerá no instante de fim do processamento do produto anterior neste posto ($inicio_{m,k} + dur_{m,k}$) somado à ociosidade ($ociosi_{m,k}$) entre o fim do processamento do produto na posição *k* e o início do processamento do produto na posição *k*+1.

$$inicio_{m,k+1} = inicio_{m,k} + dur_{m,k} + ociosi_{m,k} \qquad ,\forall m,k < K \tag{52}$$

As inequações (53) a (55) colocam restrições de *buffers.* A restrição (53) foi escrita apenas para o primeiro posto (*m*=1). Esta restrição impõe um *buffer* de uma peça entre o segundo posto e o primeiro posto. Note que, se o início do processamento do produto que ocupa a posição *k-2* no posto *m+1* é menor ou igual ao início do processamento do produto que ocupa a posição *k* no posto *m*,

então o produto na posição *k-1* ainda pode estar sendo processado no posto *m* quando o processamento do produto que ocupa a posição *k-2* no posto *m+1* é iniciado. Mas, isso só será possível se o produto que ocupa a posição *k-2* no posto *m* está num *buffer*. A vantagem desta restrição é que não foi preciso criar uma variável para o(s) *buffer*(*s*).

$$inicio_{m+1,k-2} \leq inicio_{m,k} \qquad ,\forall m = 1, k > 2 \tag{53}$$

A inequação (53) tem duas opções de uso: (54) ou (55). A inequação (54) é aplicada para todos os demais postos. Isso foi feito quando se considera que há *buffers* entre estes postos.

$$inicio_{m+1,k-2} \leq inicio_{m,k} \qquad ,\forall m < M, k > 2 \tag{54}$$

Já a inequação (55) pode ser uma opção se for considerar que os demais postos não têm *buffers* entre eles.

$$inicio_{m+1,k-1} \leq inicio_{m,k} \qquad , \forall\ m<M,\ k>1 \tag{55}$$

As inequações (56) e (57), são usadas quando os dois postos ocupados pela mesma mão de obra têm, pelo menos, algum $dur_{m,k} > 0$. A expressão (56) é uma restrição necessária sempre que os dois postos ocupados pela mesma mão de obra têm algum $dur_{m,k} > 0$. Neste caso, os postos 2 (que corresponde a *m*=3) e 3 (que corresponde a *m*=4) têm ambos algum $dur_{m,k} > 0$. O que esta restrição faz é impor que o fim do processamento da operação na posição *k* no posto *m+1* ($inicio_{m+1,k} + dur_{m+1,k}$) seja menor ou igual ao início do processamento da operação na posição *k+1* no posto *m* ($inicio_{m,k+1}$), onde *m* = 3 (posto 2 do caso). Esta restrição é fundamental, já que a mão de obra só pode ocupar um posto por vez (ou *m* ou *m+1*).

$$inicio_{m+1,k} + dur_{m+1,k} \leq inicio_{m,k+1} \qquad ,\forall m = 3, k < K \tag{56}$$

A inequação (57) é outra restrição específica do problema onde os postos 4 (que corresponde a *m*=5) e 5 do problema (que corresponde a *m*=6) têm ambos algum $dur_{m,k} > 0$. O que esta restrição faz é impor que o fim do processamento da operação na posição *k* no posto *m+1*

($inicio_{m+1,k} + dur_{m+1,k}$) seja menor ou igual ao início do processamento da operação na posição *k+1* no posto *m* ($inicio_{m,k+1}$), onde *m* = 5 (posto 4 no problema).

$$inicio_{m+1,k} + dur_{m+1,k} \leq inicio_{m,k+1} \qquad ,\forall m = 5, k < K \tag{57}$$

A restrição da equação $final_{m,k}$ (58) foi adicionada apenas para facilitar a visualização do instante final do processamento do produto que ocupa a posição *k* da sequência de produção no posto *m*.

$$final_{m,k} = inicio_{m,k} + dur_{m,k} \qquad ,\forall m, k \tag{58}$$

A restrição da inequação (59) permite definir a variável *dur_max*, usada na função objetivo. Esta restrição é gerada para todo posto *m*. Logo, esta restrição impõe que *dur_max* seja maior ou igual ao tempo total de ocupação da mão de obra em qualquer posto *m*. Como *dur_max* é usado como critério principal na função objetivo, esta variável assumirá o menor valor possível, pressionando a variável $ocupa_m$ a também assumir seu menor valor (que não altere *dur_max*). Esta variável identifica o tempo total de ocupação da mão de obra no posto *m*. Seu valor é definido pelas restrições das equações (60) a (64). Basicamente, analisa-se a ocupação da mão de obra associada a cada par de postos.

$$dur_\max \geq ocupa_m \qquad ,\forall m \tag{59}$$

$$ocupa_m = \sum_{k=K} \left(inicio_{2,k} + dur_{2,k}\right) - inicio_{1,1} \qquad ,\forall\ 1 \leq m \leq 2 \tag{60}$$

A equação (60) define o valor da variável $ocupa_m$ para *m*=1 (posto *pb)* no problema e para *m*=2 (posto *1* no problema). Nesta restrição, a posição *k=K* representa a última posição da sequência de produção. Então, $ocupa_m$ mede o intervalo de tempo entre o fim do processamento do último produto (do *mix*) em *m=2* e o início do processamento do primeiro produto em *m=1*. Como a mão de obra nestes dois postos é a mesma, o valor de $ocupa_m$ será o mesmo, refletindo o uso da mão de obra e não o quanto o posto foi usado.

$$ocupa_m = \sum_{k=K} \left(inicio_{4,k} + dur_{4,k} \right) - inicio_{3,1} \qquad ,\forall\ 3 \le m \le 4 \tag{61}$$

A restrição (61) define o valor da variável $ocupa_m$ para $m=3$ (posto *2* no problema) e para $m=4$ (posto *3* no problema). A explicação é a mesma apresentada na restrição (60) e se repete até a expressão (64), apenas com as correções dos índices de posto.

$$ocupa_m = \sum_{k=K} \left(inicio_{6,k} + dur_{6,k} \right) - inicio_{5,1} \qquad ,\forall\ 5 \le m \le 6 \tag{62}$$

$$ocupa_m = \sum_{k=K} \left(inicio_{8,k} + dur_{8,k} \right) - inicio_{7,1} \qquad ,\forall\ 7 \le m \le 8 \tag{63}$$

$$ocupa_m = \sum_{k=K} \left(inicio_{10,k} + dur_{10,k} \right) - inicio_{9,1} \qquad ,\forall\ 9 \le m \le 10 \tag{64}$$

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram descritas as principais etapas de elaboração do trabalho bem como as simplificações e a metodologia adotada. Adicionalmente, foram apresentados os dois modelos matemáticos empregados na solução da questão da produtividade em linhas mista através da otimização do balanceamento e do sequenciamento. No capítulo a seguir serão relatados os principais resultados da aplicação da otimização na linha de montagem monofluxo com produtos mistos e a verificação através da simulação discreta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, são apresentados os resultados dos experimentos realizados e uma análise do quanto e como ocorrem as perdas que interferem na taxa de produção. As principais questões a avaliar são: (i) o tempo de transporte; (ii) a influência do *buffer*; e, (iii) a variação da demanda, a qual impacta na variação do *mix* produtivo. A discussão de resultados evidencia, nos casos estudados, em quais condições otimizadas de operação da linha mista tem-se o mínimo de recursos para atender uma taxa de produção. As respostas obtidas possibilitaram avaliar condições otimizadas de operação da linha em estudo.

5.1 DADOS DE DESEMPENHO DO EXPERIMENTO

Apenas para fornecer um referencial de ordem de grandeza para comparação com outros estudos de solução exata, na Tabela 8 são descritas algumas características como número de tarefas, número de produtos, número de postos e tempo de execução do programa até a convergência para a o ponto de ótimo. Os parâmetros ilustram o desempenho do modelo matemático aplicado no problema. O número de tarefas é um dos fatores que mais afeta o tamanho do problema e, no caso em estudo, o esforço computacional. Geralmente, numa linha de produto de modelo misto, o número de tarefas será maior que o número de produtos. Uma tabela completa dos tempos das tarefas para cada modelo pode ser verificada no Apêndice C.

As execuções do modelo matemático foram realizadas em um computador pessoal, com Processador Intel® Core ™ i5-3337U CPU @ 1.80GHz, Memória instalada (RAM) de 8,00 GB e Sistema Operacional de 64 bits Microsoft Windows 8. A versão do ambiente de modelagem e otimização utilizado foi o GAMS ® 23.5.2 x86/MS Windows, CPLEX 12.2.0.0.

Tabela 8- Referência de tempo de execução dos modelos matemáticos em MILP

Modelo Matemático MILP	Número de tarefas	Número de Produtos	Número de Postos	Tempo de Execução (hora:min:seg)
Balanceamento	57	5	9	00:03:10
Sequenciamento sem *Buffer*	57	5	9	00:00:02
Sequenciamento com *Buffer*	57	5	6	00:00:01

5.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO

No desenvolvimento da otimização do sequenciamento, através do modelo MILP para definir a melhor sequência de produção, foram realizados 85 testes, nominados Teste#1 a Teste#85. No Apêndice C encontra-se a tabela completa com informações acerca dos parâmetros utilizados e resultados obtidos nos experimentos efetuados. Esses testes foram aplicados com o intuito de obter a sequência de produção que apresentava o menor tempo WS, quando realizada análise para os seis *mixes* das demandas do estudo, *mixes* estes dados Tabela 7 (seção 3.4). Salienta-se que estes testes serviram de base para melhor entender o problema em análise e aprimorar características de modelagem como a inclusão de tempos de transporte e existência de *buffer*, conforme salientado nas seções seguintes. Assim, os fatores analisados nos experimentos foram: a influência do transporte no tempo total WS (equivalente à variável *dur_max*), a alocação de *buffer*, e a sensibilidade do balanceamento pelo impacto da variação *mix* de produtos.

Para fins didáticos, a Figura 35 a seguir ilustra os campos principais da tabela completa de experimentos do Apêndice B. A primeira coluna da tabela referencia o teste realizado. A segunda, informa o balanceamento utilizado e a demanda do *mix* avaliado, além de informações de com (t=0,25) ou sem (t=0) tempo de transporte ou com (c_bf) ou sem (s_bf) *buffer*. As colunas seguintes são compostas da sequência sugerida pelo modelo de sequenciamento, começando com o número um (primeiro carro sequenciado) e avançando até a posição 14, que é a referência utilizada no estudo para o número de veículos em, aproximadamente, uma hora de produção. A coluna após o décimo quarto produto da sequência será a indicação do tempo WS (tempo de execução do lote dos 14 veículos, referente à variável *dur_max*), em minutos. A próxima coluna em análise é denominada “Desvio” e calculada em relação ao menor valor de tempo WS obtido nos testes realizados, no caso, para o Teste#71, WS=61,08 min. Em outras tabelas apresentadas ao longo do capítulo (por exemplo, Tabela 9, Tabela 10), nas colunas seguintes ao tempo WS poderá haver variações dos fatores a observar, podendo ser os índices D1, D2 ou *Buffer*. O índice D1 indica a diferença em % do tempo WS obtido no experimento em relação ao Teste#71, que apresentou a solução com menor WS, conforme Figura 36. O índice D2, é uma indicação da diferença em % entre um balanceamento de um determinado *mix* para as demandas dos *mix*1 ao *mix*6, ou seja, é uma comparação entre as variações de demandas apenas para um mesmo balanceamento. Ressalta-se que, num primeiro momento, não há uma comparação direta dos resultados D1 e D2, apenas um referencial de valores do tempo WS para aferição da equação da função objetivo ao longo do desenvolvimento do trabalho. Comparação posteriores foram realizadas, mas dentro das particularidades adequadamente consideradas.

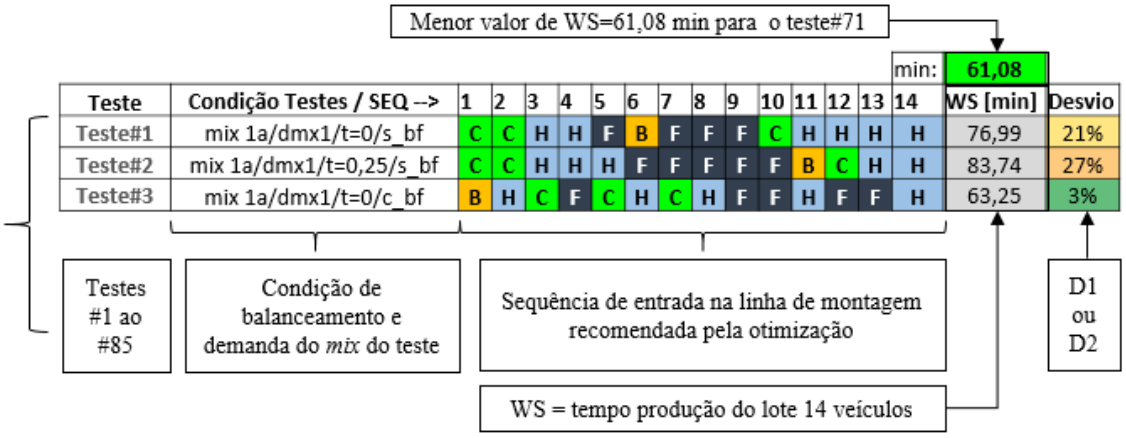


Figura 35 – Detalhe da tabela experimentos

5.3 ANÁLISE DO TEMPO DE TRANSPORTE

Em relação ao tempo de transporte, foi realizada uma avaliação com e sem este tempo no modelo matemático para mensurar as diferenças de produção (tempo WS) do lote de quatorze veículos, com a demanda do *mix* 1, conforme resultados da Tabela 9. Nessa tabela isolou-se duas situações de balanceamento para uma mesma demanda. As duas primeiras execuções, Teste#1 e Teste#2, usam os tempos do balanceamento do *mix*1 com a demandas do *mix* 1 comparando com e sem tempo de transporte. Já o Teste#5 e o Teste#6 avaliam o balanceamento de um "*mix* 123" (vide explicação dada após Tabela 7, seção 3.4) com a demanda do *mix* 1. Essa avaliação foi realizada para ilustrar que o 0,25 min de transporte entre os postos pode gerar uma perda, no final, de cerca de 9% (11% - 2%) do tempo total WS da produção, para uma mesma sequência observada, independente do balanceamento.

Como exemplo, foi descrita a diferença do tempo WS na Tabela 9. No primeiro caso, com transporte com valor zero, a sequência de produtos é conforme indicada na tabela e resulta num tempo WS, para esse *mix*, de 76,99 min. Já para o segundo teste, incluindo o tempo de transporte, a sequência sugerida foi outra, para um mesmo *mix.* A partir da quinta posição houve alterações de sequência, gerando um tempo de 83,74 min. Matematicamente, o tempo de transporte está condicionado a ocorrer somente com a liberação de posição nos postos seguintes. O que sugere que pode haver um aumento significativo do tempo WS em função dessa restrição, fato que coincide com a situação real de operação. Essa é uma questão que pode ser melhor explorada em termos práticos para esse tipo de produção por linha mista não sincronizada. No momento do transporte, algumas

operações podem ser realizadas em simultâneo pelo operador, possibilitando aumentar a utilização do tempo da pessoa em alguma tarefa, por exemplo, de preparação.

Tabela 9 – Avaliação do tempo transporte *(sem buffer)*

Testes	**Bal/*mix***	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**WS [min]**	**D2**	***Transp.***
Teste#1	*b mix 1/d mix1*	C	C	H	H	F	B	F	F	F	F	C	H	H	H	76,99	2%	0
Teste#2	*b mix 1/d mix1*	C	C	H	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	83,74	11%	0,25
Teste#5	*b123/dmx1*	C	C	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	H	75,72	0%	0
Teste#6	*b123/dmx1*	C	C	H	H	F	F	B	F	F	F	C	H	H	H	82,72	9%	0,25

5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS *BUFFERS*

Na avaliação da influência de *buffer* foi considerado que a parte inicial da linha, conforme Tabela 10(seção 3.2), trabalha sem utilizar *buffer* entre os postos. No trabalho de balanceamento de Neut (2013) sugere-se uma alocação otimizada dos operadores para melhorar o balanceamento. O autor também sugeriu a necessidade da existência de *buffer* na entrada da linha de, no mínimo, dois produtos do tipo F, B, ou C para aproveitar o máximo do rendimento indicado no balanceamento para os nove postos ativos.

Tabela 10 – Ilustração do efeito do *buffer* entre postos na redução do tempo WS.

Testes	**Condição Teste /SEQ ->**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**WS [min]**	**Redu-ção**
Teste#9	bal mix123/dmx2/s_buff	C	X	B	H	C	X	F	H	H	H	C	X	F	H	108,96	12%
Teste#10	bal mix123/dmx2/c_buff	B	F	H	H	C	F	X	H	H	X	C	X	H	C	95,90	
Teste#11	bal mix123/dmx3/s_buff	C	X	F	H	B	H	B	H	C	X	F	H	F	H	118,01	8%
Teste#12	bal mix123/dmx3/c_buff	B	B	H	H	F	F	X	C	X	H	F	H	H	C	108,37	
Teste#13	bal mix123/dmx3/s_buff	H	H	H	C	F	F	F	B	B	C	H	H	X	X	105,95	22%
Teste#14	bal mix123/dmx3/c_buff	B	X	H	B	H	C	F	F	H	F	H	C	X	H	82,59	
Teste#15	bal mix123/dmx4/s_buff	H	H	H	C	F	F	F	B	H	H	H	X	X	X	110,55	38%
Teste#16	bal mix123/dmx4/c_buff	H	F	H	C	H	F	X	X	H	F	X	H	B	H	68,87	
Teste#17	bal mix123/dmx5/s_buff	H	H	F	F	F	B	F	B	C	H	H	H	X	X	85,97	14%
Teste#18	bal mix123/dmx5/c_buff	X	X	H	F	F	H	B	C	H	F	H	F	B	H	73,87	
Teste#55	bal mix 2/dmx2/s_buff	F	B	F	H	H	C	H	C	H	C	H	X	X	X	81,95	25%
Teste#57	bal mix 2/dmx2/c_buff	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	
																μ	20%

Já para o sequenciamento, o modelo proposto indicou que a alocação de *buffer* entre os postos melhora a produtividade, com a redução no tempo WS, conforme Tabela 10. Para uma mesma demanda, a existência do *buffer* entre os postos permitiu uma absorção das variações entre os tempos dos diferentes produtos e reduziu o tempo WS, na média (**μ**), em 20%. Por exemplo, comparando-se

o tempo WS dos experimentos Teste#13 com Teste#14, os quais possuem a mesma demanda, a existência do *buffer* indica uma redução do tempo WS de 22%, passando de 105,95 min para 82,59 min. Para viabilizar esta redução temporal, sugere-se uma sequência produtiva que melhor utiliza o recurso da existência de um *buffer* entre os postos.

As comparações de com e sem *buffer* ocorreram para várias demandas (*mix*es diferentes), que indicaram reduções do tempo WS, conforme ilustrado na Tabela 10. Na Figura 36 foram ilustrados os resultados dos 85 experimentos realizados. Para cada experimento são indicados os valores dos tempos de produção dos Teste#1 ao Teste#85 (Apêndice C). No eixo das ordenadas, do lado esquerdo, é indicado o tempo WS para os 14 veículos da sequência avaliada, em minutos; na ordenada do lado direito há a indicação das diferenças de tempo WS, em percentual. Estes valores de desvio foram calculados em relação ao menor tempo WS obtido (Teste#71), com a demanda do *mix* 4, quando comparado no total dos 85 testes. De fato, a Figura 36 ilustra um histórico dos vários experimentos realizados, onde os primeiros testes foram realizados para calibração do modelo, que foi sendo modificado para aperfeiçoar tanto a função objetivo, quanto as restrições. Alguns exemplos de evoluções ocorridas são as que incluíram considerações de sem/com transporte, sem/com *buffer* e balanceamentos sujeitos a diferentes demandas de entrada, conforme explicação detalhada na sequência.

Há duas regiões destacadas com retângulos na Figura 36. A primeira região corresponde do Teste#1 ao Teste#8, realizados para avaliar a influência do tempo de transporte, conforme descrito na seção 5.3. A segunda região tratou da questão de inclusão ou não de *buffer* entre os postos (seção 5.4). Conforme as evoluções dos resultados observados, vários experimentos foram conduzidos do Teste#09 ao Teste#28. Observa-se também na Figura 36 que a partir do Teste#30 foi incluído em definitivo a presença do *buffer* no modelo matemático, salvo o Teste#55, onde foi retirado do modelo o *buffer* para experimento pontual. No Teste#56 foi restaurada a condição com *buffer* para um mesmo balanceamento e mesma demanda, confirmando o efeito de redução do tempo WS, pela adição de *buffer.*

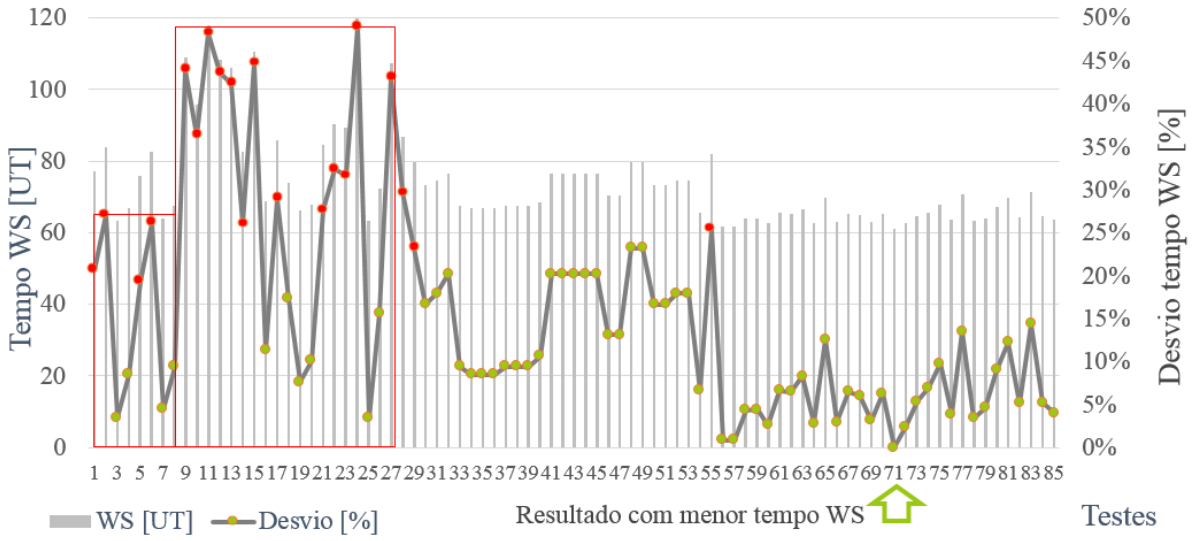


Figura 36 – Gráfico do comportamento do histórico de experimentos realizados

Além da redução do tempo WS observada na Figura 36, é possível notar que a existência do *buffer* entre os postos permite uma diminuição da ociosidade no processo, fazendo com que o balanceamento seja mais "tolerante às variações de demanda", conforme comparação da Tabela 11 com a Tabela 12, a seguir apresentadas.

Tabela 11 – Sequências mais rígidas pela ausência de *buffer*

Testes	Condição Teste / SEQ ->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	WS [min]
Teste#1	mix 1a/dmx1/trans=0/s_buff	C	C	H	H	F	B	F	F	F	F	C	H	H	H	76,99
Teste#2	mix 1a/dmx1/trans=0,25/s_buff	C	C	H	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	83,74
Teste#5	mix 123a/dmx1/trans=0/s_buff	C	C	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	H	75,72
Teste#6	mix 123a/dmx1/trans=0,25/s_buff	C	C	H	H	F	F	B	F	F	F	C	H	H	H	82,72
Teste#9	mix 123a/dmx2/trans=0,25/s_buff	C	X	B	H	C	X	F	H	H	H	C	X	F	H	108,96
Teste#11	mix 123a/dmx3/trans=0,25/s_buff	C	X	F	H	B	H	B	H	C	X	F	H	F	H	118,01
Teste#13	mix 123a/dmx3/trans=0,25/s_buff	H	H	H	C	F	F	F	B	B	C	H	H	X	X	105,95
Teste#15	mix 123a/dmx4/trans=0,25/s_buff	H	H	H	C	F	F	F	B	H	H	H	X	X	X	110,55
Teste#17	mix 123a/dmx5/trans=0,25/s_buff	H	H	F	F	F	B	F	B	C	H	H	H	X	X	85,97

Na Tabela 11, é ilustrado que, com a ausência de *buffers*, as sequências de produtos são sugeridas de uma forma "mais rígida", em relação à Tabela 12, quase como uma produção por lote em que o objetivo é fazer todos os modelos de um produto e depois outro modelo, permitindo poucas alternâncias de sequência. Já no caso da Tabela 12, com a presença de *buffers*, é possível observar no sequenciamento obtido uma maior alternância, que evidencia uma flexibilidade maior na programação, de forma a melhor nivelar a produção. Essa capacidade de absorver variações de alguns

mixes, concedeu ao balanceamento uma certa "flexibilidade", diminuindo-se, caso a caso, o tempo WS.

Tabela 12 – Sequências mais flexíveis com presença de *buffer* entre postos.

Testes	Condição Teste /SEQ ->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	WS [min]
Teste#3	mix 1a/dmx1/trans=0/c_buff	B	H	C	F	C	H	C	H	F	F	H	F	F	H	63,25
Teste#4	mix 1a/dmx1/trans=0,25/c_buff	F	H	F	C	C	H	F	H	H	H	H	B	C	H	66,75
Teste#7	mix 123a/dmx1/trans=0/c_buff	F	H	F	F	H	C	H	F	F	C	H	B	C	H	63,95
Teste#8	mix 1a/dmx1/trans=0,25/c_buff	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45
Teste#10	mix 123a/dmx2/trans=0,25/c_buff	B	F	H	H	C	F	X	H	H	X	C	X	H	C	95,90
Teste#12	mix 123a/dmx3/trans=0,25/c_buff	B	B	H	H	F	F	X	C	X	H	F	H	H	C	108,37
Teste#14	mix 123a/dmx3/trans=0,25/c_buff	B	X	H	B	H	C	F	F	H	F	H	C	X	H	82,59
Teste#16	mix 123a/dmx4/trans=0,25/c_buff	H	F	H	C	H	F	X	X	H	F	X	H	B	H	68,87
Teste#18	mix 123a/dmx5/trans=0,25/c_buff	X	X	H	F	F	H	B	C	H	F	H	F	B	H	73,87

A redução de 20%, em média, no tempo WS de produção obtida pela adoção de *buffers* para um mesmo *mix*, ilustrada na Tabela 10, foi um importante fator observado, que influi diretamente na produtividade da linha do tipo monofluxo para produtos mistos. Como previsto em Scholl (1999), Askin e Standridge (1993), a existência do *buffer* entre os postos permite um "auto ajuste" do sistema fazendo com que o balanceamento seja mais tolerante às variações de demanda, fator importante na produtividade das linhas do tipo MALBP. A localização dos postos pulmões (*buffers*), testada em sucessivas execuções do modelo de otimização, é ilustrada na Figura 37.

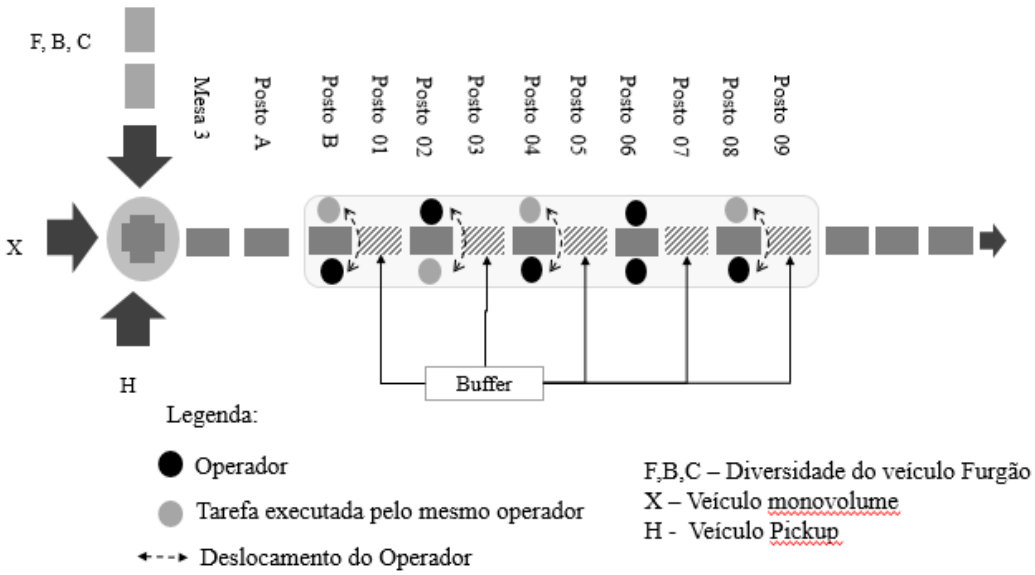


Figura 37 - Resultado de alocação dos postos para otimização do sequenciamento

5.5 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO *MIX*

A presente seção tem o objetivo de evidenciar de forma mais detalhada a influência da composição do *mix* produtivo, seja na fase de balanceamento ou sequenciamento, nas variações do tempo WS, conforme ilustrado na Figura 38. Para isto, tomaram-se nos testes os parâmetros das seis demandas indicadas na Tabela 7. Ressalta-se, que as avaliações a partir do Teste#30 levam em conta a existência de *buffer* entre os postos e o tempo de transporte de 0,25 minuto (15 segundos).

Na Figura 38 é possível observar que o *mix*1 é carregado com o segundo produto de tempo de operação maior (F) e não possui o produto de menor tempo de operação (X), o qual permitiria, em tese, uma redução na média ponderada dos tempos. O *mix*1 é o que apresenta as maiores oscilações de tempo em relação à solução de referência, Teste#71. Todas as comparações da Figura 38 são, de fato, em relação ao WS do Teste#71, que apresentou o menor valor temporal. Cada *mix* apresenta um WS distinto, em função das variações nas demandas dos produtos. Logo, o Teste#71 é tomado como um referencial, mas não como a melhor solução, já que isso dependerá das demandas dos produtos, ou seja, do *mix* adotado.

Também na Figura 38, os quadros retangulares ilustram o agrupamento dos *mixes* que influenciam no tempo total. Conforme aumenta a quantidade do produto F ou B, de maiores tempos de operação, maior é a variação de WS na série e vice-versa. Das variações de *mix* indicadas nos agrupamentos da figura, o *mix* 2 e o *mix* 4 apresentam os menores tempos médios de produção WS.

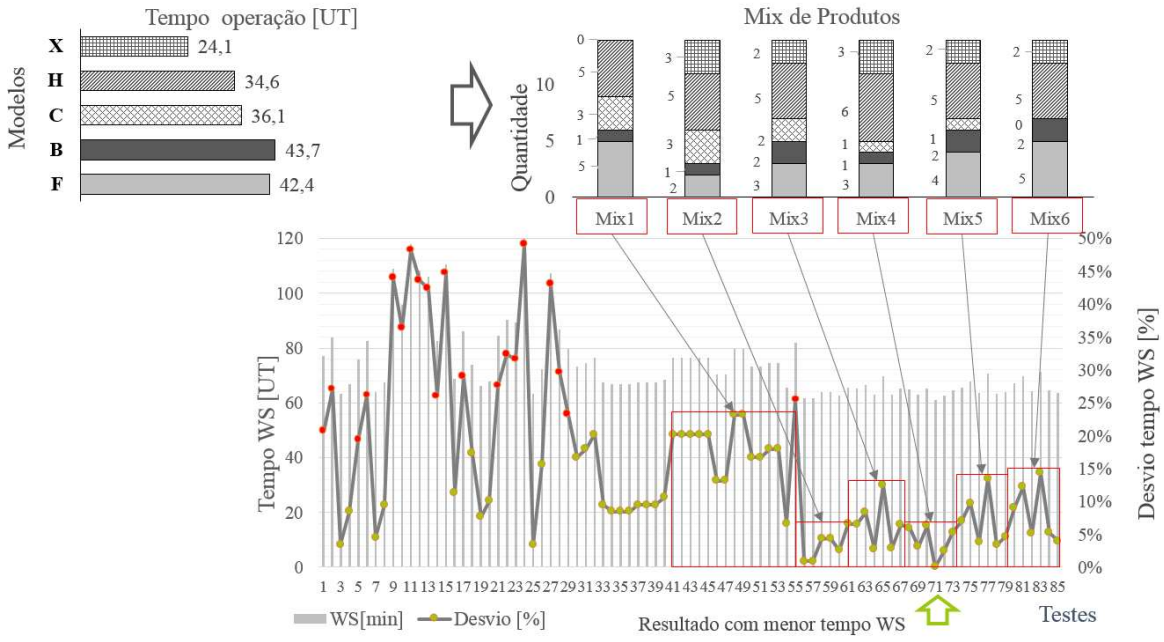


Figura 38 – Efeito do *mix* de produção no sequenciamento

5.5.1 BALANCEAMENTOS DIFERENTES SUJEITOS A MESMA DEMANDA

O objetivo da avaliação apresentada da Tabela 13 à Tabela 18 é ilustrar a influência do balanceamento realizado para determinação do tempo WS em demandas orientadas por diferentes *mixes* a serem produzidos. Em termos operacionais, normalmente, a linha é balanceada e, ao longo do tempo, diferentes *mixes* de produção podem ocorrer sob a mesma condição de balanceamento. O experimento busca evidenciar que a adoção de um balanceamento otimizado, numa condição de *buffer* adequado, pode também trazer uma certa flexibilidade para a produção de diferentes *mixes* na linha, sem impactar muito a taxa de produção. A análise da Tabela 13 à Tabela 18 apresenta resultados para, respectivamente, cada um dos *mixes* 1 ao 6, obtidos em condições de balanceamentos distintos. Nas tabelas destaca-se a sequência de quatorze veículos de cada experimento, bem como o tempo WS de passagem do lote dos veículos. Também se destaca uma coluna com o indicador D2, que apresenta o desvio do tempo WS, em %, para comparação das diferenças de tempos em relação ao correspondente grupo de testes de cada tabela.

Conforme Tabela 13, foi inicialmente realizado no Teste#35 o balanceamento para a demanda do *mix* 1 (b mix1) e o sequenciamento também tendo por base esta demanda do *mix* 1 (demix1). Após isto, Teste#41, com o balanceamento realizado a partir do *mix2* (b mix2), foi obtida a sequência otimizada para uma demanda ainda orientada pelo *mix* 1 (demix1). Processo análogo foi realizado para obtenção dos tempos WS e sequências para balanceamentos a partir dos *mixes* 3 ao 6 (Teste#46, Teste#48, Teste#50 e Teste#52, respectivamente). Assim, todos os experimentos elencados na Tabela 13 possuem a demanda de sequenciamento dada pelo *mix* 1.

Tabela 13 – Demanda do *mix*1 e dados do balanceamento do *mix*1 ao *mix*6

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#35	b mix1/demix1	H	C	F	H	F	C	B	H	F	H	H	F	C	F	66,75	0%
Teste#41	b mix2/demix1	B	C	F	H	F	F	F	H	F	C	C	H	H	H	76,51	15%
Teste#46	b mix3/demix1	C	F	H	F	F	F	H	F	H	B	C	H	C	H	70,30	5%
Teste#48	b mix4/demix1	C	B	H	F	F	H	F	F	H	F	C	H	C	H	79,55	19%
Teste#50	b mix5/demix1	F	H	F	H	C	F	F	H	F	B	H	C	H	C	73,30	10%
Teste#52	b mix6/demix1	C	H	C	H	F	F	H	F	F	F	H	B	H	C	74,43	12%

Nos experimentos da Tabela 13, o Teste#35, o qual possui balanceamento pelo *mix* 1 e sequenciamento da demanda do *mix* 1, apresentou o menor WS, com 66,75 minutos (D2=0%). Este era um fato esperado, pois o melhor sequenciamento é obtido para a melhor atribuição de tarefas oriundas de um balanceamento também otimizado para a demanda do *mix* 1. Já todas as demais

sequências apresentaram um relativo aumento em WS. O balanceamento do *mix* 3 foi mais tolerante, mas ainda assim apresentou um tempo WS 5 % maior que a solução do *mix* 1. Já o balanceamento do *mix* 4, com a demanda do *mix* 1, foi o pior caso com 19% de aumento do tempo WS total.

Adotando-se procedimento análogo ao explicado para a geração da Tabela 13, realizou-se experimento fixando-se a demanda do *mix*2 para a fase de sequenciamento, conforme Tabela 14. Observou-se oscilações no tempo WS de, no máximo, 6% de desvio, quando comparado com o Teste#57 (b mix2/demix2). Esta demanda do *mix* 2 apresenta, portanto, uma certa estabilidade no tempo WS para os balanceamentos de entrada testados (*mix* 1 a *mix* 6).

Tabela 14 – Demanda do *mix*2 e dados do balanceamento do *mix* 1 ao *mix* 6

Teste	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#54	b mix1/demix2	H	H	B	X	C	H	X	F	C	F	H	C	H	X	65,42	6%
Teste#57	b mix2/demix2	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	0%
Teste#58	b mix3/demix2	H	H	C	X	F	H	B	H	F	X	C	H	C	X	63,83	4%
Teste#59	b mix4/demix2	C	H	B	H	X	C	H	X	F	H	X	F	H	C	63,89	4%
Teste#60	b mix5/demix2	X	C	H	F	H	F	X	B	H	C	H	C	X	H	62,71	2%
Teste#61	b mix6/demix2	H	C	H	B	H	F	H	F	X	C	X	H	C	X	65,41	6%

Novamente, para a demanda 3 fixa no sequenciamento, conforme Tabela 15, o sequenciamento obtido absorveu as variações de tempo, com exceção do *mix* 4 que apresentou o maior tempo WS, com diferença de 11% em relação à menor resposta do caso (b mix3/demix3).

Tabela 15 – Demanda do *mix*3 e dados do balanceamento do *mix* 1 ao *mix* 6

Teste	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#62	b mix1/demix3	H	H	B	C	H	C	X	F	F	H	H	F	B	X	65,32	4%
Teste#63	b mix2/demix3	F	H	B	C	X	H	B	C	X	H	F	H	H	F	66,61	6%
Teste#64	b mix3/demix3	H	B	X	B	H	F	H	F	H	F	H	C	X	C	62,81	0%
Teste#65	b mix4/demix3	C	B	H	F	X	B	H	H	C	H	H	F	X	F	69,85	11%
Teste#66	b mix5/demix3	C	H	H	F	X	B	X	B	H	F	H	F	H	C	62,90	0%
Teste#67	b mix6/demix3	F	X	B	H	B	H	F	H	F	H	C	H	C	X	65,31	4%

Para a demanda do *mix* 4 fixa no sequenciamento, conforme Tabela 16, houve uma variação máxima de 7% no tempo WS em relação à menor resposta do caso (b mix4 / demix4).

A demanda do *mix* 5, conforme Tabela 17, teve até 12% de desvio do tempo WS em relação à menor resposta (b mix5 / demix5), fato ocorrido com o balanceamento do *mix* 4. De modo similar, a demanda do *mix* 6, conforme Tabela 18, teve até 12% de desvio do tempo WS em relação à menor resposta (b mix6 / demix6), fato também ocorrido para o balanceamento do *mix* 4.

Tabela 16 – Demanda do *mix*4 e dados do balanceamento do *mix* 1 ao *mix* 6

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#68	b mix1/demix4	H	H	X	F	X	C	B	X	H	F	H	H	F	H	64,98	6%
Teste#69	b mix2/demix4	H	H	H	X	F	H	F	H	C	X	H	B	X	F	63,05	3%
Teste#70	b mix3/demix4	H	H	X	B	X	F	H	F	H	C	H	F	H	X	65,18	7%
Teste#71	b mix4/demix4	X	B	H	X	F	X	H	F	H	C	H	H	F	H	61,08	0%
Teste#72	b mix5/demix4	H	H	F	H	F	H	F	X	B	H	X	C	H	X	62,59	2%
Teste#73	b mix6/demix4	H	H	F	H	X	B	X	F	H	F	H	C	H	X	64,52	6%

Tabela 17 – Demanda do *mix*5 com balanceamento do *mix* 1 ao *mix* 6

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#74	b mix1/demix5	H	F	H	H	F	C	H	F	X	B	B	H	F	X	65,65	4%
Teste#75	b mix2/demix5	B	H	B	H	F	H	H	F	C	X	H	F	X	F	67,68	7%
Teste#76	b mix3/demix5	H	F	H	B	X	F	H	F	H	C	H	F	X	B	63,51	0%
Teste#77	b mix4/demix5	C	F	X	F	H	H	B	H	B	H	H	F	X	F	70,59	12%
Teste#78	b mix5/demix5	F	H	F	X	B	H	C	H	B	X	F	H	F	H	63,21	0%
Teste#79	b mix6/demix5	F	H	F	H	F	H	B	X	B	H	F	H	C	X	64,04	1%

Tabela 18 – Demanda do *mix*6 com balanceamento do *mix* 1 ao *mix* 6

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#80	b mix1/demix6	H	H	F	X	B	H	F	X	B	F	H	F	F	H	67,12	6%
Teste#81	b mix2/demix6	B	B	H	F	H	H	F	X	F	H	H	F	F	X	69,59	9%
Teste#82	b mix3/demix6	H	B	X	F	H	B	H	F	H	F	X	F	H	F	64,38	1%
Teste#83	b mix4/demix6	F	B	F	H	H	F	H	F	H	H	F	X	B	X	71,33	12%
Teste#84	b mix5/demix6	X	B	H	F	H	F	H	F	X	F	H	F	H	B	64,45	1%
Teste#85	b mix6/demix6	X	F	H	F	H	F	X	B	H	F	H	B	H	F	63,61	0%

Em resumo, avaliou-se as condições de balanceamentos diferentes sujeitos a uma mesma demanda. Observa-se que podem haver diferenças de tempo WS significantes (Teste#48 apresentou uma diferença de tempo de até 19%). Indicando que se a demanda não variar, pode ser vantajoso rebalancear a linha para uma condição mais adequada, como a indicada no Teste#35.

5.5.2 BALANCEAMENTO FIXO SUJEITO A DIFERENTES DEMANDAS

A Tabela 19 a seguir resume os resultados encontrados para um determinado balanceamento em relação aos seis *mixes* produtivos avaliados. Por exemplo, da Tabela 13 toma-se o resultado do Teste#35 (b mix1/demix1); da Tabela 14, o resultado do Teste#54 (b mix1/demix2) e, assim, sucessivamente. Na Tabela 19 é indicado o *mix* utilizado para a realização do balanceamento (*Mix* Balanc.), o *mix* utilizado para o sequenciamento a partir do balanceamento (Dem. do *Mix*.), o valor do tempo WS obtido para o "*Mix* Balanc." e o valor do menor tempo WS obtido para o sequenciamento do *mix* considerado. Por exemplo, o menor WS obtido para a demanda do *mix* 2 é

apresentado na Tabela 14, Teste#57, (b mix2/demix2). Da comparação dos valores concatenados na Tabela 19 calculam-se diferenças médias e desvios padrão utilizados para análise.

Tabela 19- Variação do *Mix versus* Tempo WS: Resumo dos Resultados Obtidos

***Mix* Balanc.**	**Dem. do *Mix***	**WS para o *Mix*. Balanc. [min]**	**Menor WS obtido para a Dem. do *Mix*. [min]**	**Diferença para o Menor WS (%)**	**Diferença Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**
1	1	66,75	66,75	0%	4,10%	2,2%
	2	65,42	61,62	6%		
	3	65,32	62,81	4%		
	4	64,98	61,08	6%		
	5	65,65	63,21	4%		
	6	67,12	63,61	5%		
2	1	76,51	66,75	13%	6,13%	4,4%
	2	61,62	61,62	0%		
	3	66,61	62,81	6%		
	4	63,05	61,08	3%		
	5	67,68	63,21	7%		
	6	69,59	63,61	9%		
3	1	70,3	66,75	5%	2,75%	2,6%
	2	63,83	61,62	3%		
	3	62,81	62,81	0%		
	4	65,18	61,08	6%		
	5	63,51	63,21	0%		
	6	64,38	63,61	1%		
4	1	79,55	66,75	16%	8,50%	5,8%
	2	63,89	61,62	4%		
	3	69,85	62,81	10%		
	4	61,08	61,08	0%		
	5	70,59	63,21	10%		
	6	71,33	63,61	11%		
5	1	73,30	66,75	9%	2,42%	3,3%
	2	62,71	61,62	2%		
	3	62,9	62,81	0%		
	4	62,59	61,08	2%		
	5	63,21	63,21	0%		
	6	64,45	63,61	1%		
6	1	74,43	66,75	10%	4,43%	3,7%
	2	65,41	61,62	6%		
	3	65,31	62,81	4%		
	4	64,52	61,08	5%		
	5	64,04	63,21	1%		
	6	63,61	63,61	0%		

Em síntese, os resultados da Tabela 19 indicam que um balanceamento efetuado a partir do *mix* 3 ou do *mix* 5 tende a propiciar sequenciamentos menos sensíveis a variações dos *mixes* de entrada avaliados. Para o balanceamento efetuado com o *mix* 4 somente houve um resultado de sequenciamento satisfatório, no caso, para o próprio *mix* 4. Para os demais *mixes* como entrada, os sequenciamentos apresentaram consideráveis variações no tempo WS (entre 4% e 19%).

5.6 ANÁLISE DOS SEQUENCIAMENTOS GERADOS

Na Tabela 20 a seguir, é verificado que é possível obter o mesmo resultado ótimo, em relação ao valor de WS, a partir de sequenciamentos diferentes de um mesmo *mix* de produção. Em particular, observa-se que no Teste#4 da Tabela 20 ocorre a indicação de quatro produtos H seguidos, sem impacto no tempo total WS de produção.

Tabela 20 – Várias sequências com mesmo tempo de execução H para *Mix* 1.

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#4	mix 1a/dmx1/t=0,25/c_bf	F	H	F	C	C	H	F	H	H	H	H	B	C	H	66,75	8%
Teste#33	b mix 1/d mix1-seq 1	F	H	F	H	H	F	C	F	H	C	F	C	H	B	66,75	8%
Teste#34	b mix 1/d mix1-seq 2	C	H	B	F	C	H	C	H	F	F	H	H	F	F	66,75	8%
Teste#35	b mix 1/d mix1-seq 3	H	C	F	H	F	C	B	H	F	H	H	F	C	F	66,75	8%

No Teste#40, nas posições 5, 6 e 7 da Tabela 21, foi incluída temporariamente uma restrição no modelo de sequenciamento para forçar que em algum momento haveria três veículos modelo H consecutivos. O objetivo dessa imposição de restrição foi verificar se a restrição de processo imposta de três veículos consecutivos influenciaria o tempo de execução do lote. Através desse experimento foi constatado o aumento do tempo total de execução WS de 67,45 para 68,35 minutos. No entanto, o desvio de 2% (11%-9%) não foi considerado significativo, para a condição de experimento. Salienta-se que o estudo ocorreu para o caso com pelos menos um *buffer* entre os postos, para a demanda e o balanceamento apresentados.

Tabela 21– Sequências com mesmo tempo WS para *Mix* misto(123a).

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	WS [min]	D2 [%]
Teste#36	b misto 123/ d mix1-seq1	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45	9%
Teste#37	b misto 123/ d mix1-seq2	H	F	C	H	F	H	F	B	F	H	F	H	C	C	67,45	9%
Teste#38	b misto 123/ d mix1-seq3	H	F	C	F	H	H	F	B	F	H	H	F	C	C	67,45	9%
Teste#39	b misto 123/ d mix1-seq4	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45	9%
Teste#40	b misto 123/ d mix1-seq5	H	F	C	F	H	H	H	B	F	F	H	F	C	C	68,35	11%

Também nos testes 45 e 49, para a demanda do *mix*2 (Apêndice C), houve ocorrência de três produtos H em sequência, sem grandes impactos de aumento do tempo de execução do lote, mas, neste caso, sem imposição adicional de restrição no modelo de sequenciamento.

Uma condição significativa também ocorreu no Teste#4 (Tabela 20), onde se observou quatro modelos H seguidos. Esse fato é importante, pois antes do estudo conduzido havia uma restrição *adhoc* de que não poderia haver três modelos H seguidos, com o prejuízo de causar paradas de linha. O fato é relevante no sentido de indicar que através do balanceamento e sequenciamento otimizado, também é possível eliminar/atenuar restrições de capacidade.

A Tabela 22 a seguir apresenta uma síntese de sequências com menores tempos, em relação a um determinado *mix*, obtidas a partir de uma condição de balanceamento ótimo. Sugere-se que os menores desvios do tempo WS, em relação ao tempo WS do Teste#71, seriam obtidos para o *mix*2 ao *mix*6 (desvios de até 4%), a partir de um balanceamento seguido de um sequenciamento. Já o *mix*1 revela que, independente de um balanceamento seguido de um sequenciamento, irá ter um tempo de produção WS 8% maior, incremento temporal influenciado pela própria composição da demanda do *mix*1. Conforme mencionado na seção 5.4, cada *mix* apresenta um WS distinto, em função das variações nas demandas dos produtos. Assim, a Tabela 22, ilustra que flutuações no tempo WS ocorrem, mesmo diante de condições otimizadas de balanceamento/sequenciamento.

Tabela 22 – Síntese das sequências de menores tempos para os balanceamentos otimizados.

Testes	**Condição bal. / Condição seq.**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**WS [min]**	**D1 [%]**
Teste#35	b mix1/d mix1	H	C	F	H	F	C	B	H	F	H	H	F	C	F	66,75	8%
Teste#57	b mix2/d mix2	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	1%
Teste#64	b mix3/d mix3	H	B	X	B	H	F	H	F	H	F	H	C	X	C	62,81	3%
Teste#71	b mix4/d mix4	X	B	H	X	F	X	H	F	H	C	H	H	F	H	61,08	0%
Teste#78	b mix5/d mix5	F	H	F	X	B	H	C	H	B	X	F	H	F	H	63,21	3%
Teste#85	b mix6/d mix6	X	F	H	F	H	F	X	B	H	F	H	B	H	F	63,61	4%

Através dos resultados obtidos e concatenados na Tabela 19 e Tabela 22, há uma indicação da diferença dos tempos de processamento teóricos dos produtos com os tempos efetivos de operações/esperas nos postos. Como indicado em Scholl (1999), a melhoria da produtividade com o balanceamento de linha sofre influência da variabilidade dos tempos das tarefas do *mix* de produtos envolvidos e da distribuição dos produtos ao longo dos postos. A busca da melhor sequência é no sentido de diminuir essa variabilidade do tempo efetivo das operações. Cabe reforçar que o resultado mais significativo do estudo conduzido na presente dissertação é apresentado na Tabela 19, já que indica o quão "resiliente" cada balanceamento é a variações no *mix* de produção.

5.7 VERIFICAÇÃO ATRAVÉS SIMULAÇÃO DISCRETA

Na presente seção realiza-se uma comparação dos resultados gerados pela abordagem de otimização MILP (modelos implementados no *software* GAMS) em relação aos indicadores obtidos por meio do *software* de simulação WITNESS.

A Tabela 23 apresenta a comparação dos resultados do modelo matemático (GAMS/CPLEX) e de simulação discreta (WITNESS). Na comparação de resultados de taxa de produção (em veículos/hora, v/h), do indicado no GAMS em relação ao WITNESS, houve uma diferença, para menos na simulação discreta, em média, de 5,3%. Essa diferença se manteve relativamente constante ao longo dos diferentes *mixes* e testes realizados.

Tabela 23 – Comparação de experimentos no GAMS e WITNESS

Testes	Sequenciamento														WS	GAMS	WITNESS	Difer
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	[min]	[v/h]	[v/h]	[%]
Teste#62	H	H	B	C	H	C	X	F	F	H	H	F	B	X	65,32	12,9	12,0	6,7%
Teste#57	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	13,6	12,9	5,4%
Teste#46	C	F	H	F	F	F	H	F	H	B	C	H	C	H	70,30	11,9	11,4	4,6%
Teste#71	X	B	H	X	F	X	H	F	H	C	H	H	F	H	61,08	13,8	13,0	5,5%
Teste#72	H	H	F	H	F	H	F	X	B	H	X	C	H	X	62,59	13,4	12,7	5,4%
Teste#85	X	F	H	F	H	F	X	B	H	F	H	B	H	F	63,61	13,2	12,5	5,3%

Essa diferença para menos na taxa de produção da simulação discreta em relação à abordagem matemática está associada à aproximação utilizada no modelo matemático para contemplar o tempo de transporte entre as mesas (ou postos de trabalho).

Nas restrições do modelo matemático do sequenciamento considerou-se o tempo de transporte de um posto para outro na variável $dur_{m,k}$, conforme equação (49). Porém, esse tempo de transporte é considerado apenas uma vez, caso aplicável à linha do tipo passo não contínuo com avanço sincronizado. Contudo, na prática, a linha é de passo com avanço não sincronizado (rever classificação na Tabela 4), onde o tempo de transporte deveria ser considerado duas vezes. Ou seja, enquanto o produto está sendo transferido de uma mesa para outra, o produto anterior não avança simultaneamente (passo sincronizado). Esta é uma característica desse tipo de linha de passo não sincronizado que possui interação manual. Somente é dada condição para o mecanismo do posto anterior acionar o deslocamento da peça quando o posto atual estiver, de fato, em estado vazio. Após correção do parâmetro do transporte no modelo matemático, alguns testes adicionais foram realizados e valores muito próximos dos resultados de simulação no WITNESS foram obtidos.

A situação considerada no modelo matemático é válida apenas numa situação de linha vazia, sendo preenchida gradativamente, ou seja, o horizonte de análise foi limitado a 14 veículos. A partir de uma situação de linha cheia, onde os postos pulmões estariam sendo ocupados e atingido um regime estacionário, deve-se considerar dois tempos de transporte para cada mudança de posto, como foi mostrado na simulação discreta. Desta forma, justifica-se a diferença para menos na capacidade de produção observada no WITNESS.

Nos relatórios estatísticos da simulação também foi possível avaliar os níveis de bloqueio dos postos conforme o *mix*, indicando um comportamento dinâmico para o bloqueio. Estes bloqueios dinâmicos dos postos, confirmam a influência do *mix*, que impacta o tempo de alocação no posto (balanceamento) e, consequentemente, também da qualidade do balanceamento.

Na Tabela 24, é indicado o resultado de bloqueio de cada *mix* para os postos que estão atuando como *buffers*. Para a demanda do *mix1* (*d mix1*), o posto com maior bloqueio foi o P6. Para a demanda do *mix2* (*d mix2*) o posto que apresentou maior bloqueio foi o P4. Já para o *d mix3* a *d mix6* o posto P2 foi o que indicou maior bloqueio. Os bloqueios recaem sobre os postos que estão fazendo o papel de *buffer*, indicando que, se não houvesse esses postos pulmões, haveria perdas por inatividade diretamente sobre os postos produtivos, gerando um considerável aumento do tempo WS, conforme já indicado na discussão sobre influência do *buffer* (seção 5.4).

Tabela 24 - Postos com % de tempo bloqueado

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
b mix1/d mix1						52,8%				
b mix2/d mix2				59,6%						
b mix3/d mix3		80,2%		67,6%						
b mix4/d mix4		69,8%		54,9%						
b mix5/d mix5		64,1%				50,1%				
b mix6/d mix6		64,3%		49,2%						

Uma simulação adicional foi realizada para avaliar o efeito da inclusão de 2 postos consecutivos de *buffer* ao invés de apenas um. O teste consistiu em alterar a posição do *buffer* do posto P10 para P7. A escolha de retirada de *buffer* em P10 foi devido à baixa utilização do mesmo (zero %) observada durante as simulações para obtenção da Tabela 24 e, também, pelo fato de que P6 foi observado com percentual de uso relativamente elevado, principalmente na passagem do *mix1*. Desta forma, foram estabelecidas duas posições de *buffer* entre os postos de montagem P5 e P8, ou seja, *buffer* em P6 e outro em P7. A ideia de fazer “alívio” do último posto para o sentido do primeiro é proposta em Askin e Standrige (1993) e se justifica pela vantagem das linhas de passo não sincronizadas ser maximizada quando o posto mais lento é alocado na primeira posição da linha.

Após a simulação considerando-se o *mix1*, foi observado que não houve alteração na capacidade do sistema como um todo pela mudança sugerida nas posições de *buffers*. Apenas houve a mudança do posto com maior tempo impedido de avançar (% *blocked*), do posto 06 para posto 07, mantendo aproximadamente os mesmos 52% de bloqueio, conforme Figura 39. Nesse caso, o aumento do número de *buffers* entre os postos P5 e P8 não ocasionou aumento na taxa de produção.

Cadência
12.2 v/h

Machine Statistics : Report by On Shift Time

Name	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
% Idle	0.00	81.97	13.96	69.36	11.98	42.11	2.10	81.07	4.47	94.92
% Busy	94.89	5.11	80.94	5.10	81.13	5.09	92.82	5.09	90.44	5.08
% Filling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Emptying	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Blocked	5.11	12.93	5.10	25.54	6.89	52.80	5.09	13.84	5.08	0.00
% Cycle Wait	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup Wai	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Broken Do	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Repair Wa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No. Of Opera	1519	1518	1517	1516	1515	1514	1512	1510	1510	1509

Machine Statistics : Report by On Shift Time

Name	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
% Idle	0.00	81.91	14.00	69.35	13.91	88.05	42.54	2.50	83.78	9.96
% Busy	94.89	5.11	80.90	5.10	81.01	5.09	5.09	92.44	5.06	90.04
% Filling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Emptying	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Blocked	5.11	12.98	5.10	25.55	5.09	6.87	52.38	5.06	11.16	0.00
% Cycle Wait	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Setup Wai	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Broken Do	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% Repair Wa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No. Of Opera	839	838	837	836	835	834	834	831	830	829

Figura 39 – Alteração da posição do *buffer* entre posto

5.8 SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS E RESULTADOS APLICADOS

A Figura 40 a seguir sumariza os resultados dos experimentos realizados. No eixo das abcissas tem-se os tempos de operação do lote de produção (tempo WS), em minutos; no eixo das ordenadas, a diferença percentual em relação ao resultado obtido nos experimentos com menor tempo WS. Observa-se, então, três principais grupos de condições de testes.

O primeiro grupo é um conjunto de resultados dos experimentos que agrupou as melhores condições de operação, obtidas a partir de um determinado balanceamento seguido de algumas variantes de sequenciamento, de acordo com *mixes* produtivos avaliados. Ressalta-se que a alocação de *buffers* foi um elemento que desempenhou papel fundamental na obtenção de sequências produtivas otimizadas (menores tempos WS) e, de certo modo, flexíveis (várias sequências diferentes

com tempos WS próximos, conforme Tabela 19). Assim, observou-se que a adoção de *buffers* entre postos produtivos conferiu flexibilidade à linha, influenciando na obtenção do nível desejado de produtividade.

O segundo grupo, apresentou variações do tempo WS maiores, pela influência de *mixes* desfavoráveis, que combinados com a condição de operação inicial da linha sem existência de *buffer* não permite uma taxa de produção adequada. Já o terceiro grupo representa situações onde as condições de operação não permitem nenhuma recuperação da taxa de produção na linha monofluxo, agravada por inatividades, fazendo o tempo WS ficar acima de 30% do esperado, mesmo como o esforço de se obter sequências otimizadas.

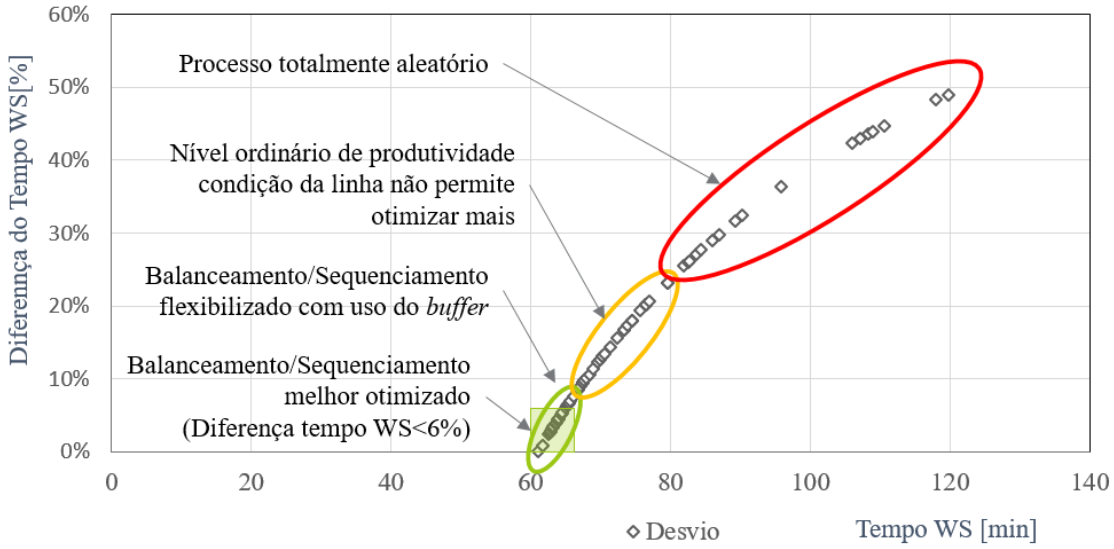


Figura 40 – Níveis de produtividade na linha de modelo misto em estudo.

A Tabela 25, indica os resultados práticos obtidos a partir das ações de otimização do balanceamento, sequenciamento e alocação correta de *buffers* previstas no modelo, que permitiram reduzir o tempo de produção WS. Essa redução do tempo WS foi convertida em redução de postos, já que se manteve a taxa constante de produção. Através da otimização foi possível realizar as modificações reais na linha que efetivamente foram aplicadas no chão-de-fábrica. A primeira mudança efetuada foi colocar um posto com a função de *buffer* entre dois postos produtivos subsequentes. A segunda alteração foi a redução do número de postos de trabalho, conforme possibilidades de redução do tempo de ciclo a partir da redução do tempo WS sugerido no estudo teórico, com uma pequena redução na taxa de produção de 7%, descrito na Tabela 25.

Inicialmente, observou-se uma possibilidade de ganho total em produtividade equivalente a 3 postos de trabalho, ou seja, haveria possibilidade de se manter praticamente a mesma taxa de produção com uma significativa redução do número de postos. Partiu-se de uma quantidade de nove postos, indicado na Tabela 25, para uma quantidade de seis postos, indicado na Figura 37. Este fato somado às ações de modificação do *layout*, que mudou o tipo de abastecimento de peças fixas na borda de linha para o sistema de abastecimento por carrinhos *kitting*, permitiu importantes ganhos de produtividade, com redução significativa das perdas por NVA (Não Valor Agregado).

Tabela 25 – Resultados práticos aplicados no estudo de caso

Critério de Avaliação	**ANTES**	**DEPOIS**	**VARIAÇÃO**	**Observação**
Taxa de produção (v/h)	14	13,3	-7%	Redução de 7 % na capacidade de produção[4]
Número de postos produtivos	9	6	33%	Redução de 3 postos
Valor Agregado (VA)	32%	50,20%	57%	Aumento de 57% da taxa do VA.

5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados dos experimentos realizados para avaliar os impactos do *mix* de produtos, do balanceamento, do sequenciamento e da alocação dos postos pulmões (*buffers*). Os resultados indicam que existem perdas isoladas de cada fator indicado que, uma composição de fatores de forma concomitante, pode acarretar perdas consideráveis na linha de produção do tipo monofluxo com produtos mistos. No Capítulo 6, a seguir, faz-se as considerações finais desse estudo em forma de um resumo geral.

[4] Apesar do Teste#71 (apêndice B) indicar ser possível uma taxa de produção de 13,7 v/h, a simulação discreta indica uma taxa de produção menor, de 13,3 v/h.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho buscou-se responder se é possível atender uma demanda flexibilizada dos produtos numa linha comum de montagem e não ter impactos significativos de redução da produtividade em função dessa flexibilização. Estudos de balanceamento e sequenciamento produtivos foram realizados. A questão principal era compreender o quanto a variação dos tempos produtivos dos diferentes veículos que passavam na linha monofluxo geravam alterações na produtividade da linha, alterações estas que foram mais/menos intensificadas pelas variações do *mix* de produção.

Uma abordagem de solução baseada na criação de modelos matemáticos em Programação Linear Inteira Mista foi proposta. Buscou-se otimizar a sequência de produção com o intuito de diminuir as ociosidades e, por consequência, o tempo total de produção. Através da função objetivo do modelo de sequenciamento, apresentada na equação (40), é minimizado o carregamento das tarefas nos postos por uma sequência otimizada dos produtos a entrar na linha. Este esforço de minimizar a alocação dos produtos às posições da sequência de produção foi o ponto de partida para buscar minimizar o tempo de ciclo. Posteriormente este fato permitiu reduzir o número de postos da linha, mantendo-se as taxas de produção, já que não houve aumento da demanda no período que foram implantadas as modificações.

Foi identificado no estudo de caso que, além do balanceamento, também há outros elementos que interferem na taxa de produção da linha de montagem mista (MALBP). Os dois principais fatores identificados nesse estudo foram: (i) a combinação adequada de balanceamento e sequenciamento, que sofrem influência da demanda, conforme *mixes* de produção avaliados; e, (ii) a existência/ausência de *buffers* entre postos, que para esse tipo de linha de passo não sincronizado, tem um efeito significativo na recuperação da taxa de produção.

A primeira influência observada foi que, conforme demandas/*mixes* utilizados para a realização do balanceamento, acarreta-se, consequentemente, uma variação dos tempos de operação atribuídos aos postos. Esta variação de tempos, por sua vez, influencia na sequência de produção a ser sugerida pelo modelo de sequenciamento. A sequência de produção adotada impacta de forma mais/menos intensa na produtividade. Nos casos testados no Capítulo 5 observou-se que "balanceamentos/*mixes* adequados" produziam, na média, uma perda menor na taxa de produção (*e.g.*, Tabela 19). Se o binômio balanceamento-sequenciamento não fosse considerado de forma adequada, observa-se um aumento do tempo WS, com uma relação direta com a perda da taxa de

produção para uma determinada sequência. O aumento desse tempo é gerado, em síntese, pelas paradas de linha provocadas pelas inatividades/bloqueios que ocorrem entre os postos de montagem.

A segunda influência avaliada foi a inclusão de *buffers* entre os postos de montagem, o que ocasionou impacto no resultado do tempo total de produção. As variações do tempo WS com e sem *buffer* foram significativas, conforme resultados da seção 5.3, sendo que o uso de *buffers* permitiu uma expressiva redução dos tempos de produção WS (*e.g.*, 20% em média, conforme Tabela 10). Portanto, a correta alocação de *buffers* é fundamental para a flexibilidade de montar vários produtos numa linha mista de passo não sincronizado. Essa diferença indica que alguns *mixes* são muito mais "sensíveis" a existência de *buffer*.

Os experimentos realizados no Capítulo 5, em particular na seção 5.4, evidenciaram que somente o balanceamento da linha não é suficiente para equilibrar situações como a descrita nesse estudo de caso: produtos tão diferentes entre si produzem, por consequência, grandes oscilações dos tempos de operações nos postos, conforme o veículo em passagem na linha. Este fato provoca grande desequilíbrio de carga de trabalho entre postos e constantes flutuações do posto gargalo, em função da sequência de entrada no fluxo da linha de montagem. O problema requer constantes ajustes do balanceamento em função da variação da demanda. O desafio é, a partir das alterações da demanda, refazer os estudos de balanceamento e sequenciamento para atingir o melhor nível de desempenho operacional, levando-se em conta a flexibilidade demandada.

A inclusão de *buffers* para linhas do tipo passo não sincronizado já havia sido recomendada na literatura, por exemplo, em Scholl (1999) e Askin e Standridge (1993). Contudo, o papel do *buffer* como elemento de recuperação da capacidade produtiva perdida, ocasionada pela variação dos tempos das operações dos produtos diferentes nos postos, pode ser observado no presente estudo. Dessa forma, a alocação de *buffer* com capacidade de armazenar uma peça entre postos permitiu flexibilização do processo de montagem, mesmo para uma razoável diversidade de produtos.

Os objetivos iniciais do estudo foram atendidos, como a compreensão das principais condições de operação que interferem no desempenho da linha tipo MALBP. Uma sequência mais adequada para cada *mix* foi obtida, bem como a constatação de que alguns balanceamentos foram menos sensíveis às variações de *mix* testadas, indicando uma flexibilidade da linha em absorver *mixes* de produtos diferentes, sem grandes perdas na taxa de produção e, consequentemente, mantendo os níveis de produtividade.

Por fim, o estudo mostrou que é possível atender uma flexibilidade de demanda, com um nível adequado de produtividade, pela recuperação da taxa de produção ao longo da passagem de diferentes modelos na linha. Na prática, as observações geradas no estudo em particular ainda

sugerem que novas melhorias poderão ser aplicadas, como a eliminação de restrições de capacidade para absorver ainda mais variações de demanda, as quais tendem a permitir maior flexibilidade. As ações de prever as mudanças de demandas e adequar essas mudanças na distribuição das tarefas (balanceamento) e, ainda respeitar uma sequência programada e ótima, é um grande desafio que, no dia-a-dia do chão de fábrica, não se apresenta como uma tarefa simples. Manter a flexibilidade operacional é fundamental nesse tipo de produção e faz parte da característica desejada de linhas monofluxo, contudo, manter o índice de produtividade desse processo a um nível competitivo é um objetivo a ser constantemente buscado. Essa questão toma maiores proporções quanto à estratégia de manufatura de manter níveis de competitividade de forma sustentável e pode ser um recurso de suporte à decisão sobre novos produtos a inserir na linha existente, ou referências para concepção de novas linha de produção.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros relacionados à produtividade pelo balanceamento e sequenciamento de linhas de modelo misto é importante aprofundar o estudo sobre projeto (ou reconfiguração) das linhas e dimensionamento de *buffers*, visando a flexibilidade. Dimensionamento e alocações de *buffer* geralmente são uma contramedida indicada para evitar perdas de produção por falhas de funcionamento nos recursos gargalos. No entanto, resultados observados nesse estudo indicam que também podem ser uma alternativa de flexibilidade de linhas de montagem de produtos mistos. Os resultados do estudo de caso abordado indicam que a presença de *buffer* entre postos de montagem “atenua” as variações dos tempos das tarefas nos postos, permitindo uma recuperação da taxa de produção. Esta observação requer ainda um aprofundamento teórico e a elaboração de um modelo genérico para conclusões mais abrangentes.

Um tema relacionado ao sequenciamento e flexibilidade é a avaliação de uso de linhas flexíveis do tipo produto a montar sobre AGV (*Auto Guided Vehicle*) em contraponto de linhas tradicionais do tipo esteiras ou mesa de rolos. Algumas iniciativas estão em aplicação, por exemplo, em algumas fábricas da Nissan.

Outra linha de investigação é a aplicação de recurso de *buffer* para linhas mista de passo contínuo para avaliar a melhoria da produtividade com o *tradeoff* do aumento do WIP (*Work In Process*). Dentro do princípio da produção JIT, a minimização de peças no fluxo seria comparável com uma possível melhoria da flexibilidade e ou produtividade.

Reforça-se que todas essas medidas são tentativas de contenção para a crescente multiplicação de produtos que compartilham uma linha de montagem comum. No entanto, Marksberry (2013) sugere que a variabilidade e a complexidade do produto deveriam ser prevenidas ainda no momento da concepção do produto/família de produtos, visando também a otimização do processo, de forma preventiva.

REFERÊNCIAS

ASKIN, Ronald G. e STANDRIDGE, Charles R. *Modeling and analysis of manufacturing systems* - John Wiley & Sons, New York - 1993.

BANKS, Jerry; CARSON, John S. e NELSON, Barry L. *Discrete-event system simulation*. Prentice Hall International, 2nd. ed. New Jersey - 1996.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte e SCHOLL, Armin. *Assembly line balancing: Which model to use when?* - International Journal of Production Economics - Elsevier, Volume 111, Issue 2, - Pages 509–528 - February 2008.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte e SCHOLL, Armin. *Sequencing Mixed-Model Assembly Lines: Survey, Classification and Model Critique* - International Journal of Production Economics - Elsevier, Volume 192, Issue 2, Pages 349–373 - January 2009.

BRASIL, Daniel; NORONHA, Thiago Ferreira e ROCHA, Caroline. Heurísticas para o Problema de Sequenciamento de Carros em Linhas de Montagem. Em: LOPES, Heitor Silvério; RODRIGUES, Luiz Carlos de Abreu e STEINER, Maria Teresinha Arns. Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional - Curitiba - PR; Omnipax - 2013.

BUKCHIN, J. *A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment* - International Journal of Production Research, Volume 36, Issue 10, 1998.

CURRY, Guy L. e FELDMAN, Richard M. *Manufacturing Systems Modeling and Analysis* - Springer – 2011.

ELMARAGHY, Hoda A. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems* - Springer - 2008.

EMDE, Simon; BOYSEN, Nils e SCHOLL, Armin. Balancing Mixed-Model Assembly Lines: A Computational Evaluation of Objectives to Smoothen workload - Taylor & Francis - ISSN: 0020-7543 (pISSN) – 2010.

FORD, Henry. *My life and work* - 1863-1947 - Garden City Publishing Co Inc. - New York - 1922.

GUÉRET, Christelle; PRINS, Christian e SEVAUX, Marc. *Applications of optimizations with Xpress* - MP - Editions Eyrolles - Paris - France - 2000.

LANNER Group - *Learning WITNESS. Book One. Manufacturing Editio*n – User's Manual – 2012.

LAW, Averill M. e KELTON, W. David. *Simulation modeling and analysis*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MAGATÃO, Leandro. *Mixed Integer Linear Programming and Constraint Logic Programming: Towards a Unified Modeling Framework* - Tese (Doutorado em Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba - 2005.

MARKSBERRY, Phillip. *The Modern Theory of the Toyota Production System: A Systems Inquiry of the World´s Most Emulated and Profitable Management System* - Taylor & Francis Group - Boca Raton, Florida - 2013.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick; FLEURY, Afonso; MELLO, Carlos Henrique Pereira; NAKANO, Davi Noboru; LIMA, Edson Pinheiro; TURRIONI, João Batista; HO, Linda Lee; MORABITO, Reinaldo; MARTINS, Roberto Antonio; SOUSA, Rui; COSTA, Sergio E. Gouveia e PUREZA, Vitória. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações - Elsevier - Rio de Janeiro - 2012.

NEUT, João Alfredo Sikorski Van Der. "Balanceamento da Linha Final de Carroceria de uma Fábrica de Veículos Utilitários com o Uso de Programação Linear Inteira Mista e Validação Através de Simulação", Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba - 2013.

OZTURK, Cemalettin; TUNAH, Semra; HNICH, Brahim e ORNEK, M. Arslan. *Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines* - Springer - New York - 2013.

RAO, Dodla Nageswara. *Single and Mixed-Model Assembly Line Balancing Methods for Both Deterministic and Normally Distributed Work Element Times* - Thesis Master of Science - Oregon State University - 1971.

SAADANI, Nour El Houda. Ordonnancement des systèmes de production sans temps d'arrêt machine - These presente devant La Faculté des Sciences de Tunis et L'institut national des sciences appliquées de Lyon - 2003.

SCHOLL, Armin. Balancing and Sequencing of Assembly Lines - 2a. rev. ed. - Heidelberg: Physica-Verlag - 1999.

SIMARIA, Ana Sofia de Almeida. Uma Metodologia para o Balanceamento de Linhas de Montagem - Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Gestão do Porto - 2001.

SOLNON, Cristine; CUNG, Van Dat; NGUYEN, Alain e ARTIGUES, Christian. *The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem* - ROADEF – 2005.

TAMANI, Karim. *Développement d'une méthodologie de pilotage intelligent par régulation de flux adaptée aux systèmes de production* - These presente devant L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE - 2008.

THOMOPOULOS, Nick T. *Assembly Line Planning and Control* - Springer International Publishing, Switzerland 2014.

TOLIO, Tullio. Design of Flexible Production Systems - Methodologies and Tools - Springer - 2009 - ISBN: 978-3-540-85413-5.

WILLIAMS, H. Paul. *Model Building in Mathematical Programming* - 5th edition - John Wiley & Sons - United Kingdom - 2013.

APÊNDICE A - MODELO MATEMÁTICO DE SEQUENCIAMENTO IMPLEMENTADO NO *SOFTWARE GAMS*

```
$Title Minimizacao do tempo de produ□□o num FLOWSHOP
* considerando 1 operador no posto 1 (9 no total)
* com confiabilidade da solu□□o (troca)
*****************************************************
$include dados_flowshop.inc
sets
prod1(peca) / X /
prod2(peca) / H /
prod3(peca) / F, B, C /
mo  mao de obra   /op1*op9/
;
Parameter soma;
Parameter transporte;
*transporte = 0;
transporte = 0.25;
alias(peca, peca1);
alias(ordem, ordem1);
alias(ordem, ordem2);
alias(maq, maq1);
  Variables
    ordem_pc(peca, ordem)       indica a ordem das pecas (outro coment□rio)
    dur(maq,ordem)                 tempo de processamento da peca na posicao (ordem) na
maquina (maq)
    inicio(maq,ordem)             inicio de processamento da peca na posicao (ordem) na
maquina (maq)
    final(maq,ordem)         inicio de processamento da peca na posicao (ordem) na maquina
(maq)
    espera(maq,ordem)
    ociosi(maq,ordem)
    y(maq,ordem)
    espaco(maq)
    mao_obra(mo, maq)         var. binaria que aloca ”mo” a ”maq”
    objetivo
    objetivo1
    objetivo2
    dur_max
    ocupa(maq)
  ;
positive variable dur, dur_max, ociosi, espera, inicio, ocupa, final, espaco;
binary variable ordem_pc, mao_obra,y;
inicio.fx('m1','pos1') = 0;
espera.up('m3',ordem)=0.25;

 equations

fc_obj                      funcao objetivo
fc_obj2                     funcao objetivo
fc_obj3              funcao objetivo(ordem)

ordena1(ordem)              restricao 1
ordena2(peca)                  restricao 2
ordena3a(ordem)
ordena4a(ordem)
ordena5a(ordem)
ordena3s(ordem)
ordena4s(ordem)
ordena5s(ordem)
$ontext
ordena3b(ordem)
ordena4b(ordem)
ordena5b(ordem)
$offtext
duracao1(maq,ordem)         restricao do slide 9
duracao2(maq,ordem)         restri□□o do slide 10
duracao3(maq)
duracao4a(maq,ordem)
duracao4b(maq,ordem)
duracao5(maq,ordem)
```

```
inicio1(maq,ordem)
inicio2(maq,ordem)
inicio3a(maq,ordem)
inicio3b(maq,ordem)
inicio3c(maq,ordem)
inicio5a(maq,ordem)
inicio5b(maq,ordem)
inicio5c(maq,ordem)
inicio5d(maq,ordem)
inicio5e(maq,ordem)
final1(maq,ordem)
ocupacao1(maq)
ocupacao2(maq)
ocupacao3(maq)
ocupacao4(maq)
ocupacao5(maq)
;
fc_obj ..
   objetivo =e= sum(
                   (maq,ordem) $(ord(maq) eq card(maq) and ord(ordem) eq card(ordem)),
                     inicio(maq, ordem) + dur(maq, ordem)
                   )
       ;
fc_obj2 ..
   objetivo1 =e=
                    100000000* dur_max +
                    objetivo2
                ;

fc_obj3 ..
   objetivo2 =e=
               sum(maq , ocupa(maq) )
*               sum(maq $(ord(maq)=3) , ocupa(maq) )
       ;
$ONTEXT
*                       EXEMPLO DE COMO FOR□AR UMA SOLU□□O
*                       NOTE QUE FOI IMPOSTA UMA SEQU□NCIA
ordena01..          ordem_pc('H','pos1') + ordem_pc('F','pos2') + ordem_pc('C','pos3') +
ordem_pc('F','pos4') +
                  ordem_pc('H','pos5')  +  ordem_pc('H','pos6')  +  ordem_pc('H','pos7')  +
ordem_pc('B','pos8') +
                  ordem_pc('F','pos9') + ordem_pc('F','pos10') + ordem_pc('H','pos11') +
ordem_pc('F','pos12') +
                  ordem_pc('C','pos13') + ordem_pc('C','pos14') =e= 14;
$OFFTEXT

$ONTEXT
*                       EXEMPLO DE COMO *IMPEDIR* UMA SOLU□□O
*                       NOTE QUE PRECISA INSERIR A SEQU□NCIA QUE N□O DEVE SER REPETIDA
ordena0..             ordem_pc('','pos1')  +  ordem_pc('','pos2')  +  ordem_pc('','pos3')  +
ordem_pc('','pos4') +
                  ordem_pc('','pos5')  +  ordem_pc('','pos6')  +  ordem_pc('','pos7')  +
ordem_pc('','pos8') +
                  ordem_pc('','pos9')  +  ordem_pc('','pos10')  +  ordem_pc('','pos11')  +
ordem_pc('','pos12') +
                  ordem_pc('','pos13') + ordem_pc('','pos14') =l= 13;
$OFFTEXT

ordena1(ordem) .. sum(peca, ordem_pc(peca,ordem) ) =e= 1
       ;

ordena2(peca) .. sum(ordem, ordem_pc(peca,ordem) ) =e= dem_prod(peca)
       ;

* restri□□o alterada em 13/7/2014
*ordena3a(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 4 ) ..
ordena3a(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 3 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod1(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                             ord(ordem1) le ord(ordem) + 4),
                             ord(ordem1) le ord(ordem) + 3),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;

* restri□□o alterada em 13/7/2014
*ordena4a(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 4 ) ..
ordena4a(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 3 ) ..
```

```
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod2(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 4),
                           ord(ordem1) le ord(ordem) + 3),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;

ordena5a(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 3 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod3(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 4),
                           ord(ordem1) le ord(ordem) + 3),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;

$ontext
* restri□□o alterada/eliminada em 13/7/2014
ordena3b(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 5 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod1(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
                           ord(ordem1) le ord(ordem) + 5),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =g= 1
                ;

ordena4b(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 5 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod2(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
                           ord(ordem1) le ord(ordem) + 5),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =g= 1
                ;

ordena5b(ordem) $(ord(ordem)le card(ordem) - 5) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod3(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
                           ord(ordem1) le ord(ordem) + 5),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =g= 1
                ;
$offtext

duracao1(maq,ordem) ..
         dur(maq,ordem) =e=
         sum(peca $(TP(maq,peca) > 0),
            TP(maq,peca) * ordem_pc(peca,ordem) /100 )  ;

duracao2(maq,ordem) $(ord(maq) < card(maq) and ord(ordem) < card(ordem) )..
         ociosi(maq,ordem)+
             dur(maq,ordem+1) + espera(maq,ordem+1)
         =e= espera(maq,ordem) +
             dur(maq+1,ordem) + ociosi(maq+1,ordem)
          ;

duracao3(maq)  ..
         dur_max =g=
              ocupa(maq) ;

inicio1(maq,ordem) $(ord(maq) < card(maq))..
        inicio(maq+1, ordem) =e=
        inicio(maq,ordem) + dur(maq,ordem) + espera(maq,ordem) ;

inicio2(maq,ordem) $(ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq, ordem+1) =e=
        inicio(maq,ordem) + dur(maq,ordem) + ociosi(maq,ordem) ;

final1(maq,ordem) ..
        final(maq,ordem) =e=
                 inicio(maq, ordem)+ dur(maq,ordem) ;

ocupacao1(maq) $(ord(maq) ge 1 and ord(maq) le 2) ..
        ocupa(maq) =e=
         sum(ordem $(ord(ordem) eq card(ordem)),
            inicio('m1',ordem) + dur('m1',ordem) + espera('m1',ordem)
*            inicio('m2',ordem) + dur('m2',ordem)
         )
         - inicio('m1','pos1') ;

ocupacao2(maq) $(ord(maq) ge 3 and ord(maq) le 4) ..
        ocupa(maq) =e=
```

```
         sum(ordem $(ord(ordem) eq card(ordem)),
            inicio('m3',ordem) + dur('m3',ordem) + espera('m3',ordem)
*            inicio('m4',ordem) + dur('m4',ordem)
         )
         - inicio('m3','pos1') ;

ocupacao3(maq) $(ord(maq) ge 5 and ord(maq) le 6) ..
        ocupa(maq) =e=
         sum(ordem $(ord(ordem) eq card(ordem)),
            inicio('m5',ordem) + dur('m5',ordem) + espera('m5',ordem)
         )
         - inicio('m5','pos1') ;

ocupacao4(maq) $(ord(maq) ge 7 and ord(maq) le 8) ..
        ocupa(maq) =e=
         sum(ordem $(ord(ordem) eq card(ordem)),
            inicio('m7',ordem) + dur('m7',ordem) + espera('m7',ordem)
         )
         - inicio('m7','pos1') ;

ocupacao5(maq) $(ord(maq) ge 9 and ord(maq) le 10) ..
        ocupa(maq) =e=
         sum(ordem $(ord(ordem) eq card(ordem)),
            inicio('m9',ordem) + dur('m9',ordem) + espera('m9',ordem)
         )
         - inicio('m9','pos1') ;

* ---------------------------------------------------------------------
* restri□□es abaixo inseridas em 15/7/2014
duracao4a(maq,ordem) $(ord(maq) ge 2 and ord(ordem) lt card(ordem))..
*duracao4a(maq,ordem) ..
         ociosi(maq,ordem) =l= 0.25 + 12*y(maq,ordem);

duracao4b(maq,ordem) $(ord(maq) ge 2 and ord(ordem) lt card(ordem))..
         espera(maq,ordem) =l= 0.25 + 12*( 1 - y(maq-1,ordem+1) );

duracao5(maq,ordem) ..
         espera(maq,ordem) =g= transporte;

inicio3a(maq,ordem) $(ord(maq) < card(maq) and ord(ordem)gt 1)..
        inicio(maq+1, ordem-1)  =l=
        inicio(maq,ordem)  ;

inicio3b(maq,ordem) $(ord(maq) > 1 and ord(ordem) eq card(ordem) )..
        espaco(maq) =e= final(maq,ordem) + espera(maq,ordem) -
                        sum(maq1 $(ord(maq1) eq 1),
                           final(maq1,ordem) + espera(maq1,ordem) ) ;

inicio3c(maq,ordem) $(ord(ordem) eq 1 )..
        espaco(maq) =l= inicio(maq, ordem) ;

inicio5a(maq,ordem) $(ord(maq) = 1 and ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) =l=
*        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) + transporte =l=
        inicio(maq,ordem+1) ;

inicio5b(maq,ordem) $(ord(maq) = 3 and ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) =l=
*        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) + transporte =l=
        inicio(maq,ordem+1) ;

inicio5c(maq,ordem) $(ord(maq) = 5 and ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) =l=
*        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) + transporte =l=
        inicio(maq,ordem+1) ;

inicio5d(maq,ordem) $(ord(maq) = 7 and ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) =l=
*        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) + transporte =l=
        inicio(maq,ordem+1) ;

inicio5e(maq,ordem) $(ord(maq) = 9 and ord(ordem) < card(ordem))..
        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) =l=
*        inicio(maq+1, ordem)+ dur(maq+1,ordem) + transporte =l=
        inicio(maq,ordem+1) ;

*ordena3s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 4 ) ..
```

```
ordena3s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 3 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod1(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 and
                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 and
                            ord(ordem1) le card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) +
                sum((peca,ordem1)
*                    $(prod1(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 - card(ordem) ),
                    $(prod1(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 - card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;

*ordena4s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 4 ) ..
ordena4s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 3 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod2(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 and
                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 and
                            ord(ordem1) le card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) +
                sum((peca,ordem1)
*                    $(prod2(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 - card(ordem) ),
                    $(prod2(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 - card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;

*ordena5s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 4 ) ..
ordena5s(ordem) $(ord(ordem)gt card(ordem) - 3 ) ..
                sum((peca,ordem1)
                    $(prod3(peca) and ord(ordem1) ge ord(ordem) and
*                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 and
                            ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 and
                            ord(ordem1) le card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) +
                sum((peca,ordem1)
*                    $(prod3(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 4 - card(ordem) ),
                    $(prod3(peca) and ord(ordem1) le ord(ordem) + 3 - card(ordem) ),
                   ordem_pc(peca,ordem1) ) =l= 3
                ;
* ---------------------------------------------------------------------

Model FLOWSHOP /all/ ;
FLOWSHOP.optcr =0 ;
FLOWSHOP.limrow =7200 ;
Option Reslim=7200;

  Solve FLOWSHOP using mip minimizing objetivo1;
*  Solve FLOWSHOP using mip maximizing objetivo1;

*  Display objetivo1.l, objetivo.l, ordem_pc.l, inicio.l, espera.l, ociosi.l, oci_esp.l,
dur_max.l, ocupa.l, dur.l, TP ;
  Display objetivo1.l, objetivo.l, ordem_pc.l, inicio.l, final.l, espera.l, ociosi.l, y.l,
espaco.l, dur_max.l, ocupa.l, dur.l, TP ;


  file escreve /gams_flowshop.txt / ;
  put escreve ;

  put "Total de pe□as" /;
  put card(ordem):5:0 /;
  loop(ordem,
    put "Ordem" /;
    put ord(ordem):5:0 /;
    loop(peca $(ordem_pc.l(peca,ordem) > 0.9),
      put "Pe□a" /;
      put ord(peca):5:0 /;
      loop(maq ,
        put "maq e in□cio e fim" /;
        put ord(maq):9:0 /;
        soma=100*inicio.l(maq,ordem);
        put soma:9:0 / ;
        soma=100*(inicio.l(maq,ordem)+dur.l(maq,ordem));
        put soma:9:0 / ;
      );
    );
  );
```

```
  put "0" /;

  soma=100*objetivo.l;
*  soma=objetivo.l;
  put soma:9:0 / ;

    loop(maq,
      soma=100*ocupa.l(maq);
      put soma:9:0 / ;
    );
```

APÊNDICE B - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Teste	Condição Teste/ SEQ -->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	WS [min]	D1 [%]
Teste#1	*b mix 1/d mix1/t=0/s_bf*	C	C	H	H	F	B	F	F	F	C	H	H	H	H	76,99	21%
Teste#2	*b mix 1/d mix1/t=0,25/s_bf*	C	C	H	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	83,74	27%
Teste#3	*b mix 1a/d mix1/t=0/c_bf*	B	H	C	F	C	H	C	H	F	F	H	F	F	H	63,25	3%
Teste#4	*b mix 1a/d mix1/t=0,25/c_bf*	F	H	F	C	C	H	F	H	H	H	H	B	C	H	66,75	8%
Teste#5	*b mix 123/d mix1/t=0/s_bf*	C	C	H	H	F	F	F	F	F	B	C	H	H	H	75,72	19%
Teste#6	*b mix 123/d mix1/t=0,25/s_bf*	C	C	H	H	F	F	B	F	F	F	C	H	H	H	82,72	26%
Teste#7	*b mix 123/d mix1/t=0/c_bf*	F	H	F	F	H	C	H	F	F	C	H	B	C	H	63,95	4%
Teste#8	*b mix 1/d mix1/t=0,25/c_bf*	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45	9%
Teste#9	*b mix 123/d mix2/t=0,25/s_bf*	C	X	B	H	C	X	F	H	H	H	C	X	F	H	108,96	44%
Teste#10	*b mix 123/d mix2/t=0,25/c_bf*	B	F	H	H	C	F	X	H	H	X	C	X	H	C	95,90	36%
Teste#11	*b mix 123/d mix3/t=0,25/s_bf*	C	X	F	H	B	H	B	H	C	X	F	H	F	H	118,01	48%
Teste#12	*b mix 123/d mix3/t=0,25/c_bf*	B	B	H	H	F	F	X	C	X	H	F	H	H	C	108,37	44%
Teste#13	*b mix 123/d mix3/t=0,25/s_bf*	H	H	H	C	F	F	F	B	B	C	H	H	X	X	105,95	42%
Teste#14	*b mix 123/d mix3/t=0,25/c_bf*	B	X	H	B	H	C	F	F	H	F	H	C	X	H	82,59	26%
Teste#15	*b mix 123/d mix4/t=0,25/s_bf*	H	H	H	C	F	F	F	B	H	H	H	X	X	X	110,55	45%
Teste#16	*b mix 123a/d mix4/t=0,25/c_bf*	H	F	H	C	H	F	X	X	H	F	X	H	B	H	68,87	11%
Teste#17	*b mix 123 /d mix5/t=0,25/s_bf*	H	H	F	F	F	B	F	B	C	H	H	H	X	X	85,97	29%
Teste#18	*b mix 123/d mix5/t=0,25/c_bf*	X	X	H	F	F	H	B	C	H	F	H	F	B	H	73,87	17%
Teste#19	*b mix 123/d mix3*	X	X	H	B	B	F	F	C	H	F	C	H	H	H	66,13	8%
Teste#20	*b mix 123/d mix1*	F	H	F	H	F	B	C	C	F	F	H	H	H	C	67,92	10%
Teste#21	*b mix 123/d mix2*	H	H	F	F	H	H	C	C	X	C	X	B	X	H	84,41	28%
Teste#22	*b mix 4_6/ d mix4_6*	C	H	H	B	H	F	H	X	X	X	F	H	F	H	90,30	32%
Teste#23	*b mix 4_6/d mix4*	H	H	F	X	F	X	H	B	H	X	H	F	H	C	89,34	32%
Teste#24	*b mix 4_6/d mix5*	F	X	B	H	F	F	H	H	X	X	H	H	H	C	119,78	49%
Teste#25	*b mix 4_6/d mix6*	H	F	H	B	H	C	H	F	X	F	H	F	X	B	63,21	3%
Teste#26	*b mix 4_6/d mix6 s modif*	X	B	H	F	F	H	X	F	H	H	F	H	B	F	72,38	16%
Teste#27	*b mix 4_6/d mix6mod/t=0,25/s_c_bf*	B	H	B	H	F	F	F	X	F	H	X	H	H	F	107,21	43%
Teste#28	*b mix 2/d mix1-s_bf*	C	H	B	F	F	F	F	F	H	C	H	C	H	H	86,89	30%
Teste#29	*b mix 2/d mix1-c_bf*	C	B	H	F	F	H	F	F	H	F	C	H	C	H	79,55	23%
Teste#30	*b mix 2/d mix1-seq1*	F	H	F	H	C	F	F	H	F	B	H	C	H	C	73,30	17%
Teste#31	*b mix 2/d mix1-seq2*	C	H	C	H	F	F	H	F	F	F	H	B	H	C	74,43	18%
Teste#32	*b mix 2/d mix1-seq3*	B	C	F	H	F	F	F	H	F	C	C	H	H	H	76,51	20%
Teste#33	*b mix 1/d mix1-seq 1*	F	H	F	H	H	F	C	F	H	C	F	C	H	B	66,75	8%
Teste#34	*b mix 1/d mix1-seq 2*	C	H	B	F	C	H	C	H	F	F	H	H	F	F	66,75	8%
Teste#35	*b mix 1/d mix1-seq 3*	H	C	F	H	F	C	B	H	F	H	H	F	C	F	66,75	8%
Teste#36	*b misto 123/ d mix1-seq1*	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45	9%
Teste#37	*b misto 123/ d mix1-seq2*	H	F	C	H	F	H	F	B	F	H	F	H	C	C	67,45	9%
Teste#38	*b misto 123/ d mix1-seq3*	H	F	C	F	H	H	F	B	F	H	H	F	C	C	67,45	9%
Teste#39	*b misto 123/ d mix1-seq4*	F	F	H	C	F	B	H	F	F	C	H	H	C	H	67,45	9%
Teste#40	*b misto 123/ d mix1-seq5*	H	F	C	F	H	H	H	B	F	F	H	F	C	C	68,35	11%

Testes	Condição Teste/SEQ >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	WS [min]	D1 [%]
Teste#41	b mix2/d mix1-seq1	B	C	F	H	F	F	F	H	F	C	C	H	H	H	76,51	20%
Teste#42	b mix2/d mix1-seq2	C	F	F	H	F	F	H	F	B	C	H	C	H	H	76,51	20%
Teste#43	b mix2/d mix1-seq3	C	B	H	F	F	F	H	F	F	H	C	H	C	H	76,51	20%
Teste#44	b mix2/d mix1-seq4	B	C	F	H	F	F	F	H	F	C	H	C	H	H	76,51	20%
Teste#45	b mix2/d mix1-seq5	C	B	F	H	F	H	F	F	F	C	C	H	H	H	76,51	20%
Teste#46	b mix3/d mix1-seq1	C	F	H	F	F	F	H	F	H	B	C	H	C	H	70,30	13%
Teste#47	b mix3/d mix1-seq2	C	F	H	F	F	H	B	F	H	F	C	H	C	H	70,30	13%
Teste#48	b mix4/d mix1-seq1	C	B	H	F	F	H	F	F	H	F	C	H	C	H	79,55	23%
Teste#49	b mix4/d mix1-seq2	C	F	H	F	B	H	F	H	F	F	C	H	C	H	79,55	23%
Teste#50	b mix5/d mix1-seq1	F	H	F	H	C	F	F	H	F	B	H	C	H	C	73,30	17%
Teste#51	b mix5/d mix1-seq2	F	H	C	H	F	F	H	F	F	B	H	C	H	C	73,30	17%
Teste#52	b mix6/d mix1-seq1	C	H	C	H	F	F	H	F	F	F	H	B	H	C	74,43	18%
Teste#53	b mix6/d mix1-seq2	C	H	B	H	F	F	F	H	F	F	H	C	H	C	74,43	18%
Teste#54	b mix1/d mix2	H	H	B	X	C	H	X	F	C	F	H	C	H	X	65,42	7%
Teste#55	b mix 2/d mix2/s_bf	F	B	F	H	H	C	H	C	H	C	H	X	X	X	81,95	25%
Teste#56	b misto 123/ d mix2	X	H	H	C	X	F	H	B	H	H	C	F	C	X	61,62	1%
Teste#57	b mix2/d mix2	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	1%
Teste#58	b mix3/d mix2	H	H	C	X	F	H	B	H	F	X	C	H	C	X	63,83	4%
Teste#59	b mix4/d mix2	C	H	B	H	X	C	H	X	F	H	X	F	H	C	63,89	4%
Teste#60	b mix5/d mix2	X	C	H	F	H	F	X	B	H	C	H	C	X	H	62,71	3%
Teste#61	b mix6/d mix2	H	C	H	B	H	F	H	F	X	C	X	H	C	X	65,41	7%
Teste#62	b mix1/d mix3	H	H	B	C	H	C	X	F	F	H	H	F	B	X	65,32	6%
Teste#63	b mix2/d mix3	F	H	B	C	X	H	B	C	X	H	F	H	H	F	66,61	8%
Teste#64	b mix3/d mix3	H	B	X	B	H	F	H	F	H	F	H	C	X	C	62,81	3%
Teste#65	b mix4/d mix3	C	B	H	F	X	B	H	H	C	H	H	F	X	F	69,85	13%
Teste#66	b mix5/d mix3	C	H	H	F	X	B	X	B	H	F	H	F	H	C	62,90	3%
Teste#67	b mix6/d mix3	F	X	B	H	B	H	F	H	F	H	C	H	C	X	65,31	6%
Teste#68	b mix1/d mix4	H	H	X	F	X	C	B	X	H	F	H	H	F	H	64,98	6%
Teste#69	b mix2/d mix4	H	H	H	X	F	H	F	H	C	X	H	B	X	F	63,05	3%
Teste#70	b mix3/d mix4	H	H	X	B	X	F	H	F	H	C	H	F	H	X	65,18	6%
Teste#71	b mix4/d mix4	X	B	H	X	F	X	H	F	H	C	H	H	F	H	61,08	0%
Teste#72	b mix5/d mix4	H	H	F	H	F	H	F	X	B	H	X	C	H	X	62,59	2%
Teste#73	b mix6/d mix4	H	H	F	H	X	B	X	F	H	F	H	C	H	X	64,52	5%
Teste#74	b mix1/d mix5	H	F	H	H	F	C	H	F	X	B	B	H	F	X	65,65	7%
Teste#75	b mix2/d mix5	B	H	B	H	F	H	H	F	C	X	H	F	X	F	67,68	10%
Teste#76	b mix3/d mix5	H	F	H	B	X	F	H	F	H	C	H	F	X	B	63,51	4%
Teste#77	b mix4/d mix5	C	F	X	F	H	H	B	H	B	H	H	F	X	F	70,59	13%
Teste#78	b mix5/d mix5	F	H	F	X	B	H	C	H	B	X	F	H	F	H	63,21	3%
Teste#79	b mix6/d mix5	F	H	F	H	F	H	B	X	B	H	F	H	C	X	64,04	5%
Teste#80	b mix1/d mix6	H	H	F	X	B	H	F	X	B	F	H	F	F	H	67,12	9%
Teste#81	b mix2/d mix6	B	B	H	F	H	H	F	X	F	H	H	F	F	X	69,59	12%
Teste#82	b mix3/d mix6	H	B	X	F	H	B	H	F	H	F	X	F	H	F	64,38	5%
Teste#83	b mix4/d mix6	F	B	F	H	H	F	H	F	H	H	F	X	B	X	71,33	14%
Teste#84	b mix5/d mix6	X	B	H	F	H	F	H	F	X	F	H	F	H	B	64,45	5%
Teste#85	b mix6/d mix6	X	F	H	F	H	F	X	B	H	F	H	B	H	F	63,61	4%

APÊNDICE C - TABELA DOS TEMPOS DAS TAREFAS AGRUPADAS

Tempos das Tarefas nos Modelos de Produtos (u.t.)						63,5	34,2	0,54
Task	**F**	**B**	**C**	**H**	**X**	**μ**	**σ**	***cv***
i1	8	8	8	9	10	8,6	0,9	0,10
i2	8	8	8	25	8	11,4	7,6	0,67
i3	8	8	8	25	8	11,4	7,6	0,67
i4	82	175	146	170	97	134	42,4	0,32
i5	8	8	8	0	0	4,8	4,4	0,91
i6	132	132	195	170	146	155	27,2	0,18
i7	8	10	8	12	0	7,6	4,6	0,60
i8	0	0	0	121	0	24,2	54,1	2,24
i9	165	165	165	128	67	138	42,8	0,31
i10	163	163	163	128	65	136,4	42,7	0,31
i11	96	96	96	24	32	68,8	37,4	0,54
i12	90	90	90	23	32	65	34,4	0,53
i13	87	87	0	69	6	49,8	43,4	0,87
i14	72	72	0	69	6	43,8	37,3	0,85
i15	305	305	0	0	0	122	167,1	1,37
i16	0	0	0	69	89	31,6	43,8	1,39
i17	0	0	0	69	97	33,2	46,5	1,40
i18	150	150	0	24	32	71,2	72,9	1,02
i19	147	147	0	23	32	69,8	71,4	1,02
i20	47	47	47	0	0	28,2	25,7	0,91
i21	100	100	100	0	0	60	54,8	0,91
i22	116	116	116	0	0	69,6	63,5	0,91
i23	119	119	119	0	0	71,4	65,2	0,91
i24	35	35	35	0	0	21	19,2	0,91
i25	35	35	35	0	0	21	19,2	0,91
i26	138	138	138	0	0	82,8	75,6	0,91
i26n	0	0	0	71	0	14,2	31,8	2,24
i26a	156	156	156	0	0	93,6	85,4	0,91
i26an	0	0	0	37	63	20	28,9	1,44
i27	34	34	34	0	0	20,4	18,6	0,91
i27n	0	0	0	55	27	16,4	24,5	1,50
i28	41	41	41	10	5	27,6	18,4	0,67
i29	0	0	0	41	0	8,2	18,3	2,24
i30	0	0	0	42	64	21,2	30,1	1,42
i31	0	0	0	38	0	7,6	17,0	2,24
i32	0	0	0	42	64	21,2	30,1	1,42
i33	0	0	0	0	14	2,8	6,3	2,24
i34	0	0	0	0	10	2	4,5	2,24
i35	0	0	0	143	103	49,2	68,8	1,40
i36	24	32	24	0	0	16	15,0	0,94
i37	44	44	44	0	0	26,4	24,1	0,91
i38	0	0	0	0	23	4,6	10,3	2,24
i39	0	0	0	0	20	4	8,9	2,24
i40a	0	0	0	21	0	4,2	9,4	2,24
i40	0	0	0	20	0	4	8,9	2,24
i41	0	0	0	138	0	27,6	61,7	2,24
i42	0	0	0	120	63	36,6	54,0	1,48
i43	0	0	0	120	60	36	53,7	1,49
i44	291	291	291	291	201	273	40,2	0,15
i45	287	287	287	291	196	269,6	41,2	0,15
i46	355	355	355	272	257	318,8	49,9	0,16
i47	214	214	214	322	201	233	50,1	0,21
i47a	30	44	30	78	101	56,6	31,6	0,56
i48	106	106	106	0	85	80,6	46,0	0,57
i49	88	88	88	82	94	88	4,2	0,05
i50	98	98	98	38	34	73,2	34,0	0,46
i51	353	367	353	29	0	220,4	188,3	0,85