



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Epifânio Lucas Mula

**BALANCEAMENTO DE LINHA DE
MONTAGEM DE MODELOS MISTOS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão
Industrial orientada pelo Professor Doutor Cristóvão Silva e
apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

Julho de 2021



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Balanceamento de linhas de Montagem de Modelos Mistos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Balancing Mixed Model Assembly Lines

Autor

Epifânio Lucas Mula

Orientador

Professor Doutor Cristóvão Silva

Júri

Presidente	Professor Doutor Luís Miguel Ferreira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Cristóvão Silva Professor Associado da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Paulo Joaquim Antunes Vaz Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Viseu

Coimbra, Julho, 2021

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Lucas e Cristina, aos meus Irmãos Olêncio e Católio, a minha esposa Jéssica
António Bandze e ao meu filho Luedson Da Jéssica Mula*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por ter me dado a força para levar os meus estudos e o meu projeto avante com saúde.

Ao meu tutor Professor Doutor Cristóvão Silva, que fez o acompanhamento em todo o processo da realização e edificação desta dissertação com zelo e muita paciência, o meu muito obrigado.

Aos meus pais, esposa e filho que me apoiaram e souberam entender durante o tempo que não me fiz presente, o meu muito obrigado.

Agradecer ao Mestre Halénio Nuaila, Mestre Elias, e todo corpo administrativo do Instituto Superior Dom Bosco que tornaram possível a realização deste processo.

Aos meus colegas de turma e de estudo a minha gratidão pelo apoio ao longo dos 2 anos.

Por fim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, vai endereçado o meu muito obrigado!

Resumo

O presente trabalho fez uma abordagem de vários métodos que auxiliam na resolução de problemas de balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos. Nos capítulos iniciais faz-se uma descrição dos problemas associados ao balanceamento de linhas de montagem, de seguida descrevem-se os problemas de balanceamento associados às linhas de montagem dos modelos mistos, levando em consideração os diversos aspetos que estes podem tomar. Este estudo tem como objetivo Propor uma abordagem de diferentes métodos e heurísticas que possibilitam auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos. Em sequência são apresentadas algumas abordagens que podem ser utilizadas na resolução de problemas de balanceamento de modelos mistos, tais como: O método combinado de diagramas de precedências, este método permitiu combinar os diversos tipos de modelos de produto à partir das matrizes geradas em diferentes modelos de produto em um único diagrama de precedências. Desta forma, usou-se modelos baseados na teoria de programação, com o objetivo de automatizar a obtenção ótima das matrizes dos diferentes modelos, deste modo, gerando o diagrama combinado ótimo. Uma outra abordagem utilizada foi o método de ajustamento do tempo de processamento das tarefas está abordagem permitiu determinar ou agrupar as tarefas em função do tempo médio das tarefas distintas em mais de dois modelos, desta forma, gerando um único diagrama de precedências. As heurísticas consideradas para resolução de problemas desta natureza foram: Regra do tempo médio de processamento das operações, Heurísticas dos pesos posicionais e heurísticas COMSOAL. Desta forma, o presente estudo buscou relacionar os possíveis métodos que permitem a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos.

Palavras-chave: Linha de montagem de modelo misto,
balanceamento de linhas de montagem.
Balanceamento de modelos mistos

Abstract

The present work made an approach of several methods that help in the solution of balancing problems of assembly lines of mixed models. In the initial chapters, a description of the problems associated with the balancing of assembly lines is made, then the balancing problems associated with the assembly lines of mixed models are described, taking into account the various aspects that these can take. This study aims to propose an approach of different methods and heuristics that help to solve balancing problems in the assembly line of mixed models. In sequence, some approaches that can be used in solving mixed model balancing problems are presented, such as: The combined method of precedence diagrams, this method allowed to combine the different types of product models from the matrices generated in different models of product in a single precedence diagram. Thus, models based on programming theory were used, with the aim of automating the optimal obtainment of the matrices of the different models, thus generating the optimal combined diagram. Another approach used was the task processing time adjustment method. This approach allowed to determine or group the tasks as a function of the average time of different tasks in more than two models, thus generating a single precedence diagram. The heuristics considered for solving problems of this nature were: Rule of average processing time of operations, Heuristics of positional weights and COMSOAL heuristics. Thus, the present study sought to relate the possible methods that allow the resolution of balancing problems in mixed-model assembly lines.

Keywords Mixed model assembly line, balancing assembly lines.
Balancing Mixed Models

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas.....	xii
Siglas	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Formulação do problema	2
1.3. Objetivos de pesquisa	3
1.4. Metodologia.....	4
1.4.1. Métodos de investigação	4
1.4.2. Classificação da pesquisa	5
1.4.3. Amostra e técnicas de recolha de dados	5
2. referencial teórico.....	7
2.1. Estado da arte.....	7
2.2. Linha de Montagem.....	8
2.2.1. Modelos de linha de montagem	9
2.2.2. Configurações de linha de montagem	11
2.3. problemas de balanceamento em linhas de montagem.....	12
2.3.1. Definição de problema de balanceamento em uma linha de montagem	13
2.3.2. Problema simples de balanceamento de linha de montagem – SALBP]	16
2.3.3. Problema geral de balanceamento de linha de montagem (GALBP) e Taxonomia de linhas de montagem.....	17
2.3.3.1 Características do gráfico de precedências	18
2.3.3.2 Características das Estações e da Linha	21
2.3.3.3 Taxonomia dos objetivos.....	23
2.4. problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos.....	24
2.4.1. Balanceamento de linha de montagem de modelo misto – médio ou longo prazo	25
3. Abordagens possíveis para resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos	27
3.1. Combinação de diagrama de precedência	28
3.1.1. Descrição da aplicação informática desenvolvida para auxiliar resolução de problemas de balanceamento no método combinado de diagrama de precedências para linha de montagem de modelos mistos	32
3.1.2. tempo de processamento de tarefas ajustadas	35
3.2. Heurísticas de Balanceamento.....	35

3.2.1. Descrição da metodologia utilizada na heurística de pesos posicionais na linha de montagem de modelos mistos.....	39
3.2.2. Heurística proposta para balanceamento de linha de montagem de modelo misto 41	
3.2.3. Exemplo numérico do uso da heurística nos MALBP-1	42
4. proposta desenvolvida para resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.....	47
5. Conclusões.....	51
Referências Bibliográficas.....	54
[APÊNDICE B]	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Linha de montagem de modelo único (Becker & Scholl, 2006b)	10
Figura 2.2 - Linha de montagem multi-modelo (Becker & Scholl, 2006b)	10
Figura 2.3 – Linha de montagem de modelo misto (Becker & Scholl, 2006b)	11
Figura 2.4 - Diagrama de precedências	13
Figura 2.5 - Classificação das categorias de problemas de balanceamento (Kriengkorakot & Pianthong, 2007)	15
Figura 2.6 - Classificação dos problemas de balanceamento na linha de montagem (Kriengkorakot & Pianthong, 2007)	16
Figura 2.7 - Gráfico de precedência e a matriz de precedência equivalente (Ribeiro et al., 2013)	19
Figura 2.8 - Diagrama combinado sem arcos redundantes (a), diagrama combinado com arco redundante (b)	29
Figura 2.9 - Modelo 1 e a sua respetiva matriz de precedência	30
Figura 2.10 - Modelo 2 e a sua respetiva matriz de precedência	30
Figura 2.11 - Modelo combinado e a sua respetiva matriz combinada de precedências gerada na implementação computacional	31
Figura 2.12 -Diagrama de precedências combinado composto por dois modelos diferentes (Black, 1972).....	31
Figura 2.13 - Aspeto do primeiro écran do programa	33
Figura 2.14 - Matrizes geradas após a escolha de número de modelos que se pretende combinar.....	33
Figura 2.15 - Código desenvolvido para resolução métodos combinados de diagrama de precedências	34

Figura 2.16 - Fluxograma de heurística de pesos posicionais para balanceamento de linha de montagem de modelos mistos.....	40
Figura 2.17 - Diagrama de precedência de modelo A e B.....	42
Figura 2.18 - Diagrama de precedência resultante da combinação de modelo A e B	43

ÍNDICE DE TABELAS

tabela 2.1 - técnicas de coleta e tratamento de dados por objetivos.....	6
Tabela 2.2 - Taxonomia dos gráficos de precedência pelo atributo α_1 (Boysen et al., 2007)	19
Tabela 3.2 - Taxonomia dos gráficos de precedência pelo atributo α_5 (Boysen et al., 2007)	21
Tabela 2.4 - Taxonomia das estações da linha pelo atributo β_1 (Boysen et al., 2007)	22
Tabela 2.5 -Taxonomia das estações da linha pelo atributo β_4 (Boysen et al., 2007).....	23
Tabela 2.6 - taxonomia dos objetivos (Boysen et al., 2007)	24
Tabela 2.7 - Características do problema de teste	42
Tabela 2.8 -Tempos de processamento e pesos posicionais médios para o exemplo numérico de uma linha de modelo-misto	44
Tabela 2.9 - Heurística de pesos posicionais.....	45

SIGLAS

Siglas

ALBP – *assembly line balancing problema*

GALBP – *General Assembly Line Balancing Problem*

MALBP – *Mixed-model Assembly Line Balancing Problems*

MMD – *Multi/mixed Model Deterministic*

MMS - *Multi/mixed Model Stochastic*

MSP - *mixed model sequencing problema*

SALBP - *Simple Assembly Line Balancing Problem*

SMD - *Single-Model Deterministic*

SMS - *Single-Model Stochastic*

UALBP - *U-line balancing problem*

1. INTRODUÇÃO

O planeamento e o controlo de linhas de montagem é um problema clássico na área da Gestão Industrial e tem sido largamente investigado, dada a sua importância em vários setores industriais e, em particular na indústria automóvel. No entanto, a maioria da literatura associada a este tema foca-se na estrutura mais simples do problema: a equilibragem de linhas de montagem dedicadas à produção de um único modelo. Hoje em dia, as indústrias modernas, para sobreviver no mercado competitivo, procuram satisfazer a procura dos seus clientes com produtos de alta qualidade e altos níveis de serviço, utilizando uma abordagem *just-in-time*. Desta forma, uma das abordagens amplamente utilizadas em sistemas *just-in-time* são as linhas de montagem de modelos mistos, que montam produtos de base comum (chamados de modelo) com diferenças de tamanho, cor, material ou equipamento (Becker & Scholl, 2006a)

De acordo com (Mosadegh et al., 2012) a resolução de problemas associados com a equilibragem e o sequenciamento, ajudam o (s) tomador (es) de decisão a realizar o planeamento estratégico e tático da linha de montagem de Modelos mistos. O balanceamento da linha de montagem é um problema com um horizonte de médio prazo e consiste na atribuição de tarefas às estações de trabalho (estratégico), enquanto o sequenciamento do modelo é um problema de curto prazo de determinação de uma sequência de modelos para produção (tático).

As empresas procuram hoje desenvolver linhas de montagem de modelos mistos em que na mesma linha são produzidas diferentes variantes de um dado produto.

De acordo com (Boysen et al., 2009) *“Em uma linha de montagem de modelo misto, a aplicação de trabalhadores e máquinas flexíveis leva a uma redução substancial nos tempos e custos de preparação, de modo que produtos diferentes podem ser fabricados em conjunto em sequências de produtos misturados (tamanho de lote de um) na mesma linha. Além da disponibilidade de recursos flexíveis, os processos de produção de bens manufaturados exigem um nível mínimo de homogeneidade. Assim, geralmente existe um produto de base comum, que é personalizável pela (des) seleção de recursos opcionais de um conjunto pré-especificado de opções.”*

Assim sendo, o presente trabalho pretende propor uma abordagem de diferentes métodos e heurísticas que possibilitam auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.

1.1. Justificativa

Hoje em dia , podemos notar uma crescente evolução no que concerne, a linha de montagem para a produção em massa. Desta forma, a necessidade de otimizar estas linhas de montagem torna-se uma tarefa fundamental visando atender a constante procura do mercado por produtos com custos reduzidos, como também a flexibilidade e a eficiência durante o processo de produção.

Desta forma, o grande desafio para os gestores de produção é encontrar melhores alternativas para responder às necessidades do mercado. Portanto, o desenvolvimento de estudos ligados a resolução de problemas de equilibragem de linha de montagem de modelos mistos, visa a melhorar a flexibilidade e a eficiência em lidar com um *mix* de produtos mais amplos.

Um outro fator relevante nos dias atuais, é a customização em massa, estes por sua vez causam uma alta variabilidade de produção nos sistemas de modelos de montagem, é relevante salientar que, a customização em massa de bens ou serviços permite satisfazer as necessidades de cada cliente garantido deste modo, a satisfação ou expectativas dos clientes. Assim sendo, a aplicação das linhas de montagem multi-modelo e modelo misto, são fundamentais para atingir essa customização em massa, pois, essas linhas são capazes de alternar diferentes modelos de um mesmo produto.

1.2. Formulação do problema

Com a revisão da literatura no que tange, ao balanceamento de linha de montagem de modelos mistos, fica claro que ainda é uma tarefa desafiadora para os pesquisadores minimizar o número de estações de trabalho com o objetivo de controlar o processo de replicação e lidar com inúmeras condições que evoluem devido a complexidade inerente a natureza do processo de produção.

Por outro lado, vários pesquisadores tem investigado essa temática de forma independente, ou seja, abordagem de problemas relacionados com a equilibragem de linhas de montagem de modelos mistos (Sikora et al., 2017), (Matanachai & Yano, 2001), (Tiacci, 2015), (Lopes et al., 2020), e problemas relacionados com sequenciamento das linhas de montagem de modelos mistos (Boysen et al., 2009), (Leu et al., 1997). É relevante salientar que, estes pesquisadores fazem uma abordagem hierárquica dos problemas balanceamento e sequenciamento associados a linhas de montagem de modelos mistos.

Assim sendo, o presente trabalho de pesquisa se propõe a responder ao seguinte problema:

Como se pode aplicar métodos que permitem auxiliar a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos, fundamentado com base teórica?

1.3. Objetivos de pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

Propor uma abordagem de diferentes métodos e heurísticas que possibilitam auxiliar na resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Definir problemas associados ao balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos
- b) Apresentar uma aplicação informática que permite automatizar as matrizes de precedências de modelos mistos
- c) Demonstrar o uso das heurísticas com exemplos numéricos em problemas de balanceamento de modelos mistos
- d) Propor métodos heurísticos que permitem auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.

1.4. Metodologia

Segundo (Martelli et al., 2020) e (Gil, 2008), a metodologia é o estudo do caminho escolhido, que permite dar resposta ao problema de pesquisa. Desta forma, indica minuciosamente os procedimentos adotados na investigação, assim sendo, o presente capítulo pretende apresentar o tipo da natureza de pesquisa, os instrumentos e métodos para recolha de dados que se adequam a resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos

1.4.1. Métodos de investigação

Com vista, ao alcance dos objetivos esperados durante a pesquisa, o método proposto para responder essa necessidade é o método de pesquisa exploratório descritivo . Segundo (Gil, 2008) e (Martelli et al., 2020), este método permite ao pesquisador encontrar soluções de problemas pouco explorados, como também torna possível ao pesquisador fazer a união de vários métodos de pesquisa para atender os objetivos traçados na investigação. É relevante salientar que, este tipo de método facilita na obtenção de informações e na delimitação de dados, deste modo, orienta as informações com vista ao alcance dos objetivos esperados durante a investigação.

É relevante informar que, as informações coletadas numa primeira fase no presente estudo estão apresentadas de forma descritiva com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor, no que tange, os aspetos chaves na coleta de informação para a elaboração do presente estudo. Desta forma, foi necessário consultar banco de dados como *Sciencedirect.com*, *Scopus*, *Taylor and Francis*, *GoogleSchool* e materiais como *blog* , onde foi possível selecionar as palavras chaves de acordo com a situação atual dos estudos de problemas associados com o balanceamento e sequenciamento simultâneo de linha de montagem de modelos mistos, desta forma, selecionaram-se palavras chaves tais como: *Mixed model assembly line* AND *mixed model balancing* AND *balancing assembly lines*. No entanto, as referências geradas no ato da pesquisa são selecionadas e lidas utilizando uma técnica de investigação *Snowball*, cujo o principal objetivo desta técnica é a recuperação de publicações que não foram identificados com a utilização das palavras chave (Andr et al., 2020).

1.4.2. Classificação da pesquisa

Quanto a abordagem deste trabalho é uma pesquisa qualitativa. No que tange, ao delineamento de pesquisa, este trabalho é classificado como uma pesquisa bibliográfica. De acordo com (Gil, 2008) este tipo de pesquisa é desenvolvido por meio de informações já existentes em artigos científicos e livros. É relevante salientar que, o presente tema será fundamentado por artigos científicos que se debruçam sobre a temática em análise, pois o objetivo da pesquisa é desenvolver métodos que auxiliam na resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos. Desta forma, a presente pesquisa será desenvolvida exclusivamente a partir de fontes bibliográficas.

De acordo com (Lima & Miotto, 2007) a técnica de coleta de dados mais utilizada para esse procedimento de pesquisa é a observação de dados. Esta técnica foi amplamente usada ao longo da nossa pesquisa.

1.4.3. Amostra e técnicas de coleta de dados

A amostra deste estudo é composta por 30 artigos científicos que fazem a abordagem dos problemas associados ao balanceamento de linha de montagem de modelos mistos, desta forma, foram selecionados de acordo com os critérios de inclusão previamente estabelecidos. Estes artigos foram encontrados na base de dados tais como: *Sciencedirect.com*, *Scopus*, *Taylor and Francis*, *GoogleSchool*. É relevante referir que, observou-se a escassez de artigos científicos publicados sobre a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos, por se tratar de uma metodologia derivada da Prática Baseada em Evidências.

Quanto as técnicas de coleta de dados buscou-se fazer a seleção do material bibliográfico em função dos objetivos traçados ao longo do trabalho. Desta forma, fez-se o uso de uma análise documental e bibliográfica, com o objetivo de fazer um levantamento de todos os problemas associados ao balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos.

Na tabela 2.1 os objetivos específicos do estudo foram realizados com as técnicas de coleta de dados e o devido tratamento de dados realizados no presente estudo.

tabela 2.1 - técnicas de coleta e tratamento de dados por objetivos.

Objetivo	Atividades	Técnicas de coleta de dados	Tratamento de dados
Definir problemas associados ao balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos	Pesquisa bibliográfica dos problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos	Análise documental	Os dados foram armazenados para análise dos tipos de problemas associados ao balanceamento dos modelos mistos
Desenvolver e testar métodos, recorrendo a instâncias da literatura, que permitam equilibrar a produção em linhas de montagem de produtos mistos	Pesquisa bibliográfica dos métodos teóricos de balanceamento	Análise documental.	Os dados foram armazenados para análise dos métodos possíveis para o balanceamento na linha de montagem de modelos mistos
	Pesquisa dos métodos práticos de balanceamento	Análise documental.	
Demonstrar o uso das heurísticas com exemplos numéricos em problemas de balanceamento de modelos mistos	Pesquisa bibliográfica e desenvolver cálculos que permitem fazer resolução de problemas associados ao balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos	Análise documental	
Propor métodos heurísticos que permitem auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.	Desenvolver utilizando a linguagem VB, uma planilha que calcule o balanceamento por métodos diferentes.	Análise documental	

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo, aborda teorias que fundamentam o tema em causa, tomando em conta contribuições de vários autores que se debruçam sobre o mesmo assunto. Inicialmente, será realizada uma contextualização do tema em causa, em seguida faz-se uma, revisão teórica sobre sistemas de linha de montagem , tipos de modelos de linha de montagem, contendo uma breve explicação da sua história, aplicações, princípios de funcionamento e problemas associados em linhas de montagem de modelos mistos.

2.1. Estado da arte

Hoje em dia, as indústrias modernas, para sobreviver no mercado competitivo, procuram satisfazer uma ampla gama de procura de seus clientes com produtos de alta qualidade e altos níveis de serviço, com custos de produção muito baixos. Isso, requer a implementação de sistemas de produção flexíveis e com um custo baixo.

É de referir, que a abordagem *just-in-time* (JIT) é um dos novos sistemas de produção de renome pertencente aos Padrões de procura modernos. Uma das abordagens mais utilizadas em sistemas JIT, são as linhas de montagem de modelos mistos. Normalmente, estas linhas de montagem são empregues, onde as operações de configuração são reduzidas a tal ponto que vários modelos de um produto de base comum (chamados de modelo) podem ser fabricados em sequências misturadas. Desta forma, as linhas de modelo mistos, tornam a sequência de planeamento de produção mais eficientes (Boysen et al., 2009).

É importante notar, o avanço da literatura nos estudos de linha de montagem de modelos mistos no que concerne, a otimização do sequenciamento e balanceamento simultâneo deste modelo , com o objetivo de acelerar a resposta das empresas no mercado e satisfazer a necessidades individuais do cliente (Zhou & Zhu, 2020).

Sendo assim, a necessidade de compreender o ambiente industrial e as soluções encontradas até agora, é fundamental explorar, o conhecimento de sistemas de linha de montagem e todos os fatores que podem estar relacionados com as mesmas. Os tipos de

configurações das linhas de montagem, tarefas que podem ser atribuídas aos postos de trabalho, de modo, a garantir um balanceamento adequado das tarefas, como responder a constante evolução da flexibilidade do mercado. Também será fundamental, revisar problemas de sequenciamento e balanceamento em sistemas de linha de montagem de acordo com vários métodos de resolução de problemas em linhas de montagem.

2.2. Linha de Montagem

De acordo com o princípio de *Henry Ford*, as linhas de montagem foram desenvolvidas para uma produção em massa, com custo eficiente de um único produto padronizado. Segundo *Henry Ford*, o objetivo passava por desenvolver um método consistente em que cada tarefa tinha um tempo X para ser realizada, como também, adaptação de serviços com peças intercambiáveis.

Entretanto, os princípios de *Henry Ford*, quanto ao sistema de produção mudaram drasticamente. É de salientar que, a essência da ideia permanece a mesma até aos dias de hoje, no entanto, passou por adaptações tecnológicas que ajudaram a tornar os processos de montagem mais flexíveis e eficientes.

Podemos verificar que quase todas as indústrias do mundo trabalham com linhas de montagem de diversos modelos, que usam tecnologias que permitem tornar o trabalho dos operários mais cómodo. É comum encontrar equipamentos ou máquinas junto aos operadores, tais como: braços mecânicos e computadores que executam tarefas mais complexas e com maior precisão.

o crescimento da robotização e informatização, apontam as novas tendências de sistemas de linha de montagem. Desta forma, têm se observado que as tecnologias são desenvolvidas com objetivo de otimizar os processos produtivos, tornando-os mais flexíveis e eficientes.

De acordo com (Becker & Scholl, 2006a) citado por (Lopes et al., 2020) “As linhas de montagem são layouts orientados ao produto, nos quais os produtos (ou peças) se movem pelas estações de trabalho na linha de maneira sequencial. Em cada estação de trabalho, um conjunto de tarefas é executado antes que as tarefas da próxima estação de trabalho possam começar. Um importante problema de decisão relacionado ao gerenciamento de tais linhas é equilibrar a distribuição de tarefas entre as estações”

A linha de montagem é um sistema de produção orientado para o fluxo, no qual as unidades que realizam as operações são chamadas de estação. Em cada estação, as atividades são realizadas repetidamente. Uma estação de trabalho pode, na melhor das hipóteses, conter, um único produto para montar e um trabalhador para realizar uma ou mais operações. As operações estão geralmente, sujeitas a restrições de precedência (Becker & Scholl, 2006a).

A linha de montagem consiste em postos de trabalhos, dispostos ao longo de uma correia transportadora, onde os trabalhos são lançados consecutivamente na linha e são movidas de uma estação para outra. O tempo de montagem varia de operador para operador, e o produto acabado na ultima estação sai da linha (Becker & Scholl, 2006a).

Instalar uma linha de montagem envolve decisões de longo prazo e investimentos altos de capitais, portanto, é importante que tal sistema seja flexível. Desta forma, permitindo que a linha possa ser reequilibrada periodicamente, tornando-a mais eficiente possível.

2.2.1. Modelos de linha de montagem

Desde os primeiros tempos de *Henry Ford*, as linhas de montagem foram construídas em torno da combinação das métricas de performance (*takt time*, *cycle time* e *lead time*). O *takt time* representa o ritmo de produção necessário para atender a um determinado nível de procura, dadas as restrições de capacidade da linha ou célula, o *cycle time* representa o tempo de execução das operações na máquina ou estação mais lenta, ou seja, é o ritmo máximo possível de produção sob as condições atuais, o *lead time* representa o tempo necessário de produção para atender à procura do mercado. Desta forma, a quantidade de unidades de produto a serem montadas em cada período segue um plano de produção adequado (Alvarez & Antunes Jr., 2001). Quanto ao número de produtos as linhas podem ser classificadas em três tipos a saber: linha de montagem de modelo único, linha de montagem multi-modelo ou linha de montagem de modelo misto.

A linha de montagem de modelo único consiste em produzir um único produto (**figura 2.1**), desta forma, é limitada a produzir uma variante. É usada principalmente para a produção em massa de um produto homogêneo. Normalmente, este modelo é empregue onde as tarefas têm um tempo determinístico e a carga de trabalho é constante ao longo da linha,

entretanto, este modelo é vantajoso quando a procura é estável e a entrega precisa ser mais rápida (Håkansson & Skoog, 2008)



Figura 2.1 - Linha de montagem de modelo único (Becker & Scholl, 2006b)

As linhas de montagem multi-modelo são geralmente usadas para montagem de dois ou mais modelos diferentes do mesmo produto (**figura 2.2**), ou seja, produtos da mesma família que apresentam variações significativas. Onde os itens de produção se alteram de modelo para modelo continuamente na linha de montagem. Este tipo de modelo apresenta vantagens para produtos com procura estável e o tempo de preparação para troca de produto é curto. Nesse tipo de sistema os produtos entram na linha em lotes, assim, os problemas associados ocorrem em termos de programação e dimensionamento de lotes (Håkansson & Skoog, 2008)

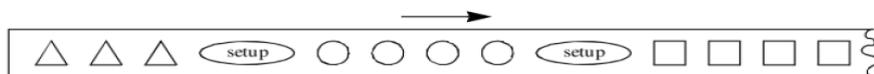


Figura 2.2 - Linha de montagem multi-modelo (Becker & Scholl, 2006b)

As Linhas de montagem de modelo misto são geralmente usadas para montagem de um conjunto diferenciado de produtos (**figura 2.3**), ou seja, os produtos têm uma base comum e as diferenças entre os modelos são opcionais, por exemplo, teto solar manual ou elétrico para um automóvel (Mosadegh et al., 2012). Os modelos mistos fornecem um fluxo eficiente e contínuo de matérias, possibilitam níveis de estoque reduzidos de itens finais e flexibilidade com relação a mudanças de modelo. Essas linhas são vantajosas quando os produtos são bastante semelhantes, o que leva aos mesmos recursos para a montagem de todos os produtos. Desta forma, essa linha é usada quando existem tempos de *setup* muito curto (Håkansson & Skoog, 2008).



Figura 2.3 – Linha de montagem de modelo misto (Becker & Scholl, 2006b)

Alguns autores tais como (Boysen et al., 2008) classificam as linhas de montagem quanto ao movimento de produto. Onde, podemos encontrar três (3) tipos de linha a saber:

Linha compassada: é um sistema de produção de montagem com ritmo, onde os produtos tem um avanço contínuo na linha, normalmente o tempo de ciclo é comum para todos os produtos. Este ritmo é mantido por um avanço de materiais dispostos numa correia transportadora e com uma velocidade constante, permitindo assim que os operadores possam executar a montagem dos materiais a um ritmo constante.

Linha descompassada síncrona: este tipo de linha é usual em montagem de dois ou mais produtos da mesma família (multi-modelos), entretanto, esta linha obedece duas condições, isto é, quando o tempo das tarefas é determinístico, os produtos têm um avanço intermitente, já que o tempo de ciclo é determinado pela estação mais lenta. Quando é estocástico os produtos podem avançar sem que necessariamente exista um intervalo de tempo fixo. Desta forma, os produtos são transferidos para a próxima estação ao mesmo tempo, por uma correia, quando todos os postos de trabalho terminam as tarefas.

Linha descompassada assíncrona: este tipo de linha é usual em montagem de um conjunto diferenciado de produtos (modelos mistos), normalmente os produtos têm um avanço intermitente na linha, também é relevante salientar que, neste tipo de linha é necessário fazer instalação de um *buffer* com o objetivo de minimizar os tempos de espera, desta forma, os buffers só podem ser usados para compensar os desvios temporários nos tempos das tarefas.

2.2.2. Configurações de linha de montagem

Normalmente, o *layout* dos sistemas de produção são determinados pelo fluxo de materiais. No entanto, a configuração física numa linha de montagem pode comprometer diretamente a sua eficiência bem como os seus custos. Um outro fator relevante na linha de montagem é o desempenho, este que por sua vez pode ser melhorado reduzindo as distâncias entre as estações de trabalho. Portanto, podemos salientar que o ponto crítico na decisão do layout é a análise preliminar do produto (Becker & Scholl, 2006a).

Desta forma, podemos encontrar linhas configuradas em série, cujo o layout da linha é organizada em varias estações conectadas por uma correia transportadora. Sendo que, este *layout* é o mais tradicional no que tange, a linhas de montagem.

Para (Araújo et al., 2015) a configuração de linhas de montagem paralelas permite aumentar a flexibilidade e a eficiência durante o processo produtivo, deste modo, reduzem-se os tempos ociosos. O *layout* desta linha tem a vantagem de permitir uma fácil adaptação à procura pela mudança do número de linhas em funcionamento. Uma outra vantagem, esta ligada no seu processo de produção, isto é , a falha de uma linha não paralisa a produção. No entanto, o seu investimento é elevado no que tange aos equipamentos que compõem a linha.

Segundo (Silva et al., 2014) a introdução do princípio de produção *just in time* impulsionou a criação de configuração de linhas de montagem em formato U, esta configuração trás vantagens em relação a configuração tradicional. Porque permite ter menos trabalhadores devido à configuração da linha, o início e o fim estão praticamente juntos, o que facilita a mobilidade dos trabalhadores no processo de produção.

2.3. problemas de balanceamento em linhas de montagem

de acordo com (Kriengkorakot & Pianthong, 2007), o problema de balanceamento em linhas de montagem (*assembly line balancing problem – ALBP*) refere-se atribuição de tarefas em uma sequência lógica na montagem de um determinado artigo em uma linha de montagem, tomando em consideração as relações de precedências entre as tarefas, permitindo deste modo, que algumas medidas de desempenho possam ser otimizadas. Desta forma, podemos minimizar os tempos mortos ou minimizar o número de estações.

é relevante salientar que, vários autores tem vindo a pesquisar os problemas associados com o balanceamento em linha de montagem, desde o primeiro artigo publicado por *Salveson* em 1955, cujo o objetivo passava por resolver problemas de balanceamento em linha de montagem por meio de programação linear, devido a complexidade do problema que se enquadra na classe difícil NP de problemas de otimização combinatória . No entanto,

nos dias de hoje, tem-se desenvolvido algoritmos ou heurísticas eficientes para a obtenção de soluções ótimas em computadores (Kriengkorakot & Pianthong, 2007)

para (Becker & Scholl, 2006a) o problema de balanceamento em uma linha de montagem, esta ligado a (re-) configuração na distribuição de carga de trabalho total de todas as operações durante a fabricação de um determinado artigo a ser montado entre estações de trabalho ao longo da linha. No entanto, os autores focam em dois (2) principais problemas de balanceamento a saber: balanceamento de linha de montagem simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP) e balanceamento generalizado de linha de montagem (*General Assembly Line Balancing Problem* – GALBP) .

2.3.1. Definição de problema de balanceamento em uma linha de montagem

pode-se afirmar que, o problema de balanceamento da linha consiste em balancear otimamente o trabalho, deste modo, estabelecendo um ritmo adequado na montagem entre as estações de um determinado artigo. Desta forma, a quantidade total de trabalho essencial para montar uma peça é dividido em um conjunto $A = \{1, \dots, N\}$ de operações elementares designadas por tarefas. Portanto, realizar a tarefa i implica um tempo t_i , desta forma, é necessário ter um conjunto de equipamentos, máquinas ou operadores devidamente balanceados. A carga total de trabalho essencial para a montagem de uma peça é medida pela soma dos tempos das tarefas $\sum t_i$, e esses elementos ou tarefas podem ser representadas por um digrama de precedências **figura 2.4**. (Kriengkorakot & Pianthong, 2007)

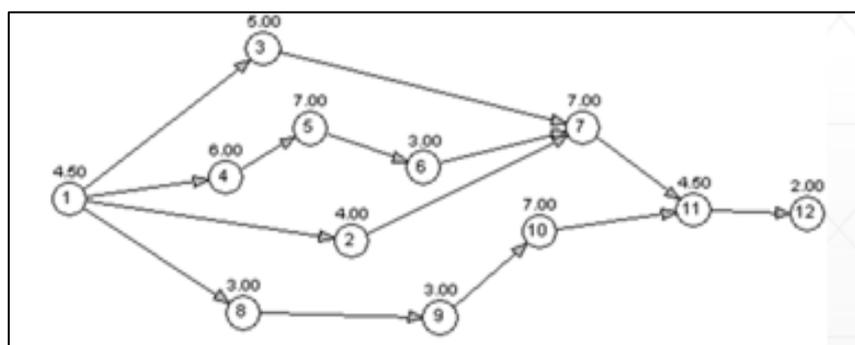


Figura 2.4 - Diagrama de precedências

Como podemos observar na figura acima, o diagrama de precedências contém um nó para cada tarefa e os arcos representam as restrições de precedência. É relevante salientar que, o diagrama de precedências acima apresenta contém doze tarefas ($n = 12$) com tempos de processamento entre 1-12 unidades de tempo. No entanto, há uma condição muito importante durante o balanceamento das linhas de montagem, isto é, a atribuição de tarefas às estações, deve garantir que nenhuma relação de precedência seja violada.

Os problemas de balanceamento em linha de montagem – ALBP, podem ser classificados em quatro (4) categorias segundo (Erel & Sarin, 1998), determinístico de modelo único (*Single-Model Deterministic* -SMD), estocástico de modelo único (*Single-Model Stochastic*- SMS), determinístico de modelo múltiplo / misto (*Multi/mixed Model Deterministic*- MMD) e estocástico de modelo múltiplo / misto (*Multi/mixed Model Stochastic*- MMS). A versão SMD do problema aplica-se a linhas de montagem de modelo único onde os tempos de execução da tarefa são constantes e conhecidas. A categoria SMS introduz a variabilidade no tempo da tarefa. No entanto, esta é a versão realística das linhas de montagem manuais, onde os tempos de execução das tarefas raramente são constantes, como também a variabilidade dos tempos das tarefas podem ser bastante grandes em relação às suas médias. No que concerne, a versão MMD do problema está associado a produção de mais de um item em uma única linha.

É relevante salientar que, normalmente as linhas de montagem multi-modelos produzem dois ou mais tipos semelhantes de itens produzidos separadamente em lotes, ao contrário das linhas de modelo misto, estes produzem dois ou mais itens semelhantes simultaneamente. E a categoria MMS é a versão mais complexa do problema para analisar. A **figura 2.5** mostra a classificação das quatro categorias de problemas de balanceamento em linha de montagem

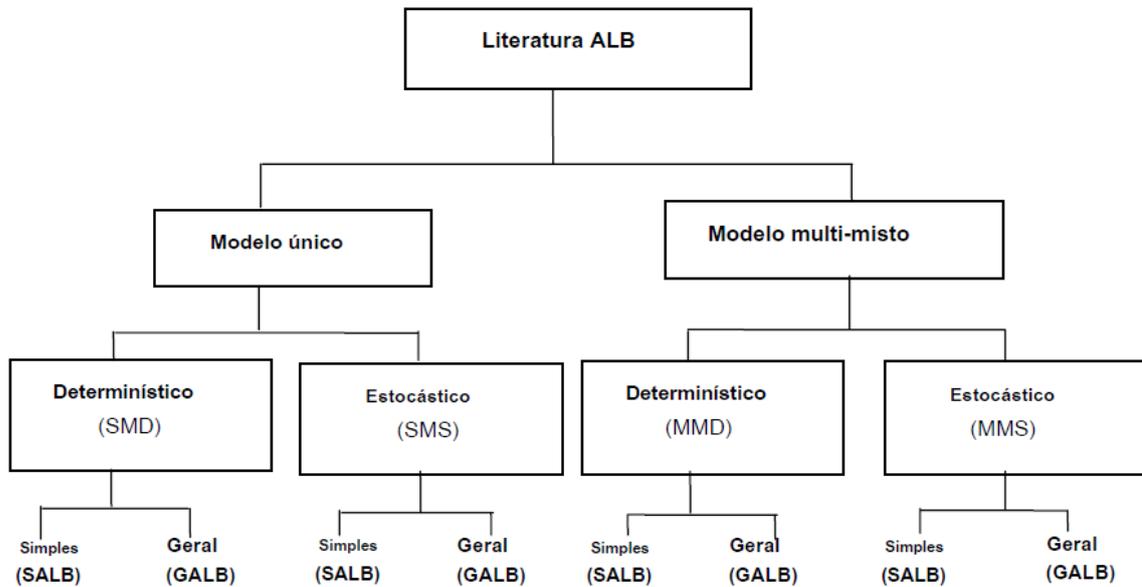


Figura 2.5 - Classificação das categorias de problemas de balanceamento (Kriengkorakot & Pianthong, 2007)

(Becker & Scholl, 2006a) classificaram os problemas de balanceamento de linhas de montagem em duas vertentes: balanceamento de linha de montagem simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP) e balanceamento generalizado de linha de montagem (*General Assembly Line Balancing Problem* – GALBP), como podemos observar na **figura 2.6**, que mostra a classificação e os respectivos problemas associados as duas vertentes.

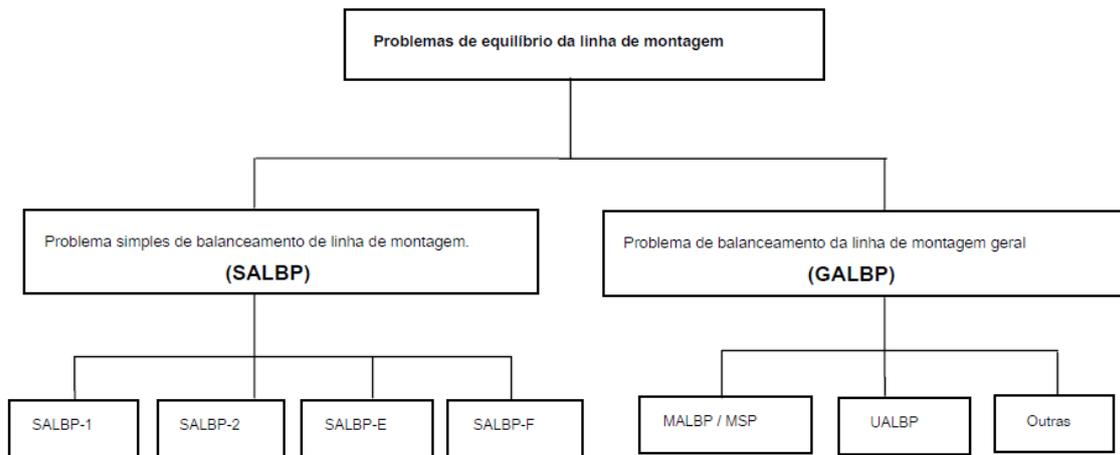


Figura 2.6 - Classificação dos problemas de balanceamento na linha de montagem (Kriengkarakot & Pianthong, 2007)

].

2.3.2. Problema simples de balanceamento de linha de montagem – SALBP]

Normalmente o problema de balanceamento de linha de montagem simples ocorre em linhas de montagem de modelo único, onde apenas restrições de precedência entre as tarefas são consideradas, os tempos de processamento são determinísticos, a linha de montagem de um tempo de ciclo fixo e a linha tem uma implantação em série, onde os operadores trabalham apenas de um lado (Becker & Scholl, 2006b).

De acordo com (Becker & Scholl, 2006a) citado por (Kriengkarakot & Pianthong, 2007) O problema SALBP-1 “consiste em atribuir tarefas e estações de trabalho tais que o número de estações (m) é minimizado para uma determinada taxa de produção (tempo de ciclo, C)”

O problema SALBP-2 “consiste em minimizar o tempo de ciclo (maximizar a taxa de produção) para um determinado número de estações (m)”

O problema SALBP-E “é a versão do problema mais geral maximizando a eficiência da linha (E) assim minimizando simultaneamente c e m considerando sua inter-relação.”

O problema SALBP- F “ é um problema de viabilidade que consiste em estabelecer se uma linha é viável ou não. O balanceamento existe para determinar a combinação de m e c ”

2.3.3. Problema geral de balanceamento de linha de montagem (GALBP) e Taxonomia de linhas de montagem

Os problemas generalizados de balanceamento de linha de montagem, demonstram a evolução na formulação de soluções para resolver problemas relacionados, pois, esta classe de problemas é mais extensa. Entretanto, este tipo de problemas contempla as questões mais relevantes na prática. Desta forma, engloba diferentes características de configuração de linhas de montagem e produção de modelos mistos (Becker & Scholl, 2006b).

Segundo (Kriengkorakot & Pianthong, 2007) os problemas generalizados de balanceamento de linha de montagem incluem problemas de balanceamento de linha de montagem de modelos mistos (*Mixed-model Assembly Line Balancing Problems* – MALBP) e problemas de balanceamento de linha de montagem em U (*U-line balancing problem* – UALBP). Os problemas relacionados com o balanceamento de linha de montagem de modelo misto é o fator de distribuição das tarefas às estações de acordo com os tempos das tarefas para diferentes modelos sujeitos a um número adequado de estações e o seu tempo ciclo para a montagem, como também, permitir que a linha seja orientado para custos otimizados. É relevante salientar que, este problema é mais difícil de resolver em relação ao modelo único, isto, porque os tempos de estação das diferentes variantes devem ser suavizados para cada estação (balanceamento horizontal; Becker & Scholl, 2006b). Assim sendo, se o balanceamento horizontal funcionar em melhores condições, teremos melhores soluções possíveis em curto prazo.

Um outro tipo de problema no balanceamento generalizado na linha de montagem é o problema de sequenciamento de modelo misto (*mixed model sequencing problema* – MSP), cuja sequência de todas as unidades dos modelos a serem produzidos devem ser sequenciadas de forma que as ineficiências (sobrecarga de trabalho, paralisação da linha, reparo off-line etc) sejam minimizadas (Erel & Sarin, 1998).

No que tange, a problemas de balanceamento de linha de montagem em U podemos verificar relações com problemas ligados a SALBP, o que difere uma da outra e a configuração, no modelo em U o trabalhador pode efetuar operações simultaneamente em duas estações (pode trabalhar em qualquer um dos lados do U), no entanto, destacam-se três problemas fundamentais neste tipo de linha a saber: UALBP-1 este problema envolve minimizar o número de estações (m) de acordo com o tempo de ciclo (c) conhecido, UALBP-2 este problema envolve minimizar o tempo de ciclo (c) de acordo com o número de estações (m) e por ultimo temos UALBP-E este problema envolve maximizar a eficiência da linha (E) para o tempo de ciclo (c) e o número de estações (m) sendo variáveis (Becker & Scholl, 2006b).

(Boysen et al., 2007) fizeram um estudo mais aprofundado dos GALBP, e agruparam esses problemas construindo uma taxonomia, baseando-se nas teorias de Graham 1979, este por sua vez, utilizou um cronograma para organizar todas as operações de máquina. Segundo estes autores salientam que, qualquer problema de balanceamento de linha de montagem é constituído por três (3) elementos básicos: características do gráfico de precedências (α) – que compreende todas as tarefas e recursos a serem atribuídos, características da linha ou estações (β) - estes compõem a linha e para a qual essas tarefas são atribuídas e objetivos (γ)- o que se pretende otimizar. Sendo que, para cada elemento os autores descreveram uma série de restrições possíveis (α, β, γ).

2.3.3.1 Características do gráfico de precedências

De acordo com (Boysen et al., 2007) as características de um gráfico de precedências podem ser representadas por seis atributos

- Gráficos de precedência específicos para os produtos (α_1).
- Estrutura do gráfico de precedência (α_2).
- Tempos de processamento (α_3).
- Incremento de tempo de processamento das tarefas dependente da sequência (α_4).
- Restrições de alocação (α_5).
- Alternativas de processamento (α_6)

Os gráficos de precedências específicos para produtos (α_1) podem ser classificados em três atributos, de acordo com a tabela 2.1. os autores defendem que o atributo é determinado pela quantidade de produtos fabricos, ao contrario do balanceamento este por sua vez é afetado de cordo com o nível de homogeneidade entre os gráficos de precedência(Boysen et al., 2007). Autores como (Thomopoulos, 1970) fizeram a introdução de estudos dos modelos mistos ($\alpha_1 = mix$), cujo a principal contribuição deste autor foi a possibilidade de unir diferentes diagramas de precedências em um único diagrama, evitando deste modo, a desigualdade da quantidade de trabalho ao longo da linha.

Tabela 2.2 - Taxonomia dos gráficos de precedência pelo atributo α_1 (Boysen et al., 2007)

Gráficos de precedência específicos para os produtos	
$\alpha_1 = mix$	Produção de modelos mistos
$\alpha_1 = multi$	Produção multi-modelo
$\alpha_1 = \circ$	Produção de modelo único

É relevante salientar que, a união dos gráficos de precedência só devem ser realizados caso não exista conflitos de precedências entre os modelos, isto é, se um modelo necessita que a tarefa X seja realizada antes Y, neste caso nenhum outro modelo deve realizar a tarefa Y antes da tarefa X (Gökçen & Erel, 1998).

Para construir um diagrama combinado de precedências pode recorrer-se às matrizes de precedências de cada um dos modelos, conforme se mostrará mais adiante neste documento a figura 2.7, mostra como se passa de um diagrama de precedências para a respectiva matriz de precedências. A matriz é representada pelos valores 1 caso tenha uma tarefa precedente e 0 caso contrário

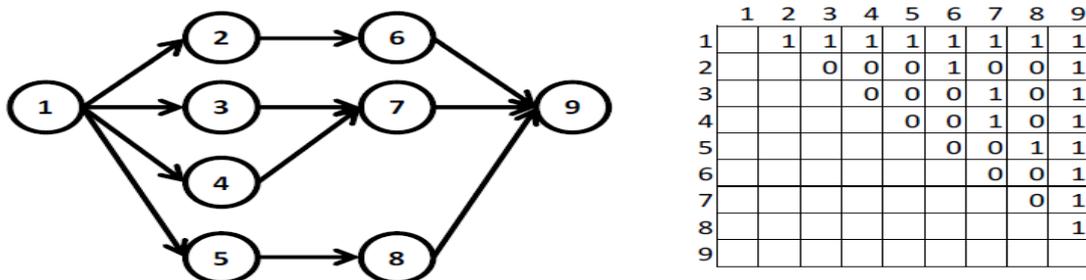


Figura 2.7 - Gráfico de precedência e a matriz de precedência equivalente (Ribeiro et al., 2013)

Um fator relevante na construção de diagrama combinado de precedências está diretamente ligado com os tempos de processamento equivalentes, cujo cálculo é efetuado à partir da taxa de produção de cada modelo em um determinado período de tempo. No entanto, o somatório da taxa de produção de todos modelos tem que ser igual a um (1). Desta forma, deve-se multiplicar o tempo de execução da tarefa de cada modelo pelo percentual da procura do modelo e fazer o somatório para cada tarefa, desta forma, obtemos os tempos equivalentes (Ribeiro et al., 2013).

Quanto a estrutura dos gráficos de precedência (α_2), estes podem ter estruturas acíclica ($\alpha_2 = \circ$) ou podem ser restringidas para estruturas especiais ($\alpha_2 = \text{spec}$), apresentando-se por vezes de forma linear, divergente ou convergentes. Quando pretendemos desenvolver algoritmos específicos mais eficientes usamos normalmente estruturais especiais (Boysen et al., 2007).

No que concerne a divisão dos tempos de processamento (α_3) pode-se referir que, quando as tarefas são mais simples ou automatizadas, pode-se assumir que estas não apresentam variações e os tempos propostos são determinísticos ($\alpha_3 = \circ$). Quando apresentam variações e um elevado grau de instabilidade causados pela intervenção do homem devido aos aspetos como: velocidade do trabalho, habilidade e motivação, normalmente nestes casos empregam-se tempos estocásticos ($\alpha_3 = t^{sto}$). Quando pretendemos fazer melhorias sucessivas no processo, tendo em conta, as curvas de aprendizagem normalmente são empregues tempos dinâmicos ($\alpha_3 = t_{dy}$) (Becker & Scholl, 2006a)

Uma outra característica é o incremento de tempo de processamento das tarefas dependente da sequência (α_4), este tempo pode ocorrer de maneira direta ($\alpha_4 = \Delta t_{dir}$) quando existem atividades que envolvem *setup* (troca de ferramentas). Também podem ocorrer de forma indireta ($\alpha_4 = \Delta t_{indir}$), quando existem atividades que colocam em causa a ergonomia dos trabalhadores.

Quanto as restrições de alocação (α_5), pode-se referir que estes tem objetivo de limitar associação entre as tarefas e estações de trabalho. A tabela 2.2 faz um resumo das restrições de alocação existentes em gráficos de precedência.

Tabela 3.2 - Taxonomia dos gráficos de precedência pelo atributo α_5 (Boysen et al., 2007)

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

O último atributo de gráfico de precedências refere-se a alternativas de processamento (α_6), essas alternativas de processamento permitem gerar escolhas adicionais. Desta forma, as alternativas de processamento somente podem mudar os tempos de processamento o que torna os custos alterados ($\alpha_6 = pa^\circ$), e essa mudança também afeta as relações de precedências, isto é, as restrições de precedência são alteradas ($\alpha_6 = pa^{\text{prec}}$) (Boysen et al., 2007).”

2.3.3.2 Características das Estações e da Linha

Segundo (Boysen et al., 2007) as estações e os seus respectivos arranjos na linha de montagem podem ser apresentados por seis atributos.

- Movimento dos produtos (β_1).
- *Layout* da linha (β_2).
- Paralelismo (β_3).
- Alocação de recursos (β_4).
- Estação sujeita a incrementos no tempo de processamento (β_5).
- Aspectos adicionais da configuração da linha (β_6).

Um fator que afeta o balanceamento de linha é a movimentação de produtos (β_1), esta movimentação de produtos pode variar de acordo com o tipo de linha de montagem, onde temos: Linhas compassada, descompassada síncrona e descompassada assíncrona, cujo estas linhas já foram referenciadas quanto ao principio de funcionamento na secção 2.2.2. A tabela 2.3 faz um breve resumo das possíveis restrições que podemos encontrar em movimentação de produtos.

Tabela 2.4 - Taxonomia das estações da linha pelo atributo β_1 (Boysen et al., 2007)

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

Quanto ao *layout* da linha, este também foi referenciado na secção 2.2.2, quanto ao seu principio de funcionamento. Podemos dividi-las em três divisões a saber: quando a linha tem um formato em U ($\beta_2 = u^\circ$), devemos procurar analisar por quantos Us as linhas são formadas ($\beta_2 = u^n$). um fator relevante na adoção deste tipo de *layout* é o facto de permitir um balanceamento estável e eficiente, pois oferece um número maior de combinações de tarefas e estação de trabalho (Becker & Scholl, 2006a).

No que concerne a linha e estações paralelas, podemos encontrar tarefas paralelas ($\beta_3 = \text{ptask}\lambda$) - que podem ser distribuídas por mais de uma estação de trabalho. Estações com locais de trabalho paralelo ($\beta_3 = \text{pwork}\lambda$) – essas estações permitem agregar mais de um operário que possam trabalhar no mesmo produto simultaneamente (Boysen et al., 2007)

Quanto a alocação de recursos (β_4) que está diretamente ligada ao sistema flexível de produção em uma linha de montagem onde podemos encontrar máquinas, ferramentas, capacidade tecnológica que permitem executar certas atividades. Nestes casos o problema de balanceamento esta diretamente relacionado com os problemas de seleção dos equipamentos

(Boysen et al., 2007). A tabela 2.4 faz um breve resumo dos possíveis problemas encontrados na alocação de recursos (β_4).

Tabela 2.5 -Taxonomia das estações da linha pelo atributo β_4 (Boysen et al., 2007)

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

Os aspetos adicionais na configuração da linha (β_6) estão diretamente ligados ao sistema de produção. Em caso de Buffer de ($\beta_6 = \text{buffer}$) - os estoques devem ser alocados e dimensionados, em casos de linha secundária que abastecem a linha principal ($\beta_6 = \text{feeder}$) – estes devem ser balanceados simultaneamente. Em casos de caixas de material ($\beta_6 = \text{mat}$) - devem ser posicionados e dimensionados. Em casos que a tarefa necessita que o produto seja colocado em uma determinada posição ($\beta_6 = \text{change}$), as decisões devem ser tomadas previamente no que concerne a posição da máquina (fixa ou móvel) (Boysen et al., 2007)

2.3.3.3 Taxonomia dos objetivos

A tabela 2.5 faz um breve resumo dos objetivos pretendidos quando otimizamos o balanceamento da linha de montagem, com vista ao alcance de soluções ótimas.

Tabela 2.6 - taxonomia dos objetivos (Boysen et al., 2007)

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

2.4. problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos

É importante referir, que os problemas na linha de montagem de modelos mistos, ocorrem em diferentes horizontes de planeamento. Deste modo, as decisões devem ser tomadas no aspeto de longo prazo ou curto prazo, por ex. decisões relativas a instalação da linha e divisão de mão-de-obra entre as estações. É de salientar que, os problemas de curto prazo dizem respeito ao sequenciamento e os problemas de medio ou longo prazo dizem respeito a equilibragem de linha (Håkansson & Skoog, 2008).

No entanto, vários estudos investigaram ambos os problemas de uma maneira hierárquica ou simultaneamente, desta forma, pode-se afirmar que, a forma hierárquica é a resolução de problemas de balanceamento e depois, com base nos resultados coletados, faz-se o sequenciamento para determinar melhor sequência dos modelos. No entanto, atualmente, com o avanço da pesquisa, faz-se uma abordagem simultânea de resolução de problemas de sequenciamento e balanceamento numa linha de montagem de modelos

mistos. É importante referir que, a abordagem simultânea resulta em melhores soluções em relação à abordagem hierárquica, principalmente quando a alocação de tarefas às estações não requer despesas como custos de *setup* (Mosadegh et al., 2012)

Em suma, um problema de balanceamento de linha de montagem de modelo misto pode ser declarado da seguinte forma: P modelos, o conjunto de tarefas e um tempo de ciclo associado a cada modelo, os tempos de desempenho das tarefas e o conjunto de relações de precedência que especificam as ordenações permitidas das tarefas para cada modelo, o problema é atribuir as tarefas a um sequência de estações de modo que as relações de precedência sejam satisfeitas e alguma medida de desempenho seja otimizada (Gökçen & Ereil, 1998)

2.4.1. Balanceamento de linha de montagem de modelo misto – médio ou longo prazo

O Balanceamento de modelo misto, visa evitar ineficiências e reduz os tempos de variantes para cada estação. Normalmente a equilibragem de linha esta sujeito a decisões estratégicas, porque dizem respeito à instalação da linha e não a questões operacionais. A equilibragem permite fazer um estudo de tarefas predecessoras, ou seja, permite construir um diagrama e matriz de precedências, onde, o diagrama de precedências é mais visual, e a matriz facilita os cálculos de equilibragem.

Existem duas abordagens fundamentais para resolução de problemas de balanceamento de linha de montagem de modelo misto (*Mixed-model Assembly Line Balancing Problems* – MALBP) de acordo com (Håkansson & Skoog, 2008).

Redução para problemas de modelo único: Desta forma, certos dados do modelo misto podem ser simplificados e transformados em Problema de Balanceamento de Linha de Montagem Simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP), isto é, processar todas as tarefas de um determinado modo, e a sequência de processamento de tarefas deve seguir as restrições de precedência. No entanto, esta redução pode ser feita por meio de cálculos ou suposições relaxadas.

Balanceamento horizontal: Nestes casos, podemos ter algumas ineficiências na linha, devido ao método de medição dos tempos de ciclos. Causando, deste modo, um tempo improdutivo para todas as estações. Desta forma, propõem-se o uso de heurísticas e outros procedimentos matemáticos, visando a reduzir o desequilíbrio horizontal.

Segundo (Scholl,1999) citado por (Håkansson & Skoog, 2008) “*resume quatro problemas de linha de montagem de modelos mistos (MALBPs). O primeiro, chamado MALBP-F, verifica a viabilidade (F- feasibility) do problema para um dado tempo de ciclo e número de estações. O MALBP-1 minimiza o número de estações para um tempo de ciclo dado, e por sua vez o MALBP-2 minimiza o tempo de ciclo para um determinado número de estações. o MALBP-E é o problema mais geral, maximizando a eficiência (E – efficiency) da linha, minimizando tempo de ciclo e número de estações.*”

3. ABORDAGENS POSSÍVEIS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE BALANCEAMENTO EM LINHAS DE MONTAGEM DE MODELOS MISTOS

A abordagem para a resolução do problema de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos pode passar pela combinação dos vários diagramas de precedência, num diagrama de precedências combinado, que permitirá utilizar abordagens para a resolução de problemas de modelo único. Uma outra abordagem após a combinação de diagrama de precedências é o ajustamento dos tempos de processamento de cada tarefa. (Van Zante-De Fokkert & De Kok, 1997) refere que, em uma linha de modelo misto cada modelo tem o seu próprio diagrama de precedências e o balanceamento das tarefas não devem violar as ordens do diagrama de precedências.

De acordo com (Black, 1972) e (Van Zante-De Fokkert & De Kok, 1997) existem dois passos para resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos a saber:

O primeiro passo envolve a combinação dos diagramas de precedências dos diferentes modelos em apenas um único diagrama. Esse último diagrama, é chamado diagrama de precedências combinado. Durante a combinação de diagramas de precedência é necessário fazer o ajustamento dos tempos de processamento de cada tarefa

O segundo passo envolve fazer a equilibragem tendo em conta o diagrama de precedências combinado com os tempos de processamento das tarefas já ajustados.

É relevante salientar que, a notação utilizada para a apresentação dos passos a cima citados encontra-se abaixo apresentados.

I: Conjunto das operações a realizar ($i = \{1,2,\dots,m\}$)

J: Conjunto dos postos de trabalho ($j = \{1,2,\dots,n\}$)

$I_{(j)}$: Subconjunto das operações afetadas ao posto j , $j \in J$

T : Tempo de duração da tarefa

T_i : Tempo de processamento da operação i , $i \in I$

T_j : $\sum_{i \in I_{(j)}} t_i$ i.e., Tempo de serviço do posto j

C: Tempo de ciclo

$N_{(m)}$: Tarefas de cada posto de trabalho

$L_{(m)}$: Relações de precedências das tarefas

$E_{(%)}$: Tempo que a linha de produção trabalha

$P_{(i)}$: Conjunto das precedências imediatas da operação i

3.1. Combinação de diagrama de precedência

De acordo com (Black, 1972) citado por (Van Zante-De Fokkert & De Kok, 1997) menciona como transformar m diagramas de diferentes modelos em um diagrama de precedências combinado. Desta forma, o procedimento é resumindo da seguinte maneira:

Efetua-se a combinação de diagramas de precedências por meio de modelo único, onde, o diagrama de precedências é designado por G_i que é associado ao modelo m . O G_i apresenta um conjunto de nós $N(m)$ e arcos $L(m)$ onde :

$$N(m) = \{n(m)_1, n(m)_2, \dots\}, \quad (1)$$

$$L(m) = \{l(m)_1, l(m)_2, \dots\} \quad (2)$$

Sendo que, os nós ($N(m)$) representam as tarefas e os arcos ($L(m)$) representam as relações de precedência. É relevante salientar que, as tarefas só precedem as outras quando forem totalmente concluídas.

O método combinado do diagrama de precedências representa-se por meio de um gráfico $G_m = (N, L)$, onde:

$$N_{(m)} = N_{(1)} \cup N_{(2)} \cup \dots \cup N_{(p)} \quad (3)$$

$$L_{(m)} = L_{(1)} \cup L_{(2)} \cup \dots \cup L_{(p)} \quad (4)$$

Desta forma, é relevante referir que, G_m representa o diagrama de precedências combinado, o $N_{(1)} \cup N_{(2)} \cup \dots \cup N_{(p)}$ representa a reunião dos nós dos modelos combinados que resulta em um único diagrama de precedências e o $L_{(1)} \cup L_{(2)} \cup \dots \cup L_{(p)}$ representa os arcos dos modelos. No entanto, existe uma situação em que um arco $L_{(m)i}$, e $L_{(m)j}$ em um diagrama de precedências são redundantes. isto é, quando existe uma cadeia de arcos que corresponde a mesma tarefa. Este problema pode ser solucionado omitindo os arcos em um único caminho de i para j em um diagrama de precedências combinado.

No método combinado de diagrama de precedências o tempo de processamento da tarefa $i \in N$ é igual ao tempo total necessário para o processamento desta tarefa em uma determinada combinação de modelos, desta forma, o número de unidades deve ser produzido

tomando em consideração o tempo de mudança de tarefa, como podemos observar na figura 2.8. Os arcos redundantes estão indicados por setas pontilhadas.

É relevante salientar que, durante a construção do modelo combinado de diagrama de precedências para linha de montagem de modelos mistos devemos ter em conta os arcos redundantes. Por sua vez, estes determinam as variáveis a serem modeladas na construção de soluções ótimas em problemas de balanceamento. Entende-se que o arco redundante é a repetição do arco (i,j) quando existe um outro caminho de i para j em um diagrama de precedências combinado.

Alguns autores em suas abordagem fazem o uso dos arcos redundantes durante a combinação dos modelos (Gökçen & Ereil, 1998), desta forma, acrescentam mais variáveis com objetivo de encontrar soluções ótimas sem redução de restrições no processo, figura 2.8. E outros autores (Black, 1972) em suas abordagens ocultam os arcos redundantes, desta forma, reduzem ou simplificam as variáveis a serem modeladas no processo.

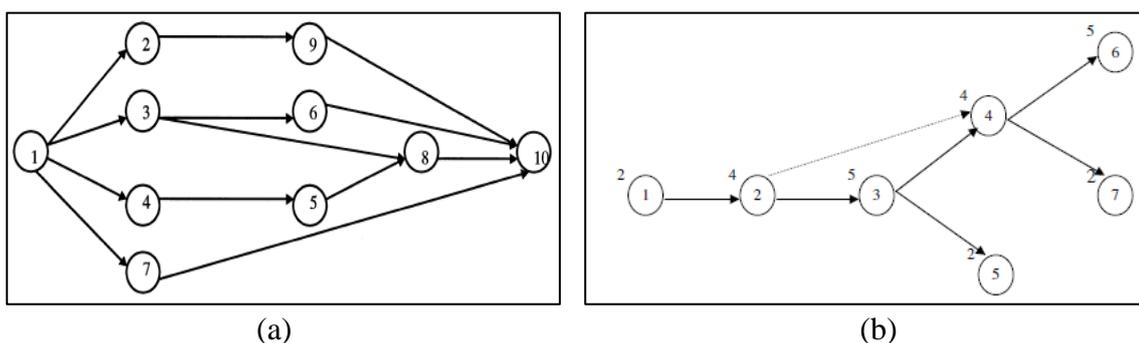


Figura 2.8 - Diagrama combinado sem arcos redundantes (a), diagrama combinado com arco redundante (b)

Um outro aspecto relevante neste método, é a forma como é feito o balanceamento na linha de montagem de modelos mistos, as tarefas são atribuídas para as estações de trabalho com base no tempo de duração T , ao contrário do tempo de ciclo C , como normalmente é efetuado nos problemas simples de balanceamento de modelos únicos.

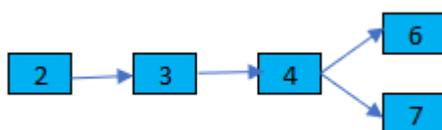
Uma outra técnica que permite auxiliar a combinação dos diagramas de precedências é a utilização de matrizes de precedências. Estes por sua vez, simplificam os cálculos de balanceamento. Desta forma, para presente pesquisa as matrizes de precedências foram implementadas no método computacional, com o objetivo de automatizar a obtenção da matriz de precedências combinada. Normalmente o seu formato é triangular composto por valores binários. O seu princípio de funcionamento baseia-se em uma célula (i, j) na matriz que representa a precedência entre as tarefas i e j do modelo. Desta forma, se o valor

for igual a 1, a tarefa j só pode ser realizada após a tarefa i ter sido concluída, caso contrário se for igual a 0 não existe dependência entre as tarefas. Um outro aspeto relevante na construção da matriz esta diretamente ligado a tarefas sucessoras, isto é, nem sempre a precedência indicada na matriz é imediata (Gökçen & Erel, 1998). A figura 2.12 apresenta os diagramas de precedências de dois modelos distintos a serem fabricados na mesma linha: modelo 1 e modelo 2. Nessa mesma figura apresenta-se o diagrama de precedências combinado respeitante aos dois modelos. Na figura 2.9, 2.10 e 2.11 repete-se o mesmo exercício, mas associando a cada um dos diagramas de precedência a respetiva matriz de precedência



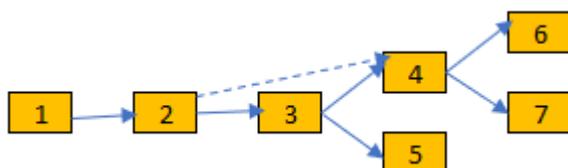
A1	1	2	3	4	5	6	7
1		1	1	1	1	1	
2			1	1	1	1	
3				0	1	0	
4					0	1	
5							
6							
7							

Figura 2.9 - Modelo 1 e a sua respetiva matriz de precedência



A2	1	2	3	4	5	6	7
1							
2			1	1	0	1	1
3				1	0	1	1
4					0	1	1
5							
6							
7							

Figura 2.10 - Modelo 2 e a sua respetiva matriz de precedência



A _m	1	2	3	4	5	6	7
1		1	1	1	1	1	1
2			1	1	1	1	1
3				1	1	1	1
4						1	1
5							
6							
7							

Figura 2.11 - Modelo combinado e a sua respectiva matriz combinada de precedências gerada na implementação computacional

Segundo (Black, 1972) faz referência em seu artigo que outros autores fizeram uma abordagem no método combinado de diagrama de precedências dividindo o diagrama de precedências em colunas. onde uma tarefa é a atribuída à coluna i , se o máximo dos números das colunas de seus predecessores é igual a $i-1$. No entanto, este método é baseado na atribuição total de colunas para estações de trabalho como podemos observar na figura 2.9.

O princípio deste método e descrito por (Black, 1972) de seguinte maneira: “ Se o conteúdo do trabalho de coluna i excede o (restante) tempo disponível de um estação de trabalho, então todas as combinações possíveis de tarefas nesta coluna são investigados a fim de encontrar uma tarefa perfeita, que tem um conteúdo de trabalho que é igual a T . Se uma atribuição perfeita não puder ser encontrada, todas as tarefas na coluna 1 até incluindo i são investigadas sobre sua capacidade de mover para uma coluna $\geq i$, sem violar quaisquer restrições de precedência ou atribuições de coluna de outras tarefas. A tarefa com o menor tempo de processamento da tarefa é movido para a coluna i ($i + 1$) se o número da coluna for menor que i (igual a i). Esta sequência de combinação e movimento é repetido até que uma atribuição perfeita seja encontrada ou até nenhum movimento possível é deixado. No último caso, a atribuição com o conteúdo de trabalho mais alto é selecionada.

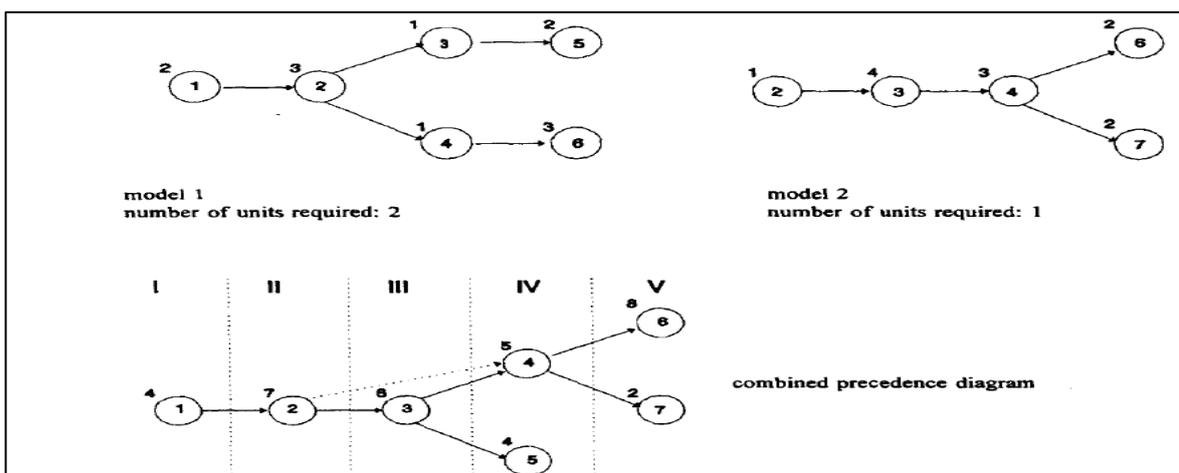


Figura 2. 12 -Diagrama de precedências combinado composto por dois modelos diferentes (Black, 1972)

Este método apresenta inúmeras vantagens para resolução de problemas de balanceamento em linha de montagem de modelos mistos. uma vantagem na utilização do método combinado de diagrama de precedências é a possibilidade de toda repetição de uma tarefa ser realizada na mesma estação de trabalho, deste modo, reduzindo os custos de aprendizagem. Entretanto, também apresenta inúmeras desvantagens a utilização deste método, assim sendo, podemos salientar que, uma desvantagem no uso deste método é o balanceamento entre turnos, esta situação cria enormes problemas no chão de fábrica. Uma outra desvantagem esta ligado diretamente com a combinação do diagrama de precedências cujo a resultante deve ser acíclico. Esta deficiência resulta em graves restrições aos diagramas de precedências dos modelos.

3.1.1. Descrição da aplicação informática desenvolvida para auxiliar resolução de problemas de balanceamento no método combinado de diagrama de precedências para linha de montagem de modelos mistos

Um dos objetivos deste trabalho é propor um método adequado para a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos. desta forma, desenvolveu-se uma aplicação informática que permite auxiliar a combinação de matrizes à partir de diferentes modelos ou diagrama de precedências, com objetivo de gerar uma matriz combinada equivalente.

Desta forma, desenvolveu-se a aplicação informática, cujo a codificação foi feita em Visual-Basic, linguagem de fácil programação e suficientemente poderosa para desenvolver aplicações em ambiente Windows. De seguida faz-se uma breve descrição da aplicação informática desenvolvida para a resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos utilizando como auxilio métodos combinados de diagrama de precedências.

O primeiro écran da aplicação informática da figura 2.12, permite ao utilizador introduzir o número dos modelos e o total das tarefas que pretende combinar na célula

amarela. De seguida preenche as matrizes geradas de acordo com o numero previamente estipulado para a devida combinação, desta forma, clicando o botão “ matriz de precedências”. Após o preenchimento das matrizes de precedência recorre-se ao botão “combinado” para obter a matriz combinada equivalente. A pós concluir esses passos o utilizador pode construir o diagrama combinado de precedências gerado automaticamente pela aplicação.

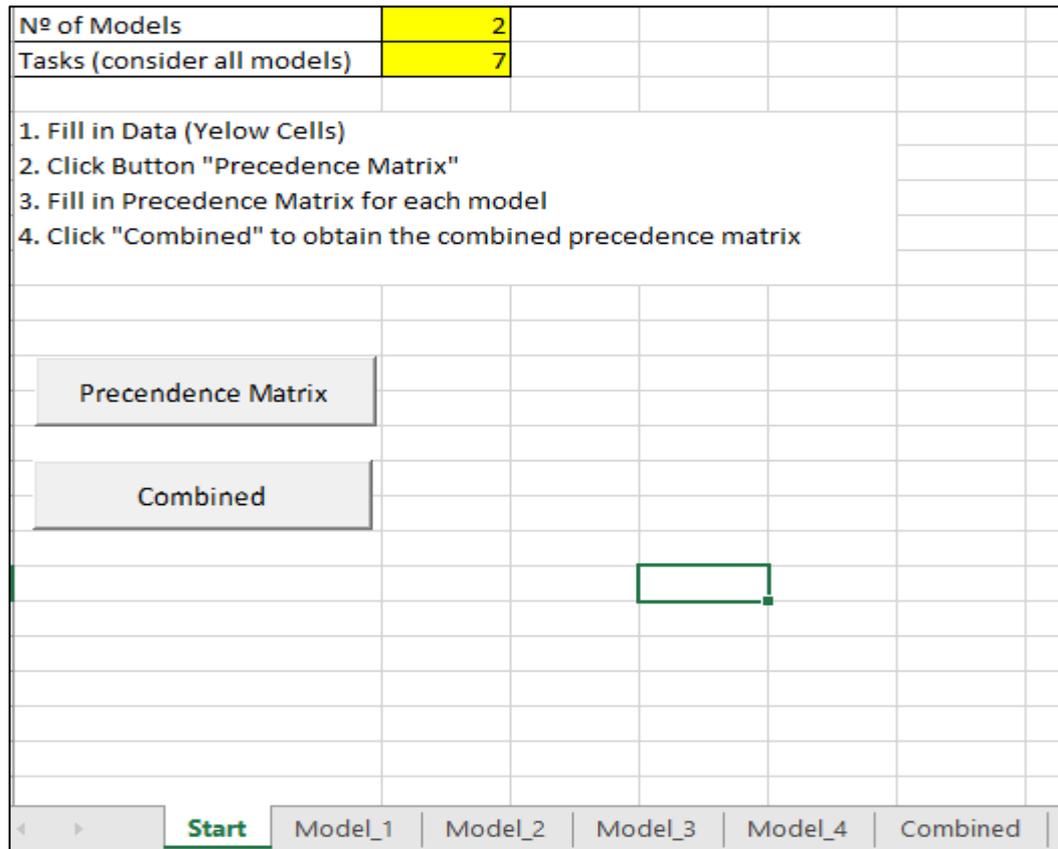


Figura 2.13 - Aspeto do prime iro écran do programa

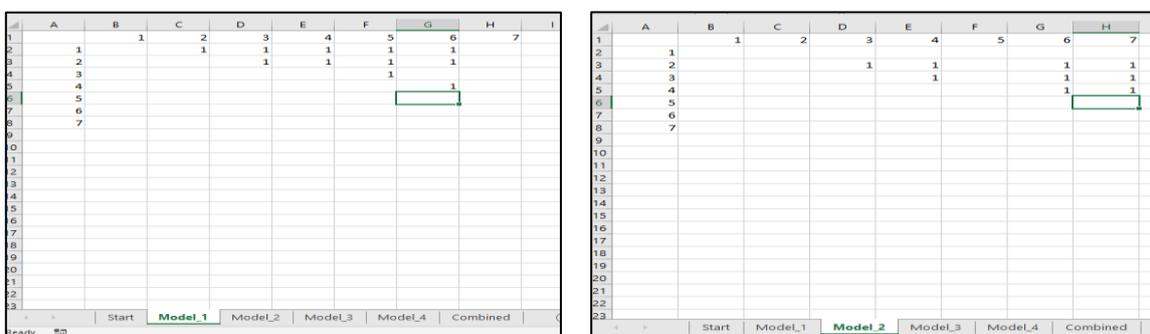
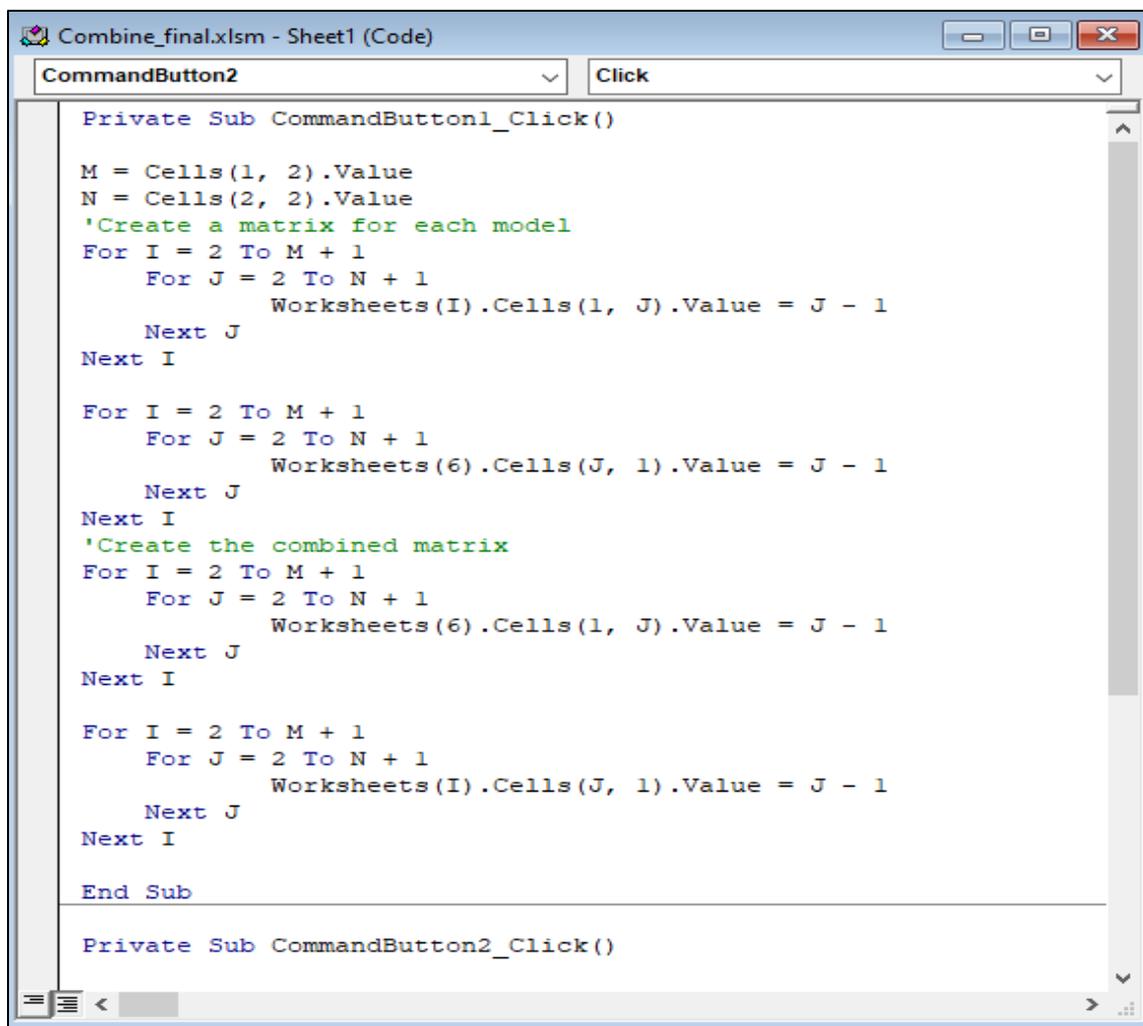


Figura 2.14 - Matrizes geradas apos a escolha de número de modelos que se pretende combinar

No segundo écran temos o código desenvolvido que permite gerar matriz combinada equivalente a partir de modelos previamente escolhidos. O princípio de funcionamento desta codificação baseia-se em criar matrizes de precedência e combiná-los de forma aleatória. Onde temos (M,N) que representam as células pelo qual adicionamos os valores que pretendemos solucionar, (i,j) representam as linhas e Colunas que auxiliam a construção de uma matriz com o número de precedências de cada operação. $N + 1$ representa número de operações em condições de entrar. O botão “combined “ a partir dos dados de entrada dos diferentes modelos gera uma matriz combinada equivalente automaticamente, desta forma, automatiza a obtenção da matriz de precedências combinada.



```
Private Sub CommandButton1_Click()  
M = Cells(1, 2).Value  
N = Cells(2, 2).Value  
'Create a matrix for each model  
For I = 2 To M + 1  
    For J = 2 To N + 1  
        Worksheets(I).Cells(1, J).Value = J - 1  
    Next J  
Next I  
  
For I = 2 To M + 1  
    For J = 2 To N + 1  
        Worksheets(6).Cells(J, 1).Value = J - 1  
    Next J  
Next I  
'Create the combined matrix  
For I = 2 To M + 1  
    For J = 2 To N + 1  
        Worksheets(6).Cells(1, J).Value = J - 1  
    Next J  
Next I  
  
For I = 2 To M + 1  
    For J = 2 To N + 1  
        Worksheets(I).Cells(J, 1).Value = J - 1  
    Next J  
Next I  
  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()
```

Figura 2.15 - Código desenvolvido para resolução métodos combinados de diagrama de precedências

3.1.2. tempo de processamento de tarefas ajustadas

Segundo (Van Zante-De Fokkert & De Kok, 1997) salienta que, esta abordagem é usado para transformar problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos em um problema de balanceamento simples. Desta forma, está abordagem permite determinar ou agrupar as tarefas em função do tempo médio das tarefas distintas em mais de dois modelos, desta forma, gerando um único diagrama de precedências. O tempo médio de processamento da tarefa i , t_i , é calculado com a seguinte formula:

$$\bar{t}_i = \sum_j f_j t_{i,j} \quad (5)$$

Onde $t_{i,j}$ é igual ao tempo de processamento da tarefa i no modelo j , f_j é a frequência relativa do modelo j .

A vantagem do uso desta técnica é devido ao balanceamento que é efetuado a partir do tempo de ciclo.

Quanto a desvantagem de uso deste modelo, é a inexistência de um método que permite determinar a sequência em que vários modelos possam ser produzidos. Um outro aspecto relevante no uso deste modelo, é a deficiência no que tange, o seguimento de diagrama de precedências para diferentes modelos, desta forma, limita este método para o balanceamento de modelos, derivados do mesmo modelo, levando em consideração o aumento ou a redução dos tempos de processamento da tarefa deste modelo.

É relevante salientar que, após a combinação dos modelos em uma diagrama combinado de precedências é necessário efetuar um ajustamento do tempo de processamento das tarefas .

3.2. Heurísticas de Balanceamento

De acordo com (Sbicca, 2014) entende-se que, o conceito de heurísticas são regras ou procedimentos com caráter intuitivo, que simplificam a tomada de decisão. É relevante salientar que, as heurísticas não garantem soluções ótimas, apenas permitem ao decisor encontrar soluções satisfatórias em tempo útil.

De acordo (Gaitheir e Frazaiier,2002) citado por (Ribeiro et al., 2013) afirmam que os métodos heurísticos permitem desenvolver soluções satisfatórias para os problemas

de balanceamento na linha de montagem. No entanto, esses problemas não são fáceis de modelar, desta forma, propôs-se dois modos de resolver problemas reais difíceis de modelizar.

O primeiro modo consiste em simplificar o problema com o objetivo de construir um modelo resolúvel aplicando métodos de otimização, buscando uma solução próxima do problema original, desta forma recorrendo as métodos heurísticos.

Normalmente, os métodos heurísticos são empregues em soluções onde ocorrem problemas combinatórios de grande dimensão, entre os quais encontramos problemas de balanceamento de linha de montagem, onde os métodos que envolvem programação matemática são inviáveis devido ao esforço computacional envolvido.

Existem heurísticas mais simples sob o ponto de vista da implementação nos problemas de balanceamento de linha de montagem, são consideradas regras empíricas, cujo o principal objetivo passa por estabelecer a ordem pelo qual as operações devem ser afetadas aos postos de trabalho, tomando em consideração os números de operações que se podem realizar após sua conclusão. Esta heurística permite afetar em primeiro lugar o maior número de operações com sucessores imediatos, com a condição de não violar as relações de precedências ou que o seu tempo de processamento seja superior ao tempo disponível no posto de trabalho. (Silva,1994)

(Silva,1994) faz uma abordagem na regra do Tempo de Processamento das Operações faz a afetação de acordo com o tempo de processamento das operações. Esta regra permite fazer afetação das operações consoante o tempo mais longo, isto é, as operações com tempos mais longos são colocadas em primeiro e as com menos tempo no fim. A vantagem desta técnica é a possibilidade de distribuir as operações de modo a preencher os tempos mortos dos postos de trabalho.

A regra de heurística dos Pesos Posicionais baseia-se na lógica, desta forma, estabelece a ordem na qual as operações devem ser afetadas. Neste procedimento, o valor de peso posicional é calculado fazendo a soma do tempo de processamento de uma operação com a duração de todas as operações que a sucedem, até atingir o final da linha de montagem. De acordo com um tempo de ciclo desejado, os elementos são atribuídos às estações, na ordem decrescente dos valores de peso posicional. Em suma, as operações com maior somatório, que se designa por peso posicional, são afetadas em primeiro lugar (Carolina & Farnes, 2007).

Abaixo, serão apresentados os parâmetros fundamentais utilizados no método Peso Posicional

$$T_{wc} = \sum_{j=1}^{n_c} t_{ej} \quad (6)$$

Onde, o T_{wc} representa a soma dos tempos de todos elementos de trabalho a serem efetuados, t_{ej} representa os elementos mínimos de trabalho, j identifica os elementos que constituem as operações .

$$\sum_{i=1}^n T_{si} = \sum_{j=1}^{n_c} t_{ej} \quad (7)$$

Onde, $\sum_{i=1}^n T_{si}$ representa o Tempo de Processamento na Estação de Trabalho. É relevante salientar que, uma estação de trabalho é o local de produção onde as operações são efetuados, quer de forma manual ou automática, desta forma, o trabalho efetuado numa estação consiste de um ou mais elementos individuais. T_{si} representa o tempo de processamento na estação i numa linha de n estações (Carolina & Farnes, 2007)

$$T_c \leq \frac{E}{R_p} \quad (8)$$

Onde, T_c representa o tempo de ciclo, este tempo deve ser especificado, de acordo com a taxa de produção requerida. E é a eficiência da linha e R_p é a taxa de produção requerida. Entretanto, em linhas onde os problemas são menos improváveis, a eficiência será próxima de 100%. Uma outra condição relevante é o valor mínimo do T_c que é estabelecido a partir da estação com gargalo, que é aquela que possui o maior valor de T_s , onde:

$$T_s \geq \max T_{sj} \quad (9)$$

No entanto, se $T_c = \max T_{si}$ pode ocasionar um tempo improdutivo em todas estações, cujo os valores T_s são menores que o T_c . Portanto, o tempo de ciclo deve ser maior ou igual ao tempo dos elementos de trabalho (Carolina & Farnes, 2007).

Uma outra regra relevante no que tange, ao balanceamento de linhas de montagem é a heurística COMSOAL (*Computer Method Of Sequencing Operation For Line Balancing*) esta regra foi desenvolvida por Arcus (1966). Este método permite fazer uma distribuição aleatória das operações em diferentes estações de trabalho, utilizando desta forma um computador com o objetivo de gerar sequências aleatórias de operações a partir da qual se simula o balanceamento. Este método baseia-se na simulação computacional, onde cada iteração desenvolvida compara a solução corrente com anterior e elege sempre a melhor solução. para alguns autores este método permite que a resolução problemas associados ao balanceamento de linhas de montagem seja mais eficaz e simples.

Com o passar do tempo, Arcus introduziu algumas melhorias a técnica, buscando aumentar a sua eficiência. Regras essas que permitiam aumentar a probabilidade de desempenho de operações com certas características a serem selecionadas. Como também, a inclusão de um procedimento que interrompe o processo de obtenção de uma solução ótima antes da sua conclusão, de acordo com o tempo morto que lhe está associado quando este excede ate então a melhor solução obtida.

3.2.1. Descrição da metodologia utilizada na heurística de pesos posicionais na linha de montagem de modelos mistos

Um dos objetivos do trabalho passa por demonstrar o cálculo de redução dos postos de trabalho a partir de um tempo de ciclo já dado para resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos do tipo MALBP-1. Desta forma, recorreu-se a metodologia aplicada no artigo do (Mamun et al., 2012) e na tese de doutoramento de (Simaria et al., 2006). As duas pesquisas fazem uma abordagem do método heurístico utilizado na presente pesquisa. Essa abordagem faz menção à utilização dos métodos heurísticos de pesos posicionais médios na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.(Thomopoulos, 1970)

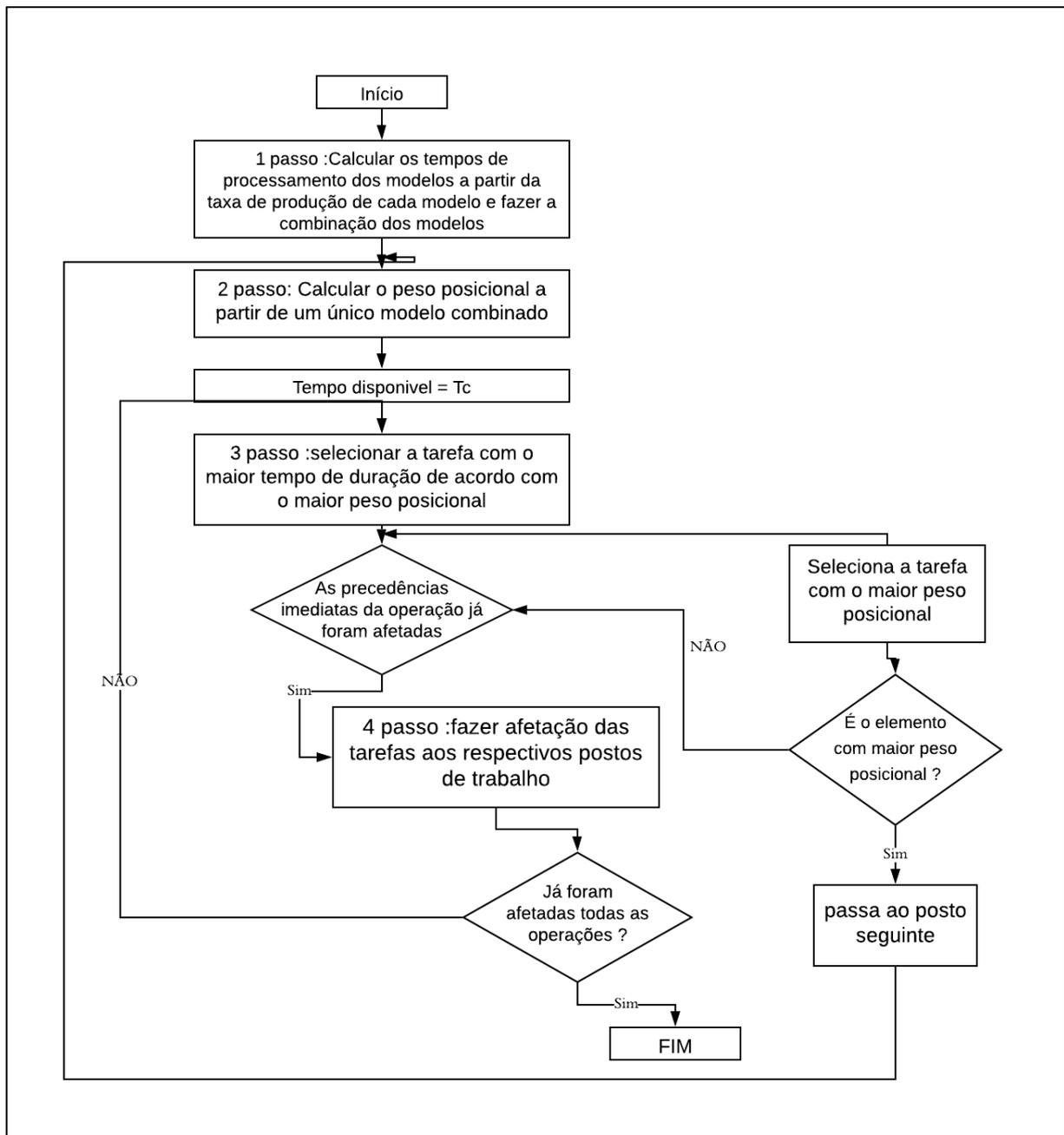


Figura 2.16 - Fluxograma de heurística de pesos posicionais para balanceamento de linha de montagem de modelos mistos

De acordo com (Simaria et al., 2006) o primeiro passo no uso de heurísticas de pesos posicionais no balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos é o cálculo dos tempos de processamento dos diferentes modelos a partir da sua taxa de produção e à posterior criar a combinação em um único modelo, desta forma, passamos a ter um modelo simples com vista a facilitar os cálculos de balanceamento em linha de montagem de modelos mistos.

O segundo passo é o cálculo do peso posicional médio, este passo só pode ser efetuado após o cálculo da taxa de produção de cada modelo, desta forma, faz se a combinação dos diferentes modelos em um único modelo com o valor médio calculado a partir da taxa de produção de diferentes modelos. O valor do peso posicional médio é a soma de todos os tempos de processamento do modelo combinado.

O terceiro passo é a seleção da tarefa com maior tempo de duração em função dos postos de trabalho, quando se faz essa seleção é importante observar o seu peso posicional médio, isto é, devemos afetar as tarefas nos postos de trabalho em função dos pesos posicionais médios.

O ultimo passo é afetação de todas tarefas em seus respectivos postos de trabalho de acordo com os seus pesos posicionais médios.

3.2.2. Heurística proposta para balanceamento de linha de montagem de modelo misto

A heurística proposta no balanceamento de linha de montagem do modelo misto é o tipo MALBP-1 que tem o objetivo de minimizar o número de estações para um tempo de ciclo dado. Desta forma, as tarefas devem ser alocadas de uma maneira mais eficiente e eficaz para obter vantagens competitivas em termos de redução de custos (Mamun et al., 2012).

O uso desta heurística para resolução de problemas do tipo MALBP-1, permite que, as estações que executam tarefas com tempos superiores ao tempo de ciclo para, pelo menos, um modelo, podem ser duplicadas. Este valor pode ser alterado pelo utilizador (Mamun et al., 2012).

3.2.3. Exemplo numérico do uso da heurística nos MALBP-1

É relevante salientar que, o presente problema é retirado de (Mamun et al., 2012), e foi adaptado a resolução de acordo com o procedimento proposto.

Desta forma, o funcionamento da heurística é ilustrado com um exemplo numérico na tabela 2.6 a baixo.

Tabela 2.7 - Características do problema de teste

Taxa de produção	270 peças por dia
Horário de trabalho	15
Tempo de ciclo	14 segundos
Taxa de produção de modelo A	120 peças por dia
Taxa de produção de modelo B	150 peças por dia
Peso de modelo A	44.5 %
Peso de modelo B	55.5 %

A figura 2.17 ilustra o diagrama de precedência e os respectivos tempos atribuídos a tarefas do modelo A e o modelo B. É relevante salientar que, esses dois modelos são produzidos simultaneamente numa linha de montagem, assim sendo, propõem-se o uso de modelo misto com objetivo de minimizar os postos de trabalho de acordo com o tempo de ciclo dado.

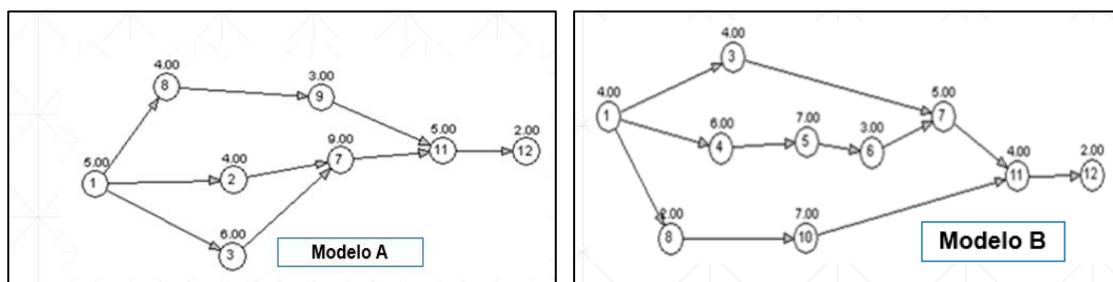


Figura 2.17 - Diagrama de precedência de modelo A e B

A combinação das restrições de precedência para os dois modelos resulta em único digrama de precedências apresentado na figura 2.17, o qual apresenta 12 tarefas. Na tabela 2.7 podemos observar o tempo médio de cada tarefa associada, desta forma, o peso posicional é calculado com base nos tempos médios de processamento de cada tarefa.

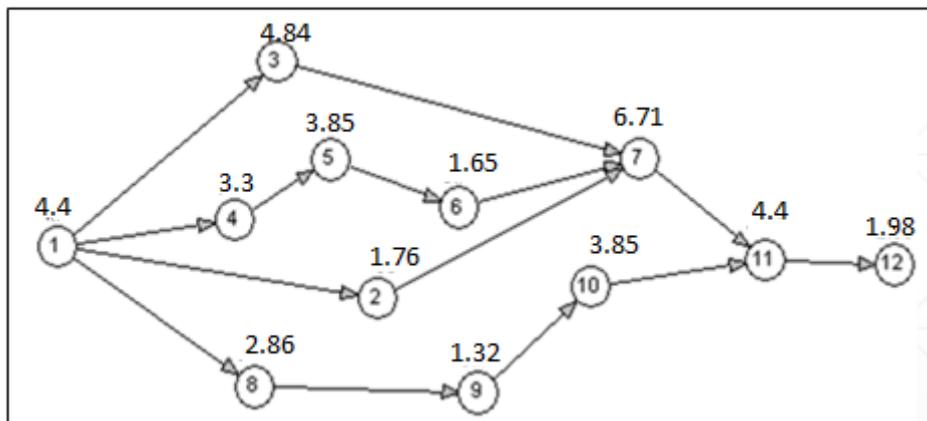


Figura 2.18 - Diagrama de precedência resultante da combinação de modelo A e B

A tabela 2.7, obtemos os tempos médios e os pesos posicionais das tarefas para cada modelo (T_A e T_B) usando um modelo misto na linha de montagem. Desta forma, a heurística proposta dos pesos posicionais é aplicada no problema. Em suma, o tempo médio de processamento de cada tarefa é calculado à partir do somatório dos tempos de processamento da tarefa para cada modelo multiplicados pela respectiva taxa de produção. No exemplo numérico proposto na presente pesquisa, a taxa de produção do modelo A é igual a 44% e a do modelo B a 55%. Cujo o tempo de ciclo com que a linha deve ser operada para satisfazer a procura é de $C = 14$ segundos. Os tempos médios de processamento (t) e os pesos posicionais médios de cada tarefa (pp médio) são apresentadas na tabela 2.7

Tabela 2.8 -Tempos de processamento e pesos posicionais médios para o exemplo numérico de uma linha de modelo-misto

Tarefa	t_A	t_B	T	PP médio
1	5.0	4.0	4.4	40.92
2	4.0	0	1.76	14.85
3	6.0	4.0	4.84	17.93
4	0	6.0	3.3	21.89
5	0	7.0	3.85	18.59
6	0	3.0	1.65	14.74
7	9.0	5.0	6.71	13.09
8	4.0	2.0	2.86	14.43
9	3.0	0	1.32	11.57
10	0	7.0	3.85	10.25
11	5.0	4.0	4.4	6.38
12	2.0	2.0	1.98	1.98

A tabela 2.8 , ilustra a aplicação da heurística de pesos posicionais de acordo com o problema de pesquisa. Desta forma, agrupam as tarefas de acordo com o número necessário de estações de trabalho. No entanto, é relevante salientar que, após aplicação da heurística obtivemos uma eficiência (E) na linha de 58,5 % e $n^* = 5$ postos de trabalho, visando a tender o tempo de ciclo proposto acima.

Tabela 2.9 - Heurística de pesos posicionais

	Tarefa	Duração	T/restante	S/p	Possíveis	Escolha	peso
Posto 1	1	5.0	9.0	2,3,4,5,6	2,3,4,5,6	4	40.92
	4	6.0	3.0	2,3,5,6	6	6	21.89
	6	3.0	0.0	2,3,5,	_____	5	14.74
Posto 2	5	7.0	7.0	2,3,8,9	2,3,8,9	3	18.59
	3	6.0	1.0	2,8,9	_____	2	17.93
Posto 3	2	4.0	10.0	8,9,7,10	8,9,7,10	8	14.85
	8	4.0	6.0	9,7,10	9	9	14.43
	9	3.0	3.0	7,10	_____	7	11.57
Posto 4	7	9.0	5.0	10,11,12	11,12	11	13.09
	11	5.0	0.0	10,12	_____	10	6.38
Posto 5	10	7.0	7.0	12	12	12	10.25
	12	2.0	5.0	12	_____	_____	1.98

Com o exemplo acima referenciado fica claro como resolver problemas de balanceamento na linha de montagem de modelo misto do tipo MALBP-1, usando o método heurístico de peso posicionais para combinação de diferentes modelos numa linha de montagem de modelos mistos.

É relevante salientar que, para o uso desta abordagem teve como fundamento a metodologia usada na tese de doutoramento (Simaria et al., 2006) e no artigo (Mamun et al., 2012), desta forma, foi possível adequar a metodologia usada pelos autores no exemplo numérico proposto no presente trabalho. Com este exemplo numérico podemos constatar como reduzir os postos de trabalho a partir de um tempo de ciclo já conhecido no balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos do tipo MALBP-1, bem como, organizá-los de modo a tornar-se um único modelo, com vista a simplificar as afetações das tarefas dos modelos.

4. PROPOSTA DESENVOLVIDA PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE BALANCEAMENTO NA LINHA DE MONTAGEM DE MODELOS MISTOS

O presente capítulo, pretende apresentar os resultados dos métodos abordados para resolução dos problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos, desta forma, contextualiza com maior relevância os métodos propostos para resolução dos problemas em causa. Tomando em consideração que estas abordagens já foram levantadas na secção da revisão de literatura onde foi relevante fazer uma demonstração clara da aplicação prática desses métodos.

Em suma, o objetivo geral deste capítulo é propor métodos heurísticos que permitem auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos

No geral para resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos existem varias abordagem que permitem auxiliar na resolução destes problemas, no entanto, esta pesquisa fez um levantamento de algumas abordagem tais como: o método combinado de diagrama de precedências gerado a partir de uma matriz de precedências e a heurística de pesos posicionais médios, com o objetivo de desenvolver métodos que permitem auxiliar na resolução de problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos.

Este estudo focou-se em possíveis abordagens para resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos, destacando duas possíveis abordagens fundamentais para a resolução destes problemas.

Numa primeira fase o estudo centralizou-se em fazer um levantamento dos possíveis problemas gerados na linha de montagem de modelos mistos, e de seguida buscou relacionar as possíveis abordagem para resolução dos problemas criados no balanceamento de linha de montagem de modelos mistos.

Onde, o foco do estudo foi destinado há duas possíveis abordagem que permitem simplificar a resolução dos problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos. O método combinado de diagrama de precedências permite simplificar a combinação

de vários modelos de produto em um único diagrama de precedências, desta forma, simplifica a obtenção ótima dos postos de trabalho para a execução das tarefas.

O método combinado de diagrama de precedências tem como foco a combinação dos diagramas de precedências de cada modelo individual sendo esta feita pela união dos nós e das relações de precedência de seus respectivos diagramas de cada modelo individual. Uma nota importante no método combinado de diagramas de precedências e a alocação das tarefas às estações do trabalho que é realizada com base no tempo total da duração do turno, ao contrario do balanceamento de linha de montagem de modelo único, esta por sua vez faz se o balanceamento usando o tempo de ciclo.

Ainda no método combinado de diagrama de precedências foi relevante desenvolver uma aplicação informática que possibilitou automatizar as matrizes de precedência com vista a proporcionar uma matriz equivalente de vários modelos de diferentes produtos. Cujo programação , foi desenvolvida a partir do *Visual Basic Excel* (VBA) com o objetivo de criar um código que permites-se gerar automaticamente a matriz equivalente de vários modelos de produto. Após gerar essa matriz equivalente derivada da combinação de vários modelos obtém-se o diagrama combinado de precedências ótimo, com vista, a balancear de forma eficiente alinha de montagem de modelos mistos.

Após a combinação dos diagramas de precedências gerados a partir da matriz equivalente, avança-se para o cálculo dos postos de trabalho a partir do método da heurística de pesos posicionais médios. Onde fica claro como afetar as tarefas precedentes, bem como minimizar os postos de trabalho necessários para efetuar a devida montagem.

Esta abordagem permite resolver problemas de balanceamento na linha de montagem de modelos mistos do tipo MALBP-1, desta forma, minimiza o número de postos de trabalho a partir de um tempo de ciclo dado ou previamente conhecido para a realização da alocação das tarefas, também tem a vantagem de minimizar os custos operacionais com adoção de distribuição das tarefas de forma mais eficiente, conferindo deste modo, uma vantagem competitiva.

Por um outro lado é necessário observar as restrições de afetação das tarefas, visando a um balanceamento eficiente na linha de montagem de modelos mistos, essas restrições permitem fazer a distribuição das tarefas nos postos de trabalho de forma igualitária de acordo com o tempo de ciclo previamente estabelecido de 14 segundos , que é

o tempo no qual um operador terá de efetuar um conjunto de tarefas em cada posto de trabalho. Essas restrições obedecem os seguintes princípios:

- ✓ O conjunto de tarefas deve ser alocado em cada posto de trabalho de forma a não exceder o *cycle time*;
- ✓ As tarefas devem ser alocadas em função do maior tempo de duração

5. CONCLUSÕES

Hoje em dia tem se verificado um alto índice em termos de competitividade entre indústrias em aumentar o seu *Market Share* através da oferta de variedades de produtos e preços atrativos, bem como aspetos ligados em inovação incremental dos seus produtos. Por um outro lado, a produção esta diretamente ligada a redução de custos de produção com um ritmo eficaz, desta forma, valorizando o incremento da eficiência. O estudo de balanceamento de linha de montagem de modelos mistos torna-se relevante no contexto atual, de modo a suprimir as expectativas do mercado no que concerne produção de um *mix* de produtos com diferentes variantes.

Para o presente estudo, buscou-se mostrar a utilização de dois métodos para a resolução de problemas balanceamento em linha de montagem de modelos mistos, desta forma, abordando questões relevantes ligados aos problemas deste tipo de linha. Sendo que, os métodos abordados foram o método combinado de diagrama de precedências, o método de heurística de pesos posicional para resolução de problemas em linhas de montagem de modelos mistos do tipo MALBP-1.

Ainda neste trabalho foi desenvolvida uma aplicação informática que tinha como o princípio de funcionamento a união de matrizes de precedência de diferentes modelos de produto em uma única matriz equivalente. Desta forma, essa aplicação permite automatizar as matrizes de precedência de diferentes modelos de produto em um único diagrama equivalente, isto é, gera a combinação ótima para o balanceamento em uma linha de montagem de modelos mistos.

Com base na combinação dos diagramas de precedências em um único modelo, introduz-se a heurística de pesos posicionais com o objetivo simplificar o problema de balanceamento em linha de montagem de modelos mistos. para a presente pesquisa foi introduzido a heurística para o cálculo de problemas de balanceamento do tipo MALBP-1, onde o principal objetivo desta heurística de peso posicional é minimizar os postos de trabalho a partir de um tempo de ciclo já conhecido, desta forma, fazendo afetação das tarefas de acordo com o seu maior tempo de duração na união dos diferentes diagramas de precedências dos produtos , tendo em conta o seu peso posicional.

É relevante informar que existem outros métodos que permitem auxiliar na resolução de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos, métodos tais como COMSOAL, este método permite fazer uma distribuição aleatória das

operações em diferentes estações de trabalho, utilizando desta forma um computador com o objetivo de gerar sequências aleatórias de operações a partir da qual se simula o balanceamento.

Este trabalho também teve suas limitações devido a situação atual vivenciada no mundo todo, que é a pandemia causada pelo covid-19. pois contribui de forma direta no alcance dos resultados esperados durante a elaboração do presente trabalho. Desta forma, recomenda-se para trabalhos futuros uma aplicação prática, no contexto industrial as teorias debruçadas durante a pesquisa de problemas de balanceamento em linhas de montagem de modelos mistos

Em suma, este trabalho buscou relacionar problemas gerados no balanceamento de linhas de montagem de modelos mistos com possíveis abordagens ligadas a resolução destes problemas, ou seja, teorias que simplificassem o alcance de soluções ótimas durante a resolução desses problemas gerados durante o balanceamento dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, R. dos R., & Antunes Jr., J. A. V. (2001). Takt-time: conceitos e contextualização dentro do Sistema Toyota de Produção. *Gestão & Produção*, 8(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1590/s0104-530x2001000100002>
- Andr, A., Universidade, F., & E-mail, U. (2020). *Methods of Standardization , Weighting and Aggregation in the Formation of Sustainability Index Métodos De Normalização , Ponderação E Agregação Na Formação*. 11, 167–187.
- Araújo, F. F. B., Costa, A. M., & Miralles, C. (2015). Balancing parallel assembly lines with disabled workers. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(3), 344–365.
<https://doi.org/10.1504/EJIE.2015.069343>
- Becker, C., & Scholl, A. (2006a). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694–715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>
- Becker, C., & Scholl, A. (2006b). *Um levantamento sobre problemas e métodos de montagem generalizada balanceamento de linha*. 168, 694–715.
- Black, B. (1972). Production-line balances for mixed-model lines*. *Management Science*, 19(4).
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674–693.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509–528.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 349–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.013>
- Carolina, V., & Farnes, F. (2007). Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. *Revista GEPROS*, 0(1), 125.

- <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i1.138>
- Erel, E., & Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control*, 9(5), 414–434.
<https://doi.org/10.1080/095372898233902>
- Gil, A. C. (org). (2008). Delineamento da Pesquisa. In *Métodos e técnicas de pesquisa social* (Vol. 264).
- Gökçen, H., & Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 34(2–4), 451–461.
[https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(97\)00142-3](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(97)00142-3)
- Håkansson, J., & Skoog, E. (2008). A review of assembly line balancing and sequencing including line layouts. *PLANs Forsknings-Och ...*, 69–84. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:313377>
- Kriengkarakot, N., & Pianthong, N. (2007). The Assembly Line Balancing Problem : Review articles *. *KKU Engineering Journal*, 34(2), 133–140.
- Leu, Y. Y., Huang, P. Y., & Russell, R. S. (1997). Using beam search techniques for sequencing mixed-model assembly lines. *Annals of Operations Research*, 70, 379–397. <https://doi.org/10.1023/a:1018938608304>
- Lima, T. C. S. de, & Miotto, R. C. T. (2007). Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. *Revista Katálisis*, 10(spe), 37–45. <https://doi.org/10.1590/s1414-49802007000300004>
- Lopes, T. C., Sikora, C. G. S., Michels, A. S., & Magatão, L. (2020). Mixed-model assembly lines balancing with given buffers and product sequence: model, formulation comparisons, and case study. *Annals of Operations Research*, 286(1–2), 475–500. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2711-0>
- Mamun, A. A., Khaled, A. A., Ali, S. M., & Chowdhury, M. M. (2012). A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type i using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5106–5116.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2011.643830>
- Martelli, A., Oliveira Filho, A. J., Guilherme, C. D., Dourado, F. F. M., & Samudio, E. M. M. (2020). Análise de Metodologias para Execução de Pesquisas Tecnológicas. *Brazilian Applied Science Review*, 4(2), 468–477. <https://doi.org/10.34115/basrv4n2-006>

- Matanachai, S., & Yano, C. A. (2001). Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 33(1), 29–42.
<https://doi.org/10.1080/07408170108936804>
- Mosadegh, H., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Zandieh, M. (2012). Simultaneous solving of balancing and sequencing problems in mixed-model assembly line systems. *International Journal of Production Research*, 50(18), 4994–5016.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2011.625559>
- Ribeiro, M. F., Do, U., Do, V., Em, M., Desenvolvimento, A. E., Ashenburg, K., Abrahão, M. V., Da, A., Fotodinâmica, Q., Moraes, A. G., RIBEIRO, R., Oliveira, W. R. De, Barbosa, G. D. O., González, M. P., Sánchez, L., Em, P. D. E. P. S., Física, E., Calliari, M., & Cruz, A. P. S. (2013). No Title 『図説 不潔の歴史』 . *Universidade Federal Do Triângulo Mineiro*, 53(9), 1689–1699.
/citations?view_op=view_citation&continue=/scholar%3Fhl%3Dpt-BR%26as_sdt%3D0,5%26scilib%3D1&citilm=1&citation_for_view=wS0xi2wAAA-AJ:2osOgNQ5qMEC&hl=pt-BR&oi=p
- Sbicca, A. (2014). Heurísticas no Estudo das Decisões Econômicas. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, 44(3), 579–603. <http://www.revistas.usp.br/ee/article/view/55545>
- Sikora, C. G. S., Lopes, T. C., & Magatão, L. (2017). Traveling worker assembly line (re)balancing problem: Model, reduction techniques, and real case studies. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 949–971.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.027>
- Silva, G. G. M. P. da, Tubino, D. F., & Seibel, S. (2014). Linhas de montagem: revisão da literatura e oportunidades para pesquisas futuras. *Production*, 25(1), 170–182.
<https://doi.org/10.1590/s0103-65132014005000001>
- Simaria, A., Pedro, D., Moreira, M., & Vilarinho, R. (2006). *Ana Sofia de Almeida Simaria Balanceamento de linhas de montagem - novas perspectivas e procedimentos Assembly line balancing - new perspectives and procedures.*
- Thomopoulos, N. T. (1970). Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments. *Management Science*, 16(9), 593–603.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.16.9.593>
- Tiacci, L. (2015). Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of

mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times.

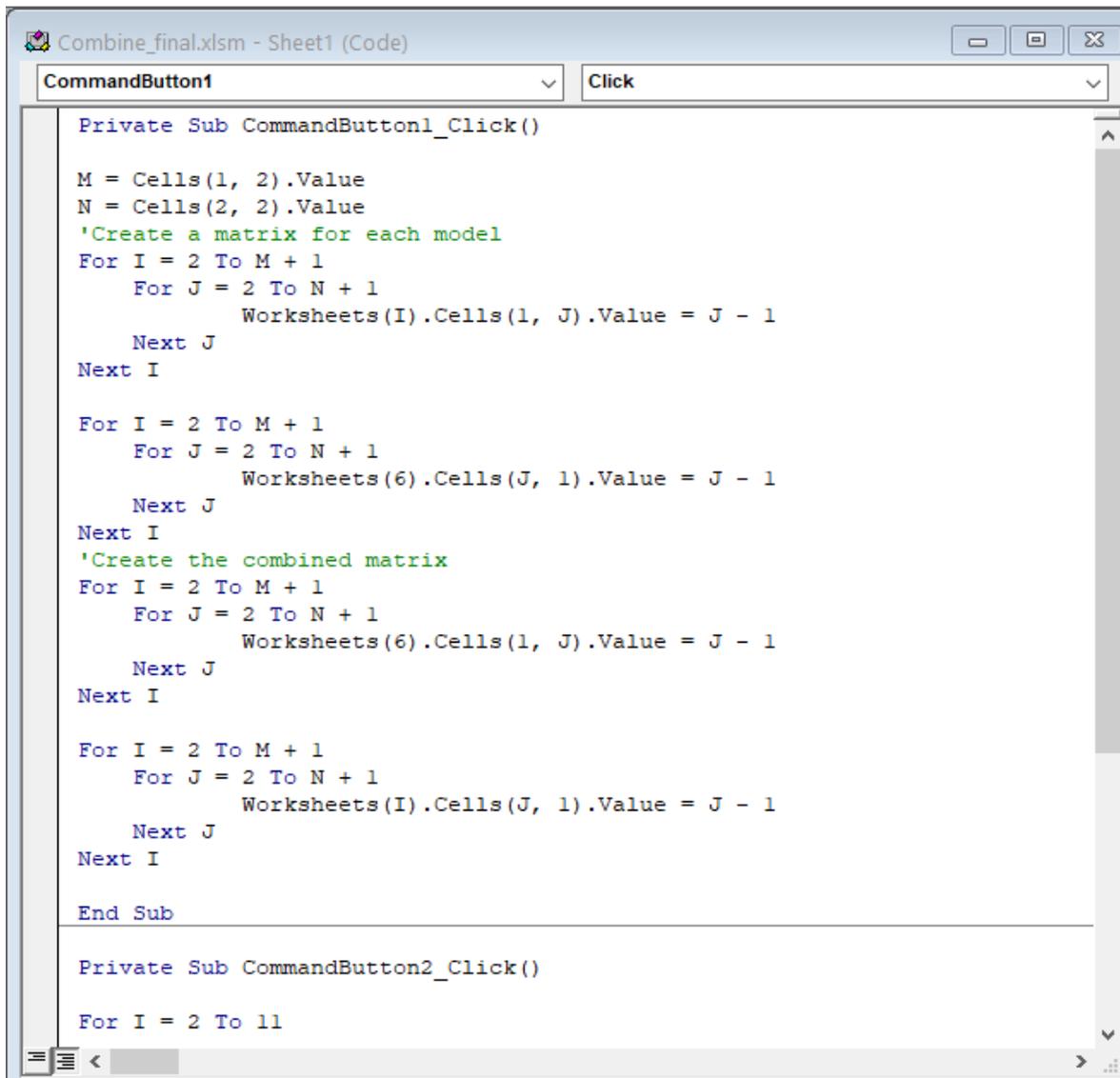
International Journal of Production Economics, 162, 201–215.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.022>

Van Zante-De Fokkert, J. I., & De Kok, T. G. (1997). The mixed and multi model line balancing problem: A comparison. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 399–412. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00162-2)

Zhou, B., & Zhu, Z. (2020). A dynamic scheduling mechanism of part feeding for mixed-model assembly lines based on the modified neural network and knowledge base. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05141-x>

APÊNDICE B: CÓDIGO DESENVOLVIDO



```
Combine_final.xlsm - Sheet1 (Code)
CommandButton1 Click

Private Sub CommandButton1_Click()

M = Cells(1, 2).Value
N = Cells(2, 2).Value
'Create a matrix for each model
For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(I).Cells(1, J).Value = J - 1
    Next J
Next I

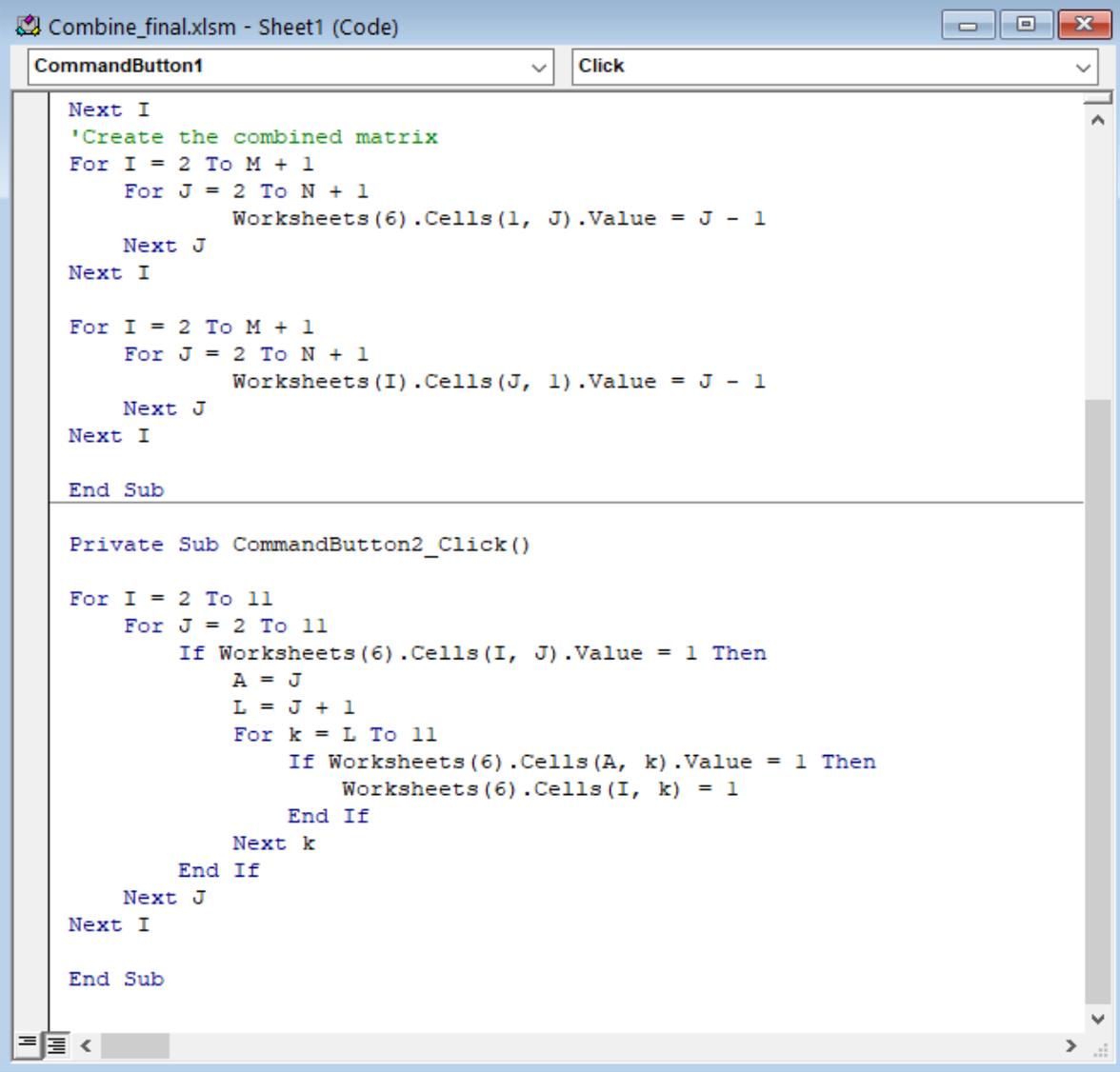
For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(6).Cells(J, 1).Value = J - 1
    Next J
Next I
'Create the combined matrix
For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(6).Cells(1, J).Value = J - 1
    Next J
Next I

For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(I).Cells(J, 1).Value = J - 1
    Next J
Next I

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

For I = 2 To 11
```



```
Combine_final.xlsm - Sheet1 (Code)
CommandButton1 Click
Next I
'Create the combined matrix
For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(6).Cells(1, J).Value = J - 1
    Next J
Next I

For I = 2 To M + 1
    For J = 2 To N + 1
        Worksheets(I).Cells(J, 1).Value = J - 1
    Next J
Next I

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

For I = 2 To 11
    For J = 2 To 11
        If Worksheets(6).Cells(I, J).Value = 1 Then
            A = J
            L = J + 1
            For k = L To 11
                If Worksheets(6).Cells(A, k).Value = 1 Then
                    Worksheets(6).Cells(I, k) = 1
                End If
            Next k
        End If
    Next J
Next I

End Sub
```