

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO DOS SANTOS BATISTA

**UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA
REBALANCEAMENTO DE LINHA MULTIOPERADA NA
MANUFATURA DE MOTORES DIESEL**

CURITIBA

2022

LEONARDO DOS SANTOS BATISTA

**UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA
REBALANCEAMENTO DE LINHA MULTIOPERADA NA
MANUFATURA DE MOTORES DIESEL**

*Use of Mixed Integer Linear Programming for rebalancing a multi-manned
assembly line in the manufacture of diesel engines*

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LEONARDO DOS SANTOS BATISTA

**UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA REBALANCEAMENTO DE LINHA
MULTIOPERADA NA MANUFATURA DE MOTORES DIESEL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Automação E Sistemas.

Data de aprovação: 30 de Agosto de 2022

Dr. Leandro Magatao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Luiz Carlos Felizari, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

Dr. Paulo Henrique Siqueira, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Ricardo Luders, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/09/2022.

s e r e n d i p i d a d e
aptidão de atrair a si acontecimentos favoráveis
de maneira fortuita; dom de fazer boas
descobertas por acaso.

AGRADECIMENTOS

Muitos são aqueles que acompanharam a jornada para o desenvolvimento desse trabalho, alguns inclusive ajudaram ativamente para que tivéssemos êxito, de forma que agradeço à todos pelo suporte e ajuda prestados.

Em especial gostaria de agradecer aos meus pais, Adriana e Marcos, que em muitas ocasiões acreditaram em meu potencial mais do que eu mesmo poderia acreditar, certamente minha coragem em aprender é fruto desse incondicional apoio. Ao meu irmão Lucas que, assim como eu, acredita que a associação de trabalho e disciplina é capaz de superar qualquer desafio, suas conquistas são refletidas em meu orgulho e reforçam nossos ideais.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de profissão, em especial ao Bruno Martins, que proporcionou a faísca necessária para a idealização desse trabalho, além de servir como fonte de inspiração ao longo dessa jornada. E ao Andrey Lopes, que desde nossas primeiras conversas acreditou no potencial desse trabalho e não mediu esforços para sua realização.

Ao meu orientador, Leandro Magatão, que com muito entusiasmo aceitou o convite em me auxiliar no desenvolvimento desse trabalho. Com o passar do tempo tive o privilégio de perceber que o mesmo traz junto à sua sabedoria uma combinação ímpar de características: profissionalismo, humildade e dedicação.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer ao amor, personificado na minha esposa Ana Paula e no meu filho Matheus, que trazem energia à minha vida e são motivadores para minha evolução como ser humano.

RESUMO

A constante busca por maior produtividade na indústria automotiva está associada diretamente com a redução de desperdícios. O problema de balanceamento de linha busca equilibrar de forma otimizada os recursos utilizados na manufatura, minimizando o tempo ocioso de estações de trabalho e operadores. Este estudo tem como premissa a resolução de um problema real para uma empresa automotiva na região de Curitiba, especificamente em uma linha de produção na qual são manufaturados motores diesel. A necessidade por maior capacidade produtiva associada ao aumento do portfólio de produtos produzidos em tal linha foram os principais fatores que impulsionaram a busca por uma proposta de rebalanceamento, que seja factível às limitações impostas ao sistema produtivo em questão. O ambiente fabril no qual este trabalho foi desenvolvido caracteriza-se como uma linha de montagem multioperada na qual são produzidos quatro modelos principais de motores, podendo assim ser classificado como um Problema de Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto (MALBP - *Mixed Model Assembly Line Balancing Problem*). Para isso foi utilizada uma metodologia cíclica, inspirada em conceitos ágeis de gestão, onde a proposta de rebalanceamento é formulada por meio de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Cada versão de resultados foi utilizada para aprimorar a própria metodologia proposta, seja por meio do refinamento de restrições ou ainda na customização do modelo matemático em vigor, aperfeiçoando de forma incremental os resultados obtidos. Como diferencial, esse trabalho se apresenta como uma oportunidade para aproximação de soluções teóricas aos problemas reais encontrados na maioria das empresas de manufatura, onde é abordada a complexidade inerente à um sistema produtivo, refletindo por exemplo no grande número de restrições para reposicionamento e na inter-relação associada aos diferentes modelos de produto. Em postos de trabalho multioperados foram identificadas limitações ergonômicas que resultam em ociosidade, e para tratar tal condição foi proposto adotar um indicador de sinergia dos operadores como fator adicional a ser otimizado, havendo a necessidade de customização do modelo matemático à referida condição ergonômica, assunto esse pouco detalhado na literatura. Os resultados obtidos atendem às necessidades apresentadas pela empresa, onde por meio da redistribuição de 78 atividades, de um total de 212, é definida uma nova proposta de rebalanceamento, factível de implementação, sendo validada inicialmente em ambiente virtual e em seguida de forma prática, com a montagem física de motores, tal proposta também assegura um percentual superior à 98% para a sinergia dos operadores nos postos de trabalho multioperados.

Palavras-chave: rebalanceamento de linhas de montagem; problema de balanceamento de linha de montagem multioperada; linha de montagem de modelo misto; modelo de programação matemática; aplicação real na indústria automotiva.

ABSTRACT

The constant ambition for greater productivity in the automotive industry is directly associated with reducing waste and losses. The line balancing problem seeks to optimally balance the resources used in manufacturing, minimizing the idle time of stations and workers. This study is established on solving a real problem for an automotive company in the region of Curitiba, specifically in a production line where diesel engines are manufactured. The need for greater production capacity associated with the increase in the portfolio of products produced in this line were the main factors that drove the search for a feasible rebalancing proposal, given the limitations imposed on the current production system. The factory environment where this work was developed is characterized as a multi-manned assembly line where four main models of products are produced, which can be classified as a Mixed Model Assembly Line Balancing Problem (MALBP). A cyclical methodology was used to solve it, inspired by agile management concepts, where the rebalancing proposal is formulated by a mathematical model in Mixed Integer Linear Programming (MILP). Each version of the results was used to improve the proposed methodology, either through the refinement of restrictions or even in the customization of the mathematical model, incrementally improving the results obtained. As a differential, this work presents itself as an opportunity to approach theoretical solutions to the real problems encountered in most manufacturing companies, where the complexity of a production system is considered, reflecting, for example, the large number of restrictions for repositioning and in the relationship between different product models. Ergonomic limitations that result in idleness were identified in multi-manned workstations, and a synergy indicator was proposed as an additional factor to be optimized to overcome this ergonomic condition, a subject that is little detailed in the literature. The results met the company's needs, where through the redistribution of 78 activities, out of a total of 212, a new rebalancing proposal is defined, feasible for implementation, validated in a virtual environment, and then practically, with the physical assembly of engines. This proposal also ensures a percentage higher than 98% for the synergy of operators in multi-manned workstations.

Keywords: rebalancing assembly lines; multi-manned assembly line balancing problem; mixed-model assembly line; mathematical programming models; real-world automotive industry application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de motor diesel e seus componentes	13
Figura 2 – Linha A	14
Figura 3 – Posicionamento do motor em estações duais	17
Figura 4 – Exemplos de recomendações ergonômicas	23
Figura 5 – Classificação de linhas de montagem	26
Figura 6 – Diagramas de precedência para um modelo A (a), modelo B (b) e o diagrama de precedências equivalente (c).	28
Figura 7 – Exemplos de balanceamento vertical e horizontal	30
Figura 8 – Exemplos de configurações de linha de montagem	32
Figura 9 – Metodologia aplicada	36
Figura 10 – Exemplificação de instrução de trabalho	37
Figura 11 – Adaptação da Linha A para Estações Duais	41
Figura 12 – Fluxograma de atividades da etapa de verificação da solução	44
Figura 13 – Resultados do tempo de ciclo (em u.t.) em cada estação (V10)	56
Figura 14 – Evolução do tempo de ciclo das estações (em u.t.) para V6 a V10	57
Figura 15 – Distribuição da quantidade de alterações necessárias para cada modelo de produto	59
Figura 16 – Diagrama de precedências (V10)	61
Figura 17 – Exemplificação de tarefa para validação de resultados	62
Figura 18 – Evolução das restrições físicas ao longo das versões	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviaturas

u.t. Unidades de Tempo

Siglas

ALBP	Problema de Balanceamento de Linha de Montagem, do inglês <i>Assembly Line Balancing Problem</i>
ALRP	Problema de Rebalanceamento de Linha de Montagem, do inglês <i>Assembly Line Rebalancing Problem</i>
CT	Tempo de Ciclo, do inglês <i>Cycle Time</i>
CT_{max}	Tempo de Ciclo Máximo, do inglês <i>Maximum Cycle Time</i>
GALBP	Problema Generalizado de Balanceamento de Linha de Montagem, do inglês <i>Generalized Assembly Line Balancing Problem</i>
MMD	Multimodelo Determinístico, do inglês <i>Multi-Model Deterministic</i>
MMS	Multimodelo Estocástico, do inglês <i>Multi-Model Stochastic</i>
SALBP	Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem Simples, do inglês <i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
MALBP	Problema de Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto, do inglês <i>Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem</i>
MALBP*	Problema de Balanceamento de Linha de Montagem Multioperada, do inglês <i>Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem</i>
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
SMD	Modelo Único Determinístico, do inglês <i>Single-Model Deterministic</i>
SMS	Modelo Único Estocástico, do inglês <i>Single-Model Stochastic</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto industrial em análise	12
1.1.1	Características do produto	12
1.1.2	Linha A	13
1.2	Apresentação do problema	15
1.2.1	<i>Mix</i> de produtos e aumento de capacidade	15
1.2.2	Sinergia em estações duais	16
1.3	Definição dos objetivos	17
1.4	Justificativa e limitações	18
1.5	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Tempo de ciclo	20
2.2	Destreza operacional	21
2.3	Condições ergonômicas na manufatura	22
2.4	Tipologia de linhas de montagem	23
2.5	Linhas de montagem de modelo misto	26
2.6	Diagrama de precedências	27
2.7	Balanceamento de linha	28
2.8	Balanceamento de linha multioperada	31
2.9	Conceitos de métodos ágeis aplicados ao balanceamento de linha	32
3	METODOLOGIA APLICADA	35
3.1	Coleta de dados	37
3.2	Identificação de restrições de precedência	38
3.3	Identificação de restrições de recursos	39
3.4	Proposta otimizada de rebalanceamento por meio de modelo matemático	40
3.5	Verificação da solução	41
4	MODELO MATEMÁTICO	45
4.1	Notação Adotada	45
4.2	Função Objetivo	47

4.3	Restrições	49
5	RESULTADOS	55
5.1	Proposta de rebalanceamento	55
5.1.1	Evolução dos resultados	56
5.2	Resultado do equilíbrio em estações duais	58
5.3	Diagrama de precedência e restrições resultantes	60
5.4	Validação dos resultados	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

É conhecido que a indústria automotiva se apresenta como um ambiente propício para aplicação de conceitos, ferramentas e metodologias que buscam o aumento da produtividade. Seja por meio da melhoria contínua ou por iniciativas disruptivas, busca-se diminuir desperdícios e aumentar lucratividade. Em relação ao conceito de lucratividade, esse passa por diversos autores sendo definido como uma função que relaciona produtividade, preço e volume. É possível então concluir que em um setor no qual volume e preço são fatores sujeitos às influências do ecossistema e dos respectivos concorrentes, aumentar a produtividade surge como a melhor forma de se alcançar vantagem competitiva.

Produtividade é a habilidade de satisfazer as necessidades do mercado por produtos e serviços com o mínimo de consumo dos recursos totais (MOSENG; ROLSTADAS, 2001). Além de recursos físicos, como insumos e infraestrutura, outro recurso de extrema importância na busca por maior produtividade, e que será o cerne do estudo aqui apresentado, é o tempo. Nesse sentido presume-se que o tempo de produção de determinado produto tem impacto direto na composição de seu custo. Dessouki, Adiga e Park (1995) sugerem que é possível minimizar o tempo ocioso em estações de trabalho por meio de um procedimento de “balanceamento da linha”, o que resulta diretamente na produtividade e maior lucratividade da empresa. Segundo os autores, a distribuição uniforme de tarefas ao longo das estações de montagem promove um melhor aproveitamento dos seus recursos. De modo simplificado, balancear uma linha envolve realizar uma distribuição equilibrada de atividades entre as diferentes estações de trabalho da linha, de modo a tentar diminuir as ociosidades nas estações e operadores envolvidos. Entre os diversos métodos de otimização de balanceamento de linha, pode-se destacar aqueles que estruturam tal problema e sua resolução por meio de modelos matemáticos.

Recentemente alguns setores da economia passaram a conviver com uma dualidade que impacta as soluções industriais. Ao passo que é interessante estabilizar o processo produtivo o mesmo precisa ser flexível para atender à nova dinâmica do mercado, condição resultante da transição de um modelo de produção em massa para customização em massa. Tu, Vonderembse e Ragu-Nathan (2001) descrevem que existe uma relação positiva entre a capacidade de customizar em massa e o grau de satisfação dos consumidores. De modo que, segundo os mesmos autores, empresas que estruturam seus processos de forma a suportar customização em massa, podem alcançar ganhos mais significativos do que aqueles concorrentes que não possuem a mesma capacidade. Para Scholl e Becker (2006), uma opção apropriada à necessidade de flexibilização em um sistema produtivo é a configuração de linhas de montagem que suportem a produção de diversos modelos de um mesmo produto, descrito na literatura como linhas de montagem de modelo misto (*Mixed Model Assembly Line - MMAL*).

Boysen, Flidner e Scholl (2008) concluem em sua revisão de métodos para resolução de problemas de balanceamento de linha que menos de 5% da literatura em torno desse assunto atende aos requisitos existentes para sua aplicabilidade, havendo carência por pesquisas dire-

cionadas à solução de problemas reais. Sobretudo, o trabalho aqui apresentado documenta o esforço para aumento de produtividade aplicado em uma empresa do setor automotivo, mais especificamente em uma MMAL em que são manufaturados motores diesel, onde deve-se definir e validar uma proposta de rebalanceamento otimizado.

1.1 Contexto industrial em análise

O presente estudo envolve um desenvolvimento em ambiente industrial dinâmico, no qual se faz necessário solucionar um problema comum a linhas de montagem quando associadas ao aumento da complexidade produtiva. Dessa forma, já existe uma linha produtiva instalada e operando, mas devido a mudanças dos produtos envolvidos, um novo balanceamento (ou rebalanceamento), se faz necessário. Sendo assim, é importante primeiramente apresentar ao leitor o ambiente industrial no qual esse trabalho está inserido, de forma que são apresentadas as Características do Produto (subseção 1.1.1) e em seguida ocorre a Apresentação da Linha A¹ (subseção 1.1.2), e após essa contextualização ocorre a Apresentação do Problema (seção 1.2).

1.1.1 Características do produto

A manufatura completa de motores diesel pode-se dividir em duas etapas, a primeira referente aos componentes internos como o sistema de combustão (composto pelos injetores, camisas, bielas, pistões e afins) ou o sistema de sincronização (composto pelo virabrequim, eixo comando, válvulas e demais itens relacionados). A segunda parte da manufatura de motores refere-se aos componentes externos ou, melhor denominados neste trabalho, componentes periféricos ao motor. A maioria dos itens que estão “à mostra” no motor entram na segunda classificação, como por exemplo turbo, chicotes elétricos, filtro de óleo, compressor, tubos e mangueiras. O detalhamento dos principais componentes e sistemas de um motor diesel assim como sua evolução histórica são documentados por Shrinivasa (2012).

Uma característica em comum entre os componentes periféricos é que em grande parte podem ser montados com ferramentas manuais, sem a necessidade de equipamentos como robôs ou máquinas dedicadas. Essa particularidade permite diferentes possibilidades para propostas de balanceamento, uma vez que nesse contexto o número de restrições relativas ao posicionamento de atividades em estações específicas é reduzido, refletindo em um maior grau de liberdade para propostas de rebalanceamento.

Uma característica do setor automotivo é que seus produtos são comercializados com uma considerável diversidade de modelos. Especificamente em relação ao motor é comum que os modelos ofertados resultem da combinação de seus principais atributos. Potência e capacidade impactam principalmente a primeira etapa da manufatura e refletem, entre outros fatores,

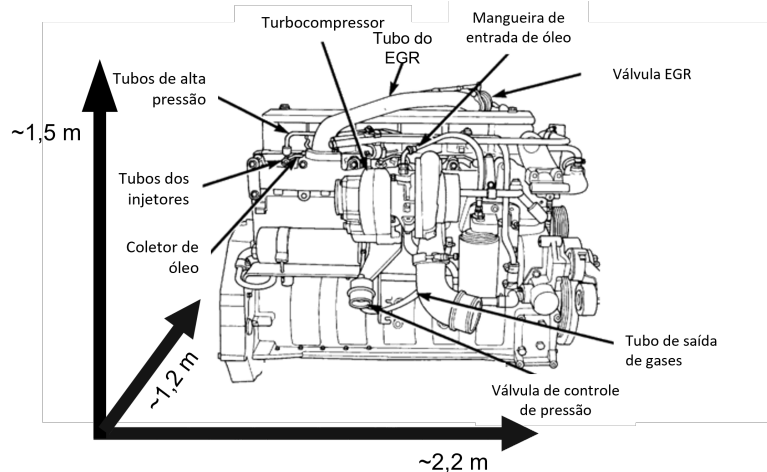
¹ A linha em análise é denominada ao longo do trabalho como Linha A.

no seu tamanho e para quais veículos podem ser utilizados, enquanto opções de funcionalidade estão associadas principalmente aos componentes periféricos do motor.

Outro atributo a ser considerado no presente trabalho refere-se à dimensão do produto. Os motores em questão, em sua grande parte são destinados à implementação em veículos pesados, como caminhões e ônibus. Dessa forma, suas medidas finais, com mais de 2,2m de comprimento, 1,2m de largura e quase 1,5m de altura chegam à ser próximas às de um mini-carro (*city car*). Sendo assim, para alguns componentes o operador precisa reposicionar o motor (*e.g.*, alterar a altura para montagem) de forma a otimizar a ergonomia do processo de montagem. Este reposicionamento é uma tarefa semi-automatizada (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017), feita através do transportador do produto.

A Figura 1 ilustra as condições apresentadas em relação à caracterização do motor diesel assim como suas medidas finais.

Figura 1 – Exemplo de motor diesel e seus componentes



Fonte: Autoria própria (2022).

1.1.2 Linha A

Na referida empresa em que esse trabalho está sendo desenvolvido, os componentes periféricos dos motores são montados em uma linha de montagem denominada como Linha A. Composta atualmente por postos posicionados sequencialmente em um *layout* reto (*layout* do tipo *flow-shop*) com tempo de ciclo² fixo, caracterizando-a como uma linha de montagem cadenciada. De antemão ressalta-se que o tempo de ciclo e valores temporais relacionados, quando apresentados em termos absolutos, foram multiplicados por um fator comum de conhecimento apenas dos autores a fim de garantir a política de sigilo de dados da empresa.

Diversos são os recursos industriais utilizados para a montagem dos produtos na Linha A. A maioria dos itens, como torquímetros, apertadeiras e ferramentas manuais estão dis-

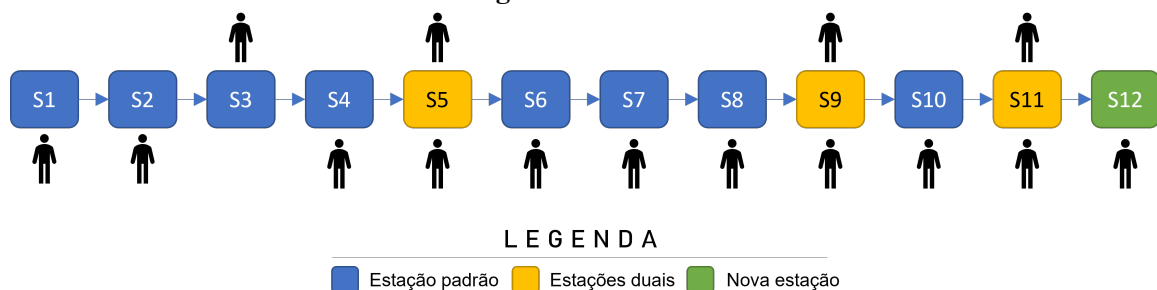
² Tempo médio da retirada consecutiva de dois produtos da linha.

poníveis em todas as estações, por outro lado existem recursos únicos disponibilizados em estações específicas como por exemplo um robô para aplicação de silicone e uma apertadeira com duplo fuso, instalados na primeira e quarta estações respectivamente. É preciso entender que as limitações de disponibilidade e realocação de tais recursos podem restringir as possibilidades de balanceamento, essa relação será aprofundada na seção 3.3.

Para a movimentação do produto na Linha A, utiliza-se um transportador não-automatizado, permitindo que o operador, além de mover o produto acabado para o posto de trabalho subsequente, faça movimentações necessárias no seu posicionamento, como regulação na altura e ângulo de inclinação dos motores. O posicionamento dos operadores é variável de acordo com a necessidade de cada montagem, no entanto, devido ao dimensionamento do produto em questão, frequentemente o operador se posiciona nas regiões laterais, havendo ainda a possibilidade de trabalho na parte frontal do motor. Embora seja uma condição pouco explorada, é possível que um determinado operador possa se deslocar em torno do produto para executar montagens em diferentes regiões. Seguindo as características apresentadas em Michels *et al.* (2019), a Linha A é classificada como uma linha multioperada, assim como a necessidade de seu rebalanceamento é melhor definida no contexto de um Problema de Balanceamento de Linha Multioperada (*Multi-manned Assembly Line Balancing Problem - MALBP**).

Parte da estratégia de adequação industrial da Linha A é a viabilização de um novo posto de trabalho que, por questões de arranjo físico, será implementado no final da linha. Essa condição já é considerada no desenvolvimento desse estudo e pode ser melhor observada na Figura 2. Dentre os 12 postos (*stations*) de trabalho (S1 a S12), 03 possuem uma característica em particular: 02 operadores atuam de forma coordenada em torno do produto. Esses casos são denominados neste estudo como *Estações Duais*. A caracterização das estações duais pode-se assimilar às definições atribuídas à linhas de montagem multioperadas, nas quais existe a flexibilidade na quantidade de operadores para determinada estação, dependendo de atributos do produto, como tamanho e relação de precedência de montagem (MICHELS *et al.*, 2019). O impacto das estações duais é melhor detalhado no Capítulo 3.

Figura 2 – Linha A



Fonte: Autoria própria (2022).

1.2 Apresentação do problema

Diversos são os fatores que motivaram o desenvolvimento deste estudo. De fato, a união de características específicas a esse contexto resultou em uma situação de complexidade considerável para ser solucionada. A necessidade de buscar um rebalanceamento eficiente para absorver o aumento de capacidade produtiva, em associação à uma nova distribuição de modelos são fatores importantes, conforme apresentado na subseção 1.2.1. De modo adicional, é apontada a necessidade de associar à proposta de rebalanceamento restrições que considerem os impactos à ergonomia dos operadores, buscando uma condição de operação adequada, conforme subseção 1.2.2.

1.2.1 *Mix* de produtos e aumento de capacidade

A produção de motores na Linha A passa por um momento de transição em relação ao *mix* de produtos, ou seja, em relação ao conjunto de diferentes modelos de produtos que devem ser produzidos na linha. Seu atual balanceamento muito se assemelha à um problema de balanceamento de linha simples, em inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP), pois conforme (SCHOLL; BECKER, 2006) possui como uma das suas características principais a produção em massa de um produto homogêneo.

Atualmente há um modelo de motor que predomina no *mix* produtivo e como consequência, foi adotado um processo de balanceamento da linha com base na experiência operacional dos engenheiros e técnicos que nela atuam. Ao longo do tempo, sucessivas adaptações foram feitas empiricamente, buscando otimizar o equilíbrio para o modelo de maior volume. Essa condição estabelecida para a Linha A irá mudar consideravelmente no curto prazo, onde o aumento do volume de produção será associado a um novo conjunto de modelos de produto. Ao avaliar os critérios estabelecidos por (SCHOLL; BOYSEN; FLIEDNER, 2011) foi compreendido que a busca pela otimização de balanceamento em sua condição futura está melhor associado a um problema de balanceamento de linha de modelo misto. Rao (1971) e demais autores definem o tempo de ciclo como sendo o tempo médio entre duas saídas consecutivas de produto ao fim da linha de montagem. Uma vez que a quantidade de estações, assim como o número de operadores disponíveis foram critérios previamente estabelecidos pela empresa, a absorção do aumento no volume de produção deve ser alcançada por meio da adequação de um novo tempo de ciclo. Conforme apresentado em seção 2.1, o posto de trabalho com maior tempo de ciclo definirá a taxa de produção máxima da linha; a referida taxa deve idealmente ser menor ou igual ao *takt time*³ estabelecido pela companhia. A adaptação da Linha A em relação ao aumento do conjunto de produtos e respectivo impacto no *takt time* está resumida na Tabela 1.

³ A taxa na qual uma unidade fabril precisa produzir determinado produto para atender a demanda estabelecida (TAPPING; LUYSTER; SHUKER, 2002).

Tabela 1 – Condições da Linha A

Condição atual			Condição futura		
Modelos produzidos	Volume de produção	Takt Time (u.t.)	Modelos produzidos	Volume de produção	Takt Time (u.t.)
A	89%	1215	A	53%	1134
			B	16%	
			C	21%	
			D	5%	
Outros	11%		Outros	5%	

Fonte: Autoria própria (2022).

Uma vez que são previamente definidas as condições gerais a serem implementados na Linha A, sugere-se a classificação do problema como atrelada à obtenção de uma solução factível às restrições, dado um tempo de ciclo limite. Na seção 2.5 e seção 2.7, detalha-se a classificação do contexto como sendo do tipo MALBP-F (*Feasibility Case*). Contudo, uma caracterização do problema como sendo do tipo de minimização do tempo de ciclo, dado um número de estações fixo (MALPB-2) também pode ser aceita, a depender dos objetivos de otimização efetivamente elencados.

Ainda nesse contexto, é de conhecimento da organização a volatilidade inerente ao segmento automobilístico. Existe uma sazonalidade que impacta diretamente o volume de produtos produzidos, uma condição que se torna mais impactante em linhas de montagem de modelo misto. Soluções que permitem de forma ágil a reconfiguração de linhas de manufatura já estão no horizonte de investimentos da empresa.

1.2.2 Sinergia em estações duais

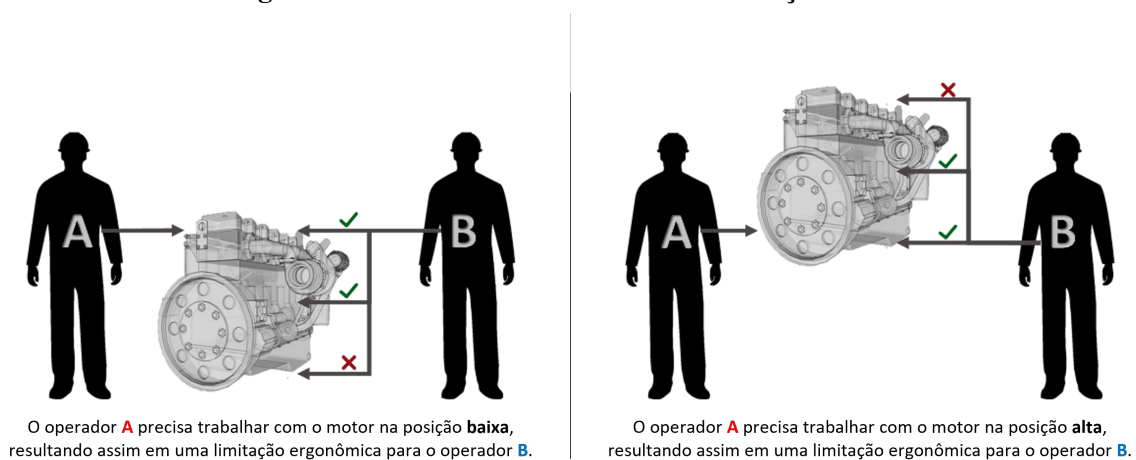
Para estações onde apenas um operador trabalha, o posicionamento do produto é feito por meio do transportador para a condição de preferência do operador. Este movimento ocorre apenas uma vez para adequar a altura do motor à melhor condição ergonômica e seu tempo de execução é considerado desprezível para as questões de balanceamento. No entanto, essa questão torna-se mais complexa quando observada nas estações duais, pois deve considerar a necessidade de “sinergia” entre tarefas que podem ser feitas simultaneamente em cada lado do produto, mas que precisam de um posicionamento adequado do motor para sua realização.

Definir uma altura ideal do produto, para uma montagem específica em um dos seus lados pode restringir as possibilidades de montagem no lado oposto, conforme ilustrado na Figura 3. Preliminarmente essa característica não gerou maiores questionamentos para resolução do problema proposto, no entanto, ao longo do desenvolvimento desse estudo foi identificado

certo grau de complexidade associado à essa condição. A alternativa adotada, junto com as customizações necessárias ao modelo matemático, são detalhadas nos Capítulo 3 e Capítulo 4. Foi necessário considerar o tempo de execução das tarefas para cada operador, em cada lado do produto, e em cada posição. Assim, uma série de decisões referentes ao posicionamento do produto foram modeladas para assegurar uma condição ergonômica favorável aos operadores.

No melhor conhecimento do autor, poucos estudos abordam detalhadamente tal condição de modo concomitante ao balanceamento otimizado da linha, podendo ser destacada a definição do problema apresentado por Pilati *et al.* (2021a), onde também são identificadas limitações do posicionamento do produto em estações multioperadas.

Figura 3 – Posicionamento do motor em estações duais



Fonte: Autoria própria (2022).

1.3 Definição dos objetivos

O Objetivo Geral desse estudo é obter uma proposta de otimização para o rebalanceamento da Linha A, de modo que atenda as condições futuras apresentadas (*e.g.*, novo *mix* produtivo), considerando-se como meta em relação ao tempo de ciclo obter um valor igual ou inferior a 1134 u.t..

Por se tratar de um problema relacionado a uma condição futura, na qual, por exemplo, destreza operacional e melhoria contínua são competências a serem aprimoradas, são aceitos como valores válidos para o tempo de ciclo de cada modelo de produto aqueles que fiquem menores ou iguais ao *takt time*, aceitando-se, ainda, uma variação de 5% para mais. De forma complementar, destacam-se os seguintes Objetivos Específicos para o desenvolvimento do trabalho:

- A proposta de rebalanceamento deve contemplar os 04 principais modelos de produto (A, B, C e D), considerando suas características e respectiva participação no volume de produção.

- Considerar a otimização do balanceamento, buscando equilibrar as cargas de trabalho entre as estações e para os diferentes produtos respectivamente.
- Satisfazer à condição de “sinergia” entre os operadores das estações duais. Evitando propostas onde um dos operadores se encontre ocioso devido a limitações ergonômicas.
- Por se tratar de um problema com aplicação real, o mesmo deve ser desenvolvido de modo que seja possível sua implementação com o menor número possível de alterações frente à condição atual da Linha A.
- Validar as soluções obtidas junto a especialistas do sistema.

1.4 Justificativa e limitações

Considerando as condições apresentadas, é claramente identificada a necessidade de uma proposta de balanceamento otimizada com base no futuro processo da Linha A. No entanto, mudanças de balanceamento de linha dessa magnitude dificilmente são executadas de forma empírica, dessa forma é necessário estabelecer um método capaz de atingir os objetivos específicos. Previamente outros estudos comprovaram a eficácia da utilização de modelos matemáticos na busca por otimização de balanceamento; nesse aspecto vale destacar, por exemplo, os desenvolvimentos realizados por Sikora, Lopes e Magatão (2017). Em Batista e Magatão (2021) é apresentada a possibilidade de redução em cerca de 9% no tempo de ciclo para o mesmo contexto em análise.

Devido à complexidade de um ambiente real de produção, alguns fatores presentes serão abordados neste estudo de uma forma genérica e seu detalhamento pode ser encontrado em trabalhos dedicados aos respectivos temas. Nesse aspecto, destreza operacional e sequenciamento do *mix* de produtos, são temas que, embora exerçam influência, não serão aprofundados.

Outro fator a ser considerado no desenvolvimento desse trabalho é a possibilidade de ir além das fronteiras estabelecidas na literatura. Poucos são os casos onde pode-se validar em um ambiente industrial real a aplicabilidade de uma solução hipotética (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2008). Dentro da metodologia proposta, que será apresentada posteriormente (Capítulo 3), a etapa de validação se torna fator protagonista no desenvolvimento desse trabalho, estabelecendo dessa forma um maior foco na aplicação, enquanto o esforço para desenvolvimento de um modelo matemático limita-se à adaptação de modelos previamente explorados, ainda que modificações sejam necessárias para a correta representação do problema em análise, em especial a questão relativa à ergonomia em estações duais.

1.5 Estrutura do trabalho

No presente capítulo encontra-se a contextualização do tema, a caracterização do problema a ser resolvido, os objetivos da dissertação, a justificativa para a elaboração deste trabalho e o formato como o mesmo está estruturado. Em seguida, no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica para os temas mais impactantes desse contexto. No Capítulo 3, a metodologia cíclica utilizada para o desenvolvimento do trabalho é descrita. Em seguida, no Capítulo 4 são exploradas as adaptações no modelo matemático de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017) para adequação às características do problema em questão. No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos para o rebalanceamento da Linha A, tendo por base a metodologia proposta. O trabalho é então concluído no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre a qual a dissertação é desenvolvida, enfatizando-se questões que refletem um ambiente industrial genérico associado às características específicas da *Linha A*. O presente capítulo é dividido nos seguintes tópicos: Tempo de ciclo; Destreza operacional; Condições ergonômicas na manufatura; Tipologia de linhas de montagem; Linhas de Montagem de Modelos Mistos (MMAL); Diagrama de precedências; Balanceamento de linha; Balanceamento de linha multioperada; e, por fim, Conceitos de métodos ágeis.

2.1 Tempo de ciclo

Segundo Gori (2012), em uma linha de montagem, os operadores realizam um conjunto de atividades para montar determinado produto, e a duração dessas operações, em cada uma das estações de trabalho, pode influenciar o tempo de ciclo (*Cycle Time* - CT) da linha. A estação com maior tempo operacional, denominada estação gargalo, é mais lenta do que as demais e conseqüentemente limita a taxa de produção da linha. Ou seja, a produtividade é afetada pela estação com maior tempo de ciclo.

Quando há pouca variação entre os tempos de execução de uma determinada tarefa, como em casos em que as tarefas são simples de serem realizadas, pode-se considerar que os tempos de execução são determinísticos. De forma contrária, variações consideráveis nos tempos de execução das tarefas, seja por motivos de alta complexidade da tarefa ou instabilidade operacional, requerem a consideração de tempos estocásticos para a representação das mesmas. (SCHOLL; BECKER, 2006).

Em uma linha de montagem de modelo misto, cada modelo de produto requer um conjunto específico de tarefas para sua conclusão. A carga de trabalho designada a cada operador depende do modelo que está sendo produzido, desse modo, pode ocorrer que em uma determinada estação o trabalho seja concluído em menor tempo se comparado com as demais estações. Ou ainda, em estações onde mais de um operador atuam de forma coordenada, o tempo de ciclo da estação será definido pelo tempo de montagem vinculado ao operador com maior carga de trabalho. Em ambos os casos, são esperadas variações no tempo de ciclo em função do modelo ou do posto de trabalho em que o produto se encontra.

Outro conceito relevante no contexto dos tempos de execução de tarefas é o de *Takt Time*, que pode ser entendido como a taxa na qual uma unidade fabril precisa produzir determinado produto para atender a demanda estabelecida (TAPPING; LUYSTER; SHUKER, 2002).

Tempo de Ciclo e *Takt Time* são conceitos que não devem ser entendidos isoladamente, pois há um encadeamento significativo entre eles no contexto de balanceamento de linhas de montagem. Em um sistema produtivo onde o CT é menor ou igual ao *Takt Time*, pode-se considerar que a linha de montagem em questão possui capacidade produtiva para atender à demanda

existente; caso contrário, é necessário reduzir o CT para que a linha consiga atender tal demanda. É apresentado na seção 1.3, como objetivo central do presente estudo, estabelecer uma proposta de rebalanceamento na qual as estações da Linha A possuam tempo de ciclo menor ou igual à 1134 u.t, o *takt time* estabelecido pela companhia.

Outras situações em que o tempo de tarefa torna-se variável incluem paradas de máquina, fadiga de operadores, oscilações de desempenho, defeitos na matéria prima, instabilidades de operações manuais (SAIF *et al.*, 2014). Meira (2015) destaca esta e outras possibilidades de comportamento dinâmico da variação dos tempos, assim como o efeito de sucessivas melhorias no processo.

2.2 Destreza operacional

Em linhas de produção manuais o agente principal é o operador que ali atua, onde segundo Gräßler *et al.* (2021) uma melhor performance do sistema produtivo não deve ser alcançada apenas com a otimização de aspectos técnicos, mas também através da consideração de fatores humanos. É definido por Neumann, Kolus e Wells (2016) que fatores humanos podem ser entendidos como o conjunto de todas as características humanas que influenciam suas ações em um sistema sociotécnico. Envolvem aspectos físicos (ex. ergonomia), aspectos mentais (ex. habilidades) e aspectos psicossociais (ex. motivação). No segmento da indústria automotiva, onde frequentemente ocorrem mudanças que envolvem desenvolvimento tecnológico, é desejado que os trabalhadores sejam capazes de aprender rapidamente para evitar o declínio de desempenho do sistema produtivo (SEBRINA; CAKRAVASTIA, 2011).

O modelo de curva de aprendizado é um método para descrever a capacidade de aprendizado de uma organização com o acúmulo de experiência. O conceito de modelo de curva de aprendizado tem sido amplamente utilizado na indústria desde o final da década de 1930 e uma pesquisa abrangente sobre o tema e suas aplicações é apresentada em Yelle (1979). O modelo de curva de aprendizado tem muitas aplicações, como formulação de estratégia de fabricação, programação de produção e treinamento, podendo ainda ser usado para prever o desempenho operacional de novas plantas e identificar processos de baixo desempenho (BLANCETT, 2002). Ao longo dos anos diferentes formulações e customizações foram feitas aos modelos de curva de aprendizado, no entanto uma relação que permanece constante desde a criação desse conceito é a relação direta entre tempo e aprendizado.

Segundo Santos, Vieira e Balbinotti (2015), é possível que os trabalhadores aprendam as operações necessárias para execução do seu trabalho através do treinamento. De forma que a repetibilidade dos gestos resulta em uma maior destreza, o que reduz a dispersão dos tempos da execução e os riscos de não qualidade, além de tornar a montagem mais ágil e melhorar a fluidez de movimentos do operador. Há também uma relação da destreza com a ergonomia, pois os treinamentos podem também focar no ensino da postura correta de execução dos movimentos dos funcionários.

Em casos reais, o tempo de tarefa pode variar por diversos motivos. Há, por exemplo, o efeito da aprendizagem do operador, que tende a reduzir o tempo da tarefa conforme obtém experiência na realização dos movimentos. Nestes casos o tempo de tarefa pode ser considerado como uma variável que depende da taxa de aprendizagem dos operadores (SAIF *et al.*, 2014). Este é um aspecto relevante no contexto do presente trabalho, pois há a tendência de que os tempos de montagem dos modelos de produtos sejam diminuídos com o passar do tempo. Deste modo, a consideração realizada na seção 1.3, na qual aceitam-se soluções com uma margem temporal de 5% (para mais) advém desta característica de diminuição temporal atrelada à destreza operacional.

2.3 Condições ergonômicas na manufatura

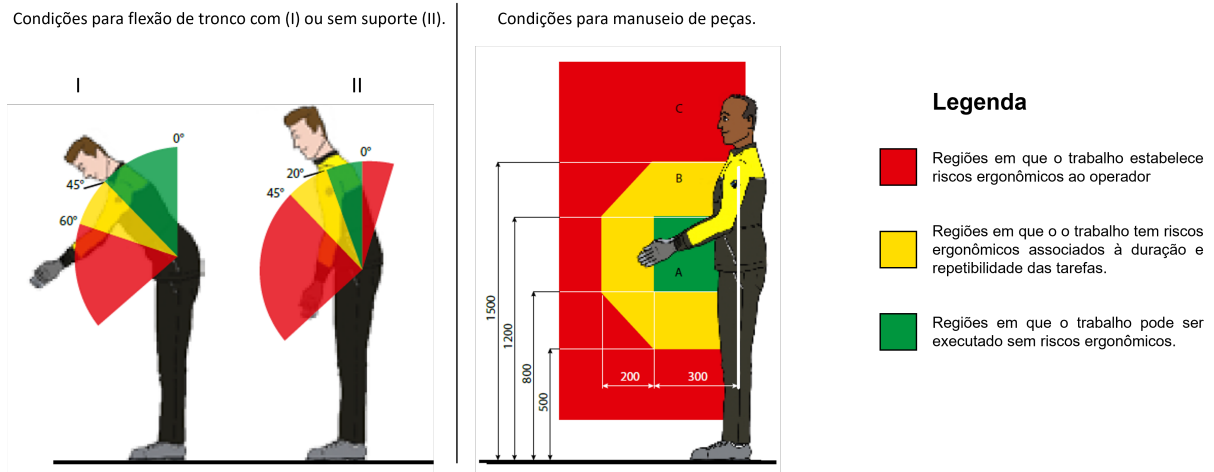
Em um posto de trabalho podem ser observados dois aspectos em relação ao posicionamento e aos recursos utilizados: o enfoque tradicional que busca diminuir a movimentação desnecessária, e o enfoque ergonômico com foco principal na análise biomecânica da postura dos operadores (IIDA, 2005).

Uma forma de avaliar a condição ergonômica dos operadores é utilizando a ferramenta de avaliação de tarefas repetitivas - ART (*Assessment of Repetitive Tasks Tool*), ferramenta essa que foi criada em 2009 pelo HSE (*Health and Safety Executive*) para avaliação de risco de tarefas repetitivas que levam a distúrbios musculoesqueléticos dos trabalhadores. O método OCRA (*Occupational Repetitive Actions*) é também um dos métodos mais utilizados na indústria automotiva para analisar a exposição dos trabalhadores aos fatores de risco de distúrbios musculoesqueléticos dos membros superiores, resultantes de tarefas repetitivas. A análise pode ser realizada por meio do cálculo do índice OCRA ou da determinação dos valores limites de risco, usando uma lista de verificação previamente estabelecida. Ambos os métodos ART e OCRA baseiam-se na análise de frequência e repetição de movimentos, na força necessária para executar o trabalho, na postura dos operadores e outros fatores fisiológicos. Dentre os diversos estudos que apontam a aplicação desses métodos, menciona-se o trabalho de Roodbandi *et al.* (2021), que, além de detalhar, estabelece uma relação entre os dois métodos.

É comum no setor automotivo que cada empresa estabeleça critérios e recomendações em relação às condições ergonômicas ideais para seus colaboradores através de guias e instruções corporativas internas. Tais guias são, em suma, estabelecidos seguindo os critérios adotados em métodos conhecidos (*e.g.*, ART e OCRA). A Figura 4 exemplifica tais recomendações ergonômicas, onde determinadas regiões e condições de trabalho são restringidas.

De acordo com Iida (2005), existem diversas definições sobre ergonomia e, em geral, todas buscam ressaltar a interface do sistema homem-máquina-ambiente, onde ocorrem as trocas de informações e de energias, assim como seu aspecto multidisciplinar. Segundo os autores, a ergonomia é um estudo de orientação dupla, onde inicia-se com o estudo sobre o trabalhador e, em um segundo momento, projeta-se o trabalho para que a pessoa o possa executar.

Figura 4 – Exemplos de recomendações ergonômicas



Fonte: Autoria própria (2022).

Santos, Vieira e Balbinotti (2015) apresentam que a visão dos colaboradores é de que a ergonomia adequada é fator essencial para uma melhor condição de trabalho. Ainda segundo os autores, a melhoria contínua quando direcionada à otimização nas condições ergonômicas, resulta em menores taxas de defeito e maior performance produtiva.

Pode-se estabelecer uma relação entre a ergonomia e a produtividade dos trabalhadores, indicando que em vez de investir em homem (*man*), máquina (*machine*), material (*material*) e método (*method*), abordagem 4m, pode-se melhorar a ergonomia de postos de trabalho e, conseqüentemente, obter economia de custos. Essa definição elaborada por (PILATI *et al.*, 2021b) é apresentada junto à caracterização de problemas de sincronização em linhas de montagem multioperadas (*multi-manned assembly line synchronization problem - MALSP*), onde cada operação deve ser executada com o produto devidamente posicionado. Do ponto de vista operacional, contudo, podem ocorrer posições do produto incompatíveis para postos de trabalho nos quais dois ou mais operadores atuam mutualmente.

Dessa forma, considerações em relação à condição ergonômica no posto de trabalho são pertinentes em sistemas de produção seriada e, por conseguinte, no estudo aqui apresentado. O operador somente deve realizar uma determinada tarefa com o produto posicionado de modo correto, permitindo que recomendações ergonômicas da empresa, determinadas *a priori*, sejam satisfeitas. Deste modo, o correto posicionamento do motor em cada posto de trabalho se faz importante, em particular nas estações duais, nas quais as condições ergonômicas de ambos trabalhadores devem ser equilibradas.

2.4 Tipologia de linhas de montagem

O sistema produtivo como conhecido atualmente teve sua origem à partir do início do século XX, quando Ramson Olds desenvolveu para a *Olds Motor Vehicle Plant* em Detroit, Mi-

chigan, a primeira linha de montagem. O processo de montagem foi alterado para um método progressivo, com operações repetitivas, postos de trabalho fixos, e movimentação do produto sob uma base com rodízios (Thomopoulos (1967) *apud* Meira (2015)). Seguiu-se, então, melhorias conduzidas na *Ford Motor Company* onde ocorreu uma transição do método usual de trabalho: as atividades que antes uma única pessoa era responsável por realizar para obter um produto completo, migraram para um método de divisão em tarefas, onde cada operador seria responsável pela montagem de uma parte do produto. Em ambos casos, o resultado foi um grande aumento de produtividade

Askin *et al.* (1993) conceituam linha de montagem como a associação seriada de um conjunto de estações de trabalho, interligadas por um fluxo sequencial onde cada estação incrementa o valor agregado do produto com a montagem de novas peças ou subconjuntos, ao passo que se obtém o produto acabado ao final da linha.

O processo de manufatura é instaurado em sua maioria com base em sistemas de linha de montagem para os quais diversos autores apontam classificação. Podendo haver uma ligeira diferença entre as descrições segundo cada autor, os principais fatores que constituem a classificação de uma linha de montagem dizem respeito ao seu *layout*, à diversidade de produtos ali produzidos, ao seu fluxo, e à variação do tempo operacional de cada tarefa. Fatores como o nível de automação instalado, linha de negócio e existência de *buffer* também são comumente utilizados para tal caracterização. Uma adaptação da definição construída por Saif *et al.* (2014) é apresentada na Tabela 2.

O *layout* mais tradicional em ambientes industriais é o *layout* em linha reta, onde os produtos são transferidos sucessivamente pelos postos de trabalho que estão posicionados em série. Linhas paralelas são comumente utilizadas para dividir a demanda entre estações onde as operações que requerem maior tempo de processamento podem ser executadas por mais de uma estação simultaneamente. Nas linhas em U o produto passa pela mesma estação ou operador mais de uma vez ao percorrer a linha. Este arranjo busca otimizar a utilização das estações e operadores, reduzindo o tempo ocioso e eliminando a necessidade de duplicar estações. Nas linhas com dois lados (*two-sided*) mais de um operador ou equipamento atuam simultaneamente na mesma estação (SAIF *et al.*, 2014), um *layout* comum quando os produtos processados são pesados ou grandes (*e.g.*, automóveis, máquinas agrícolas).

Em relação à diversidade de produtos produzidos em tal linha de montagem pode-se classificar em três especificações, a primeira denominada modelo único, tem sua origem vinculada à própria definição de linha de montagem, onde a produção em massa foi instaurada e apenas um modelo de produto é produzido. Quando existem diferentes modelos sendo produzidos em uma mesma linha pode-se classificá-la entre multimodelo e modelo misto, e para melhor explorar cada caso esse detalhamento é feito na seção 2.5.

Segundo Scholl (1999), em uma linha com passo sincronizado (*paced*) a movimentação do produto entre os diferentes postos de trabalho acontece de maneira contínua e progressiva à uma velocidade constante, sendo em muitas vezes executado por um sistema mecânico de mo-

Tabela 2 – Classificações de linha de montagem

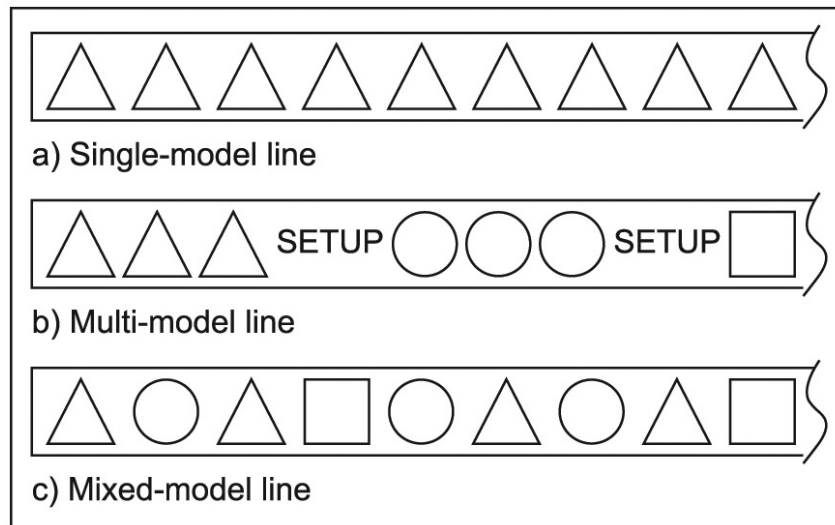
<i>Layout</i>	Linha reta (em série)
	Linhas em paralelo
	Linha em U
	Linhas com dois lados (<i>two-sided line</i>)
Produtos	Modelo único
	Modelo misto
	Multimodelo
Fluxo da linha	Linha de passo contínuo (<i>paced</i>)
	Linha de passo sincronizado (<i>unpaced synchronous</i>)
	Linha de passo não sincronizado (<i>unpaced asynchronous</i>)
Tempo de tarefa	Tempo fixo (determinístico)
	Tempo variável
	Tempo estocástico
Função objetivo	Objetivo único
	Multiobjetivo
Abordagem do balanceamento	Linha de Montagem Simples (SALBP)
	Linha de Montagem Generalizada (GALBP)

Fonte: Saif et al. (2014).

vimentação, como uma esteira ou *conveyor*. Para linhas de montagem que não possuem passo contínuo (*unpaced*), o produto permanece estático enquanto o operador executa as tarefas alocadas no respectivo posto de trabalho, de modo que apenas após a conclusão da última tarefa é que o produto pode ser movido para a próxima estação. Nesse caso é possível duas diferentes situações: na primeira, a linha trabalha com um avanço sincronizado, onde é necessário que todos os operadores, em seus respectivos postos de trabalho, tenham finalizado todas as tarefas, permitindo assim que o sistema de transporte seja liberado para movimentar de forma sincronizada os produtos para as estações sucessoras. Uma segunda possibilidade ocorre quando, caso o operador finalize as tarefas e o próximo posto de trabalho esteja vazio, é permitida a movimentação do produto, independentemente das condições das demais estações. Alguns trabalhos, como documentado em (ASKIN *et al.*, 1993), apontam a complexidade e necessidade de *buffers* intermediários em linhas de montagem com passo não sincronizado.

Ainda sobre a classificação de linhas de montagem é possível observar o tempo operacional de cada tarefa, podendo esse ser fixo, variável ou estocástico. A simplificação para tempos de tarefa fixos, ou determinísticos, é justificada quando sua variabilidade é pequena, característica que é encontrada em sistemas de produção automatizados ou, quando executado por trabalho humano, é pressuposto de um sistema de produção robusto com um alto nível de qualificação e repetibilidade (MEIRA, 2015). Ainda segundo o autor, em casos reais é comum

Figura 5 – Classificação de linhas de montagem



Fonte: Becker e Scholl (2006a).

que os tempos de tarefas adotem um comportamento estocástico, dado as variáveis impostas ao sistema de produção, como nível de habilidade variável entre os operadores, atrasos nas entregas de insumos ou ainda a ocorrência de absenteísmo.

2.5 Linhas de montagem de modelo misto

Em relação à diversidade de produtos a serem produzidos em determinada linha de montagem, pode-se classificá-la em três tipos segundo (SCHOLL; BECKER, 2006), os quais são ilustrados na Figura 5:

- **Linha de modelo único (*Single-model line*)**, encontrada principalmente em sistemas de produção em massa de um produto homogêneo. Onde tal modelo é composto por tarefas que possuem um tempo determinístico e a carga de trabalho é constante ao longo da linha.
- **Linha multimodelo (*Multi-model line*)**, que são geralmente utilizadas para montagem de dois ou mais diferentes modelos de um mesmo produto, este caso é caracterizado pelo planejamento de produção em lotes para cada um dos modelos, podendo ainda haver a necessidade de *set-up* entre os diferentes lotes de produção.
- **Linha de modelo misto (*Mixed-model line*)**, onde também são utilizadas para montagem de dois ou mais diferentes modelos de um mesmo produto, mas onde não há necessariamente um planejamento prévio para o sequenciamento da produção uma vez que os modelos são muito semelhantes, podendo ser produzidos de forma contínua e compartilham recursos já disponíveis na linha de montagem

Devido ao contexto em que esse trabalho é desenvolvido, faz sentido considerar um aspecto mais amplo sobre a indústria automotiva que, durante o final da década de 1980, passou por uma transição entre a produção em massa para a customização em massa, e que segundo Hart (1995) é afetada por fatores como instabilidade da demanda, fragmentação dos mercados, redução do ciclo de vida dos produtos, rápido desenvolvimento tecnológico, e pelo surgimento de novos métodos de fabricação. Tais fatores são melhores absorvidos por um sistema produtivo composto por linhas de montagem de modelo misto. A fim de obter vantagem econômica é comumente proposto que modelos similares de um mesmo produto possam ser fabricados em um processo produtivo comum. Essa tendência na indústria automobilística é reflexo do considerável aumento de diversidade de produtos. Neste modelo produtivo é possível estimular o compartilhamento de recursos e absorver as variações de demandas.

Dada a caracterização de uma linha de montagem de modelo misto, Boysen, Fliedner e Scholl (2008) apontam para a necessidade de assegurar que um dos modelos, ao possuir características específicas, não acabe por sobrecarregar um determinado posto de trabalho, o que por consequência impactaria o tempo de ciclo de toda a linha de montagem. Ainda segundo os autores podem ser exploradas duas abordagens para mitigar tal problema.

A primeira consiste em sincronizar o balanceamento de linha com opções de sequenciamento da produção de modo que sejam alternados modelos com maior tempo operacional com modelos de menor intensidade para cada estação. As implicações dessa abordagem podem ser observadas em (MERENGO; NAVA; POZZETTI, 1999).

Uma segunda abordagem que pode ser adotada junto ao balanceamento de linhas de modelo misto consiste em assegurar que o tempo de ciclo seja observado para todos os modelos em cada estação de trabalho. Isso garante que não ocorra sobrecarga para determinado volume e, portanto, torna o sequenciamento trivial, em contrapartida pode levar à tempos de ciclos mais altos e gerar ociosidade para modelos com menor carga de trabalho.

2.6 Diagrama de precedências

Para a execução das tarefas em uma linha de montagem é necessário estabelecer uma sequência lógica entre tais atividades, de forma a evitar qualquer limitação ao operador em seu posto de trabalho. Seja por questões de acesso, disponibilidade de recursos ou distribuição de tarefas ao longo da linha, é fundamental, para formação de uma proposta de balanceamento, estabelecer a sequência gradual em que devem ser executadas tais montagens.

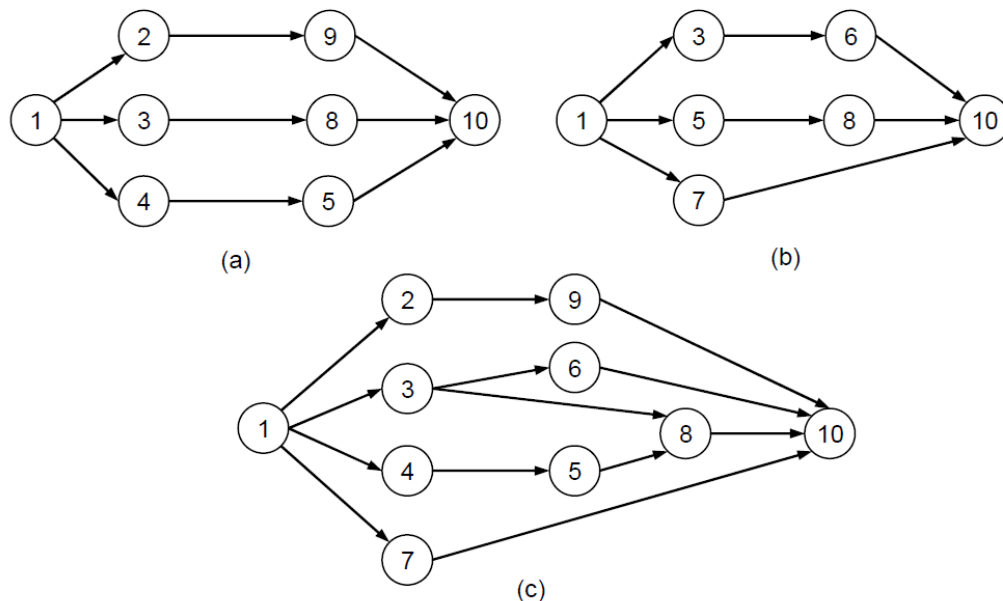
Para Gaither e Frazier (2002) , a precedência entre tarefas é descrita como sendo “a sequência ordenada em que as tarefas devem ser executadas”. Os mesmos autores ainda complementam: “a precedência de cada tarefa é conhecida a partir de uma lista das tarefas que devem precedê-la imediatamente”. Devido às condições lógicas e ergonômicas, as montagens são ordenadas sequencialmente, limitando assim as possibilidades de rebalanceamento. Um exemplo clássico se refere à tarefas nas quais o posicionamento de uma peça ocorre em um

determinado posto de trabalho e, posteriormente, o seu aperto em outra estação; nesse caso o posicionamento deve respeitar a restrição de precedência ao aperto.

Dolgui e Proth (2013) sugerem que as relações de precedência entre tarefas devem ser indicadas na forma de matriz ou de um diagrama de precedência, onde todas as tarefas requeridas para a produção de um determinado produto sejam consideradas. O diagrama é essencialmente simples, onde a caracterização de cada tarefa é indicada através de círculos (nós) que possuem em seu interior a numeração para sua identificação, combinados com a inter-relação entre diferentes tarefas, representadas por setas direcionais que partem da tarefa predecessora e chegam à tarefa sucessora. Para abordar problemas de balanceamento de linhas de modelo misto é comumente utilizado o conceito de diagrama de precedência equivalente, proposto inicialmente por (THOMOPOULOS, 1967) e que foi posteriormente adotado em diversos outros casos disponíveis na literatura.

A Figura 6 busca exemplificar a construção de um diagrama equivalente representando as relações de precedência de dois modelos de um determinado produto. No diagrama de precedências equivalente, consideram-se todas as tarefas de todos os modelos.

Figura 6 – Diagramas de precedência para um modelo A (a), modelo B (b) e o diagrama de precedências equivalente (c).



Fonte: Adaptado de Gökçen e Erel (1998).

2.7 Balanceamento de linha

Segundo Dolgui e Proth (2013), o balanceamento de linha tem como principal função combinar um conjunto de tarefas a estações de trabalho, com o objetivo de aumentar a produtividade e, conseqüentemente, reduzir o custo de produção da linha de montagem. Wild (1972) identifica a balanceamento como uma das questões mais importantes à serem planejadas em

um sistema produtivo, pois o correto equilíbrio das cargas de trabalho de cada estação permite um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, e conseqüentemente diminuem o custo de produção.

Em (BECKER; SCHOLL, 2006a) o conceito de balanceamento de linha é dividido em duas vertentes: *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP), sendo essa a versão mais simples de um problema de balanceamento, com um único modelo sendo produzido de forma cadenciada, e *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* (MALBP), que, de forma análoga, busca a otimização em um ambiente onde diferentes modelos de produtos compartilham uma mesma linha de montagem.

Uma segunda divisão pode ser estabelecida em relação aos objetivos dos problemas de balanceamento (EREL; SARIN, 1998), sendo os dois tipos mais comuns: minimização do tempo ocioso total, conhecendo-se o tempo de ciclo; e, minimização do tempo de ciclo conhecendo-se o número fixo de estações de trabalho. No primeiro tipo, majoritariamente é buscada a minimização da quantidade de estações de trabalho a partir de um tempo de ciclo imposto. Assim, o problema de balanceamento de linhas pode ser reduzido e simplificado a: (tipo 1) minimizar a quantidade de estações de trabalho, conhecendo-se o tempo de ciclo; ou, (tipo 2) minimizar o tempo de ciclo, conhecendo-se o número de estações de trabalho.

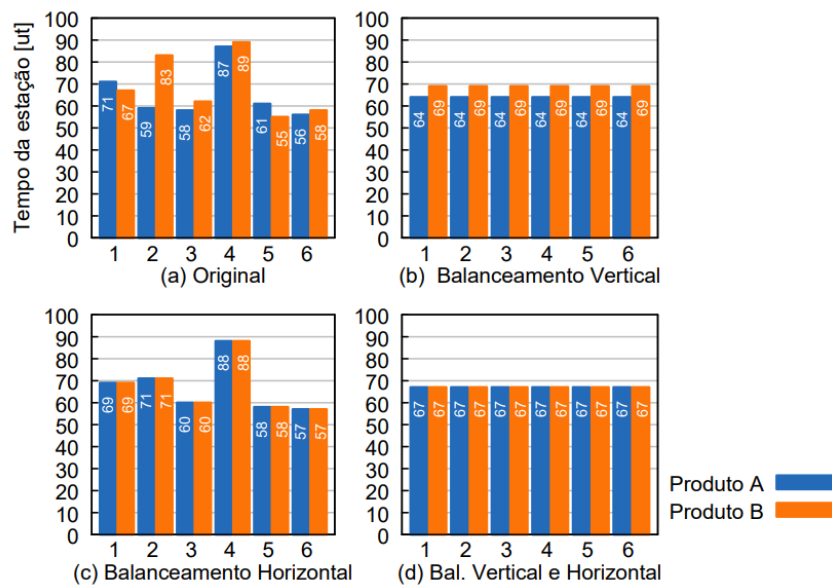
Outra definição relevante, exposta por (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2007), é de que em um contexto no qual se busca a otimização do balanceamento de linha, os tempos operacionais das estações podem ser inferiores ao tempo de ciclo estipulado, resultando em tempo ocioso na estação até que o tempo de ciclo seja atingido. Dessa forma, o balanceamento de linhas de montagem simples pode ser classificado em quatro tipos segundo estes autores:

- **SALBP - 1:** Partindo de um tempo de ciclo determinado, objetiva minimizar o número de estações de trabalho;
- **SALBP - 2:** A partir de um número de estações de trabalho predeterminado, busca minimizar o tempo de ciclo;
- **SALBP - E:** A eficiência na linha é maximizada a partir de alterações no número de estações de trabalho e, também, no tempo de ciclo;
- **SALBP - F:** Partindo de um número de estações de trabalho e tempo de ciclo limite predeterminados, objetiva-se encontrar um equilíbrio viável (factível) para a linha.

Ainda no âmbito de melhor equilibrar a distribuição das cargas de trabalho em cada estação vale ressaltar o conceito proposto por Merengo, Nava e Pozzetti (1999): balanceamento vertical e horizontal. A Figura 7 exemplifica os conceitos de balanceamento vertical e horizontal. Primeiramente é apresentada a condição Original do balanceamento da linha, Figura 7(a). Na sequência pode ser observado o balanceamento vertical para equalizar as cargas de trabalho entre as estações da linha, considerando um modelo de cada vez, Figura 7(b). Assim, ao

considerar isoladamente cada modelo de produto produzido o balanceamento pode ser alcançado em sua otimalidade, mas diferenças de tempo entre modelos de produto na mesma estação podem ocorrer. No contexto de balanceamento horizontal, Figura 7(c), busca-se equilibrar as cargas de trabalho para diferentes modelos de produtos em cada estação; desta forma o(s) operador(es) que ali trabalham permanecem com uma carga de trabalho constante, independente do modelo a ser produzido. Na Figura 7(d) apresenta-se um contexto no qual são obtidos tanto o balanceamento horizontal quanto o vertical, uma condição teoricamente difícil de ser obtida, conforme discutido por Suguioshita e Magatão (2018). Os autores apresentam e comentam exemplos para os balanceamentos vertical e horizontal, assim como para sua combinação. Discutem a complexidade de serem obtidas as diferentes condições em aplicações reais: fatores como a indivisibilidade de tarefas, ou a disponibilização de recursos específicos em determinadas estações dificultam a adoção simultânea de um balanceamento vertical e horizontal em sua otimalidade.

Figura 7 – Exemplos de balanceamento vertical e horizontal



Fonte: Suguioshita e Magatão (2018).

As discussões realizadas por Lopes *et al.* (2017), Suguioshita e Magatão (2018), Michels *et al.* (2018) evidenciam que a complexidade presente em processos produtivos reais demanda diferentes combinações de atributos para cada modelo de balanceamento de linhas, o que pode gerar limitação para seu uso apropriado. Quando tais requisitos operacionais não são considerados, há o risco de que sejam desenvolvidos modelos que de fato não podem contribuir para solucionar casos reais. Becker e Scholl (2006b) reforçam essa análise e apontam para a necessidade de expandir o desenvolvimento desse contexto além dos parâmetros definidos para SALBPs e documentam as pesquisas que são feitas para descrever e resolver problemas generalizados mais realistas (GALBPs). De acordo com Boysen, Fliedner e Scholl (2007), mesmo havendo entendimento sobre a importância de soluções eficientes para problemas de balan-

ceamento de linha, as quais de fato deem suporte à produção industrial, existe uma lacuna considerável entre os requisitos de problemas reais e os modelos desenvolvidos.

Sikora, Lopes e Magatão (2017) se destacam no contexto de aderência prática ao desenvolverem uma modelagem que pode ser aplicada a diferentes contextos industriais. Os autores apresentam três exemplos pautados em casos reais no artigo elaborado (*truck cabin assembly, engine block machining e gearbox assembly*). De modo complementar, outros trabalhos já foram desenvolvidos tendo por base o referido modelo, por exemplo, Leal e Grespan (2018) utilizam o modelo de Sikora, Lopes e Magatão (2017) para encontrar uma solução para o balanceamento de uma linha de montagem de motores, na qual, segundo os autores, sua implementação é viável e poderia gerar um aumento de eficiência da linha na ordem de 6,5%.

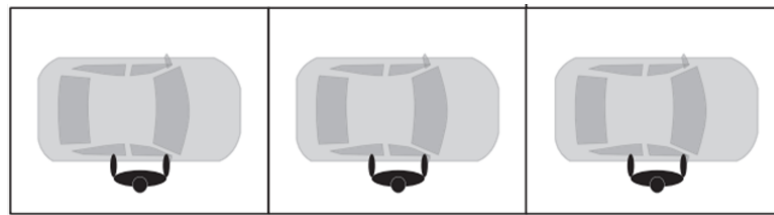
2.8 Balanceamento de linha multioperada

Embora amplamente utilizadas em sistemas de produção de diferentes áreas da indústria, as Linhas de Montagem Multioperadas possuem respaldo limitado na literatura, se comparados aos estudos de SALBP. Em Dimitriadis (2006), um dos primeiros trabalhos dedicados à essa condição, é proposta uma abordagem heurística de dois níveis para resolver o problema de balanceamento de linha de montagem multioperada (MALBP), considerando um conjunto de dados de uma empresa automobilística e outros problemas definidos na literatura para provar a sua eficiência e aplicabilidade. Scholl e Becker (2006) apresentam o levantamento sobre o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à problemas generalizados de balanceamento de linhas de montagem (GALBP), onde segundo os autores houve uma evolução de trabalhos tradicionais (que buscavam soluções para SALBP) para condições mais complexas que, por exemplo, adicionam considerações à seleção de equipamentos, estações multioperadas, impacto em custo e processos alternativos.

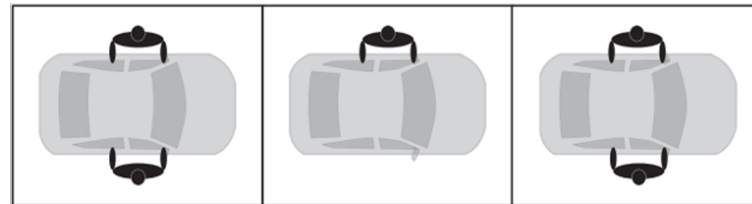
A montagem de produtos de grande porte (como a indústria automotiva) permite que a premissa de alocar apenas um operador para cada posto de trabalho seja revista. Dessa forma, dois ou mais operadores poderiam atuar simultaneamente em uma mesma estação, onde o número máximo de operadores é determinado por atributos como tamanho do produto, disponibilidade de equipamentos e relações de precedência (MICHELS *et al.*, 2018).

Considerando a quantidade de operadores por estação como critério para classificação, as linhas de montagem podem ser categorizadas em três grupos: simples, dois lados e multioperadas. Tais configurações são exemplificadas na Figura 8. Um objetivo das linhas de montagem multioperadas é minimizar o total de estações de trabalho ao mesmo tempo em que busca manter/diminuir a quantidade de operadores, observando-se as respectivas ocupações em um nível próximo ao ideal (PILATI *et al.*, 2021a). Ainda segundo os autores é sugerido que é possível, a partir do correto sequenciamento de atividades, redistribuir tarefas conforme disponibilidade dos recursos de cada estação. As regras que regem SALBP devem ser respeitadas, como por exemplo, condições de precedência e a disponibilidade de recursos.

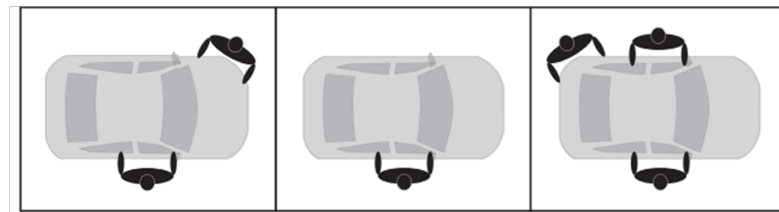
Figura 8 – Exemplos de configurações de linha de montagem



a) Configuração de linha de montagem simples



b) Configuração de linha de montagem de dois lados



c) Configuração de linha de montagem multi-operada

Fonte: Adaptado de Michels *et al.* (2019).

2.9 Conceitos de métodos ágeis aplicados ao balanceamento de linha

A metodologia ágil surgiu como uma proposta para desenvolvimento de *softwares* e mais recentemente teve sua aplicação expandida para demais setores. Diversos são os trabalhos que documentam os benefícios da sua utilização, assim como a evolução de seu entendimento e potenciais desdobramentos. Menciona-se o trabalho de Campanelli e Parreiras (2015) no qual é feita uma revisão da literatura sobre as adaptações acerca de metodologias ágeis, seguindo critérios como complexidade e fatores internos ou externos que regem o ambiente de aplicação. Chan e Thong (2009) buscam identificar o nível de aceitação de metodologias ágeis, comparando com os fatores de aceitação para métodos tradicionais de desenvolvimento. Segundo os autores, são sugeridas formas de superar os desafios comumente impostos à sua implementação e embora o estudo tenha foco no desenvolvimento de sistemas, é possível relacioná-lo com mecanismos de gestão de conhecimento, análise de dados, e tomada de decisão, fatores constantemente demandados no ambiente industrial. Jadoon *et al.* (2020) propõem a utilização de um *framework* ágil para a gestão de requisitos em um processo de manufatura, onde segundo os autores, essa adoção atende à necessidade da indústria automotiva por técnicas de maior desempenho, mais flexíveis e com maior oportunidade de adaptação.

O setor automotivo se estabelece atualmente em um ambiente dinâmico, com o desenvolvimento de novos produtos em menores prazos, com soluções técnicas que acompanham a Lei de Moore¹, e no qual a demanda é volátil. Dessa forma é coerente assumir que existe muita aderência de metodologias ágeis a esse contexto. Para limitar-se à questões relacionadas ao contexto do estudo aqui apresentado, é importante observar alguns dos conceitos propostos pela metodologia ágil pertinentes ao contexto de balanceamento de linha: colaboração com o cliente, resposta às mudanças e entrega de valor de forma contínua, conforme a seguir detalhados. Estes conceitos foram pautados, em especial, nas diretrizes apresentadas em (JADOON *et al.*, 2020).

- **Colaboração com o cliente:** É de conhecimento comum a necessidade de se estabelecer relação entre as expectativas do cliente e o resultado entregue. A dinâmica dos requisitos dos clientes é o principal motivador da volatilidade associada ao setor automotivo. Nesse sentido, métodos ágeis são utilizados para aproximar a relação entre o cliente e o desenvolvedor de serviço ou produto. Pode-se interpretar que, para o contexto de balanceamento de linha em um ambiente real, um método ágil deve ser eficiente e flexível, onde possam ser facilmente ajustados os parâmetros de entrada, objetivos e demais especificações pertinentes ao contexto. Alterações no produto, iniciativas de melhoria contínua do processo ou variações de destreza operacional devem ser rapidamente absorvidas e traduzidas em uma nova proposta de balanceamento de modo a otimizar os recursos ali utilizados. Seguindo essa mesma lógica, pode-se concluir que um sistema produtivo que, frente às oscilações no volume de produção, demora a reestruturar seu funcionamento industrial e ou quantidade de operadores dedicados ao seu funcionamento, acaba por não utilizar seus recursos na máxima capacidade, arcando com custos que poderiam ser evitados.
- **Resposta às mudanças:** Diferentemente de metodologias convencionais e preditivas, onde busca-se primeiramente assegurar que todo o trabalho a ser feito esteja identificado e planejado, para que depois de concluída essa etapa, o mesmo possa ser executado exatamente conforme planejado, os métodos ágeis buscam uma melhor adaptabilidade às mudanças. Métodos tradicionais, comumente lidam com mudanças no escopo de forma burocrática, seja devido à complexidade em que são estruturados ou pela ausência de mecanismos que suportem tal mudança. Em contrapartida, métodos ágeis, incorporam mudanças no escopo com maior facilidade, os mesmos são estruturados a partir da premissa de que existirão mudanças ao longo do desenvolvimento de qualquer projeto; para contornar (ou se adaptar) a essa condição, são estruturadas validações recorrentes das entregas. De forma análoga a um sistema de GPS que re-

¹ Expressão usada para se referir à observação feita por Gordon E. Moore sobre a tendência histórica da indústria de *microchips*. Segundo ela, o número de transistores dos *chips* dobra, pelo mesmo custo, a cada dois anos.

calcula a rota em tempo real, métodos ágeis permitem que o escopo seja readequado periodicamente, conforme a necessidade.

- **Entrega contínua de valor:** Ainda estabelecendo o cliente como ponto central da metodologia, métodos ágeis buscam gerar valor desde o primeiro momento, de forma que isso possa ser refinado continuamente. Não é desejado um resultado que demande tempo demasiado para sua obtenção, mesmo que otimizado. Ao invés disso, métodos ágeis propõem a construção incremental da solução ideal. Nesse sentido, é preferível entregar inicialmente uma solução que atenda parte do que foi solicitado pelo cliente e em seguida, de forma recorrente, que sejam atribuídas diferentes funcionalidades à solução original de maneira a atender os requisitos iniciais ou as novas demandas que possam surgir. Dessa forma desenvolver uma solução de balanceamento que atenda apenas um modelo de produto e que possa ser rapidamente implementada é mais apreciada do que aguardar uma solução para todo o portfólio de produtos, por exemplo. Na sequência, pode-se expandir o conjunto de produtos atendidos pela resposta.

Deste modo, tendo por base os três conceitos supracitados e sua aderência às necessidades de resolução do problema de rebalanceamento em análise, o presente trabalho traz a proposta de uma metodologia ágil, a qual é detalhada no Capítulo 3.

3 METODOLOGIA APLICADA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia adotada para construção desse estudo, o qual envolve a obtenção de uma proposta para rebalanceamento da linha de montagem de motores. Também almeja-se a obtenção de uma sistemática para análise e revisão do balanceamento que possa vir a ser utilizada em outros momentos, na medida que mudanças produtivas venham a ocorrer.

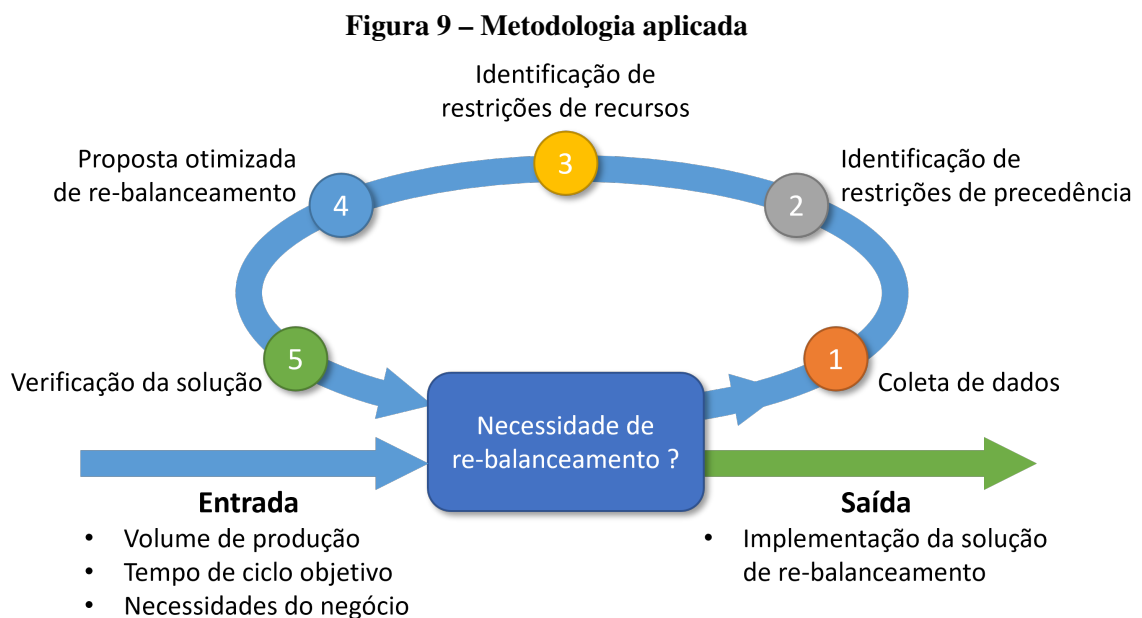
O ambiente no qual este estudo foi desenvolvido possui um elevado engajamento dos colaboradores, com a aplicação do conceito de melhoria contínua, estabelecendo a habilidade em desenvolver novas competências por meio de inovações estratégicas e resolvendo em ciclos curtos eventuais problemas encontrados na produção (BESSANT; CAFFYN; GALLAGHER, 2001). Dessa forma, existe interesse por parte da organização que o produto desse estudo seja, sobretudo, *continuamente revisado*, podendo ainda evoluir futuramente para a implantação de um sistema de manufatura autoconfigurável, mas que devido às limitações de escopo não faz parte do desenvolvimento dessa dissertação.

Alguns fatores resultantes da filosofia de melhoria contínua podem impactar diretamente as condições básicas para a busca de otimização de balanceamento de linha. Dentre esses fatores pode-se destacar:

- **Destreza operacional:** Por meio de treinamento e repetição é possível melhorar a destreza dos operadores e, conseqüentemente, eliminar flutuações no tempo de montagem (MURA; DINI, 2019). Conceito esse que é fruto da cultura de Manufatura Enxuta, em que o foco está na melhoria do fluxo ou suavidade de trabalho (BHAMU; SANGWAN, 2014). No contexto apresentado é coerente concluir que melhores níveis de destreza operacional impactam diretamente no tempo de execução das tarefas. Quando uma nova tarefa é inserida em um sistema produtivo, essa tende a ser executada em menores tempos conforme o operador execute-a repetidamente.
- **Volume de produção:** Todo sistema de produção em larga escala está condicionado à flutuação do volume de produção. Conforme apresentado em (MEIRA, 2015) o tema de planejamento de produção deve ser (idealmente) integrado às atividades de balanceamento, a fim de evitar sobrecarga de demanda ou perdas de produtividade provocada pela inatividade.
- **Takt Time:** Conforme a definição apresentada na seção 2.7, o presente estudo busca encontrar uma proposta de balanceamento factível e de acordo com o *takt time* (podendo ser flexibilizado em +5%) a partir de um número de estações de trabalho predeterminado. No entanto, essa premissa, e conseqüentemente o tempo de ciclo máximo aceitável para cada modelo de produto em cada posto de trabalho, podem ser redefinidos ao longo dos anos conforme flutuações do volume de produção. Assim, a

metodologia proposta deve primeiramente permitir fácil adaptação dos parâmetros de funcionamento do sistema produtivo e buscar soluções com tempo de ciclo inferiores ao *takt time* estipulado.

Considerando tais fatores, associados aos interesses da organização foi formulada uma metodologia cíclica dividida em 05 passos detalhados a seguir e ilustrada na Figura 9. Tal proposta apoia-se em premissas de metodologias ágeis, onde ao final de cada ciclo é gerada uma proposta de rebalanceamento, a qual mesmo exigindo uma verificação de factibilidade antes de sua implementação, aproxima o resultado de sua otimalidade. O conhecimento necessário para melhor estruturar as tarefas da Linha A, assim como as restrições impostas ao processo, também são fatores recorrentemente refinados. A dinâmica de responder às mudanças de maneira positiva esteve presente desde as primeiras versões de resultados, pois houve um entendimento comum entre a equipe técnica da Linha A, compreendendo que para a futura implementação de rebalanceamento é necessário estruturar o trabalho de forma incremental. A fim de que seja garantida a entrega contínua de valor à organização, sugere-se que um novo ciclo da metodologia proposta seja iniciado a cada dez semanas, tempo necessário, no atual contexto, para que melhorias no processo possam refletir em diferentes condições de entrada. Vale ainda destacar que o corrente estudo reflete os resultados obtidos à partir da décima versão de solução de rebalanceamento. Durante a evolução de tais versões foram propostas alterações na própria metodologia, e cada etapa é detalhada a seguir entre a seção 3.1 e seção 3.5.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Coleta de dados

Nessa etapa inicial é proposta a delimitação do escopo de trabalho. São definidos os modelos de produto que farão parte do estudo para rebalanceamento, definido o agrupamento ou subdivisão de atividades e identificado o tempo operacional de cada tarefa. Para essa etapa utilizou-se instruções de trabalho disponibilizadas pela empresa, nas quais são identificados os componentes a serem montados na Linha A, onde na maior parte dos casos, uma ilustração é vinculada à descrição de montagem para auxiliar o operador durante sua execução. Além disso, é indicada a duração de cada tarefa e indicado para quais modelos a mesma deve ser executada. A Figura 10 representa uma instrução de trabalho genérica, que para efeitos de confidencialidade foi adaptada e possui dados meramente ilustrativos.

Figura 10 – Exemplificação de instrução de trabalho

MONTAGEM DA POLIA FRONTAL – ID: 155				MODELOS
Componente	Descrição	Quantidade	Observação	<input checked="" type="checkbox"/> A
1	Polia frontal	1		<input checked="" type="checkbox"/> B
2	Parafuso sextavado	4	Torque 48 Nm	<input type="checkbox"/> C
				<input checked="" type="checkbox"/> D

MÉTODO	DURAÇÃO
Montar polia na bomba de água.	100 s
Montar quatro (4) parafusos na polia.	
Aplicar torque nos parafusos de fixação da polia na bomba de água	

Fonte: Autoria própria (2022).

O tempo de duração de tarefas manuais estão frequentemente sujeitos a desvios estocásticos, pois o desempenho dos operadores depende de uma variedade de fatores, como motivação, ambiente de trabalho ou estresse mental e físico (Tempelmeier (2003), *apud* Boysen, Flidner e Scholl (2007)), no entanto, por limitações técnicas e a fim de eliminar a variável probabilística da metodologia proposta, foram consideradas durações determinísticas para cada tarefa e em seguida o escopo de trabalho foi classificado em dois diferentes contextos, denominados aqui como Tempos Conhecidos e Tempos a Definir, demandando diferentes estratégias para cada um:

- **Tempos Conhecidos:** Diz respeito às montagens que são iguais ou similares às existentes nos modelos de produto que já são produzidos na Linha A, onde o tempo operacional das montagens é fornecido de forma automática por um sistema de gerenciamento da produção que faz a coleta de dados para cada produto produzido. Nesses casos, a duração é previamente documentada na instrução de trabalho e reflete a média simples do tempo de montagem dos últimos 06 meses.
- **Tempos a Definir:** Essa segunda situação reflete as novas montagens vinculadas aos novos modelos de produto. Para este caso utilizou-se como base o tempo medido através de vídeos operacionais, nos quais esses produtos foram montados em outras fábricas da mesma empresa, e em seguida esse tempo foi sendo refinado a cada evento de validação física da solução.

Em ambos os casos foi necessária a tratativa dos dados a fim de assegurar que nenhum *outlier*, resultante de alguma anomalia fosse registrado, comprometendo assim os resultados obtidos.

Ainda com o objetivo de melhor definir o escopo de trabalho, para cada grupo de atividades foi definido qual a melhor forma para representar tais montagens, pois conforme sugerido por (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009) para estudos de balanceamento de linha, tarefas que possuem vínculos entre si e são executadas necessariamente em sequência, numa mesma estação de trabalho, podem ser agrupadas como um único bloco de tarefas. Em oposição, considera-se que dividir tarefas relativamente complexas pode trazer flexibilidade à proposta de balanceamento (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017).

3.2 Identificação de restrições de precedência

Conforme indicado na seção 2.6, as tarefas necessárias para a montagem de um determinado produto devem seguir uma sequência ordenada. Para a maioria dos casos o sequenciamento lógico entre tarefas é facilmente identificado, mesmo assim foi necessário um grande esforço inicial para levantamento das principais restrições de precedência, onde buscou-se identificar o

que deveria ser montado antes e depois de cada tarefa. Após a etapa de verificação da solução, novas restrições de precedência foram identificadas e incorporadas em versões posteriores.

Para a conclusão dessa etapa utilizou-se do material disponível para treinamento técnico de montagem e desmontagem de motores e revisão da equipe técnica responsável da Linha A. A disponibilidade de espaço suficiente para executar determinada tarefa foi o principal critério adotado para avaliar a necessidade de estabelecer uma relação de precedência entre duas ou mais tarefas, além disso, buscou-se eliminar condições em que o posicionamento de ferramentas fosse limitado devido à ausência de tais restrições. Em casos de dúvidas ou de divergência de opiniões entre a equipe técnica, foram testadas diferentes sequências de montagem.

Seguindo recomendações encontradas na literatura as precedências foram documentadas em ambos formatos : Matriz e Diagrama de Precedência. A matriz permite uma fácil manipulação dos dados, estabelecendo filtros e ordenamento conforme necessidade, enquanto o diagrama de precedência permitiu uma identificação visual das tarefas mais complexas para reposicionamento, nas quais ocorre maior concentração de restrições de precedência entre tarefas. Os resultados obtidos a partir da análise desse tópico são detalhados no Capítulo 5.

3.3 Identificação de restrições de recursos

Para a agregação de valor em uma linha de montagem são necessários diversos recursos, tais como ferramentas de aperto, dispositivos para posicionamento e demais equipamentos. Por se tratar de uma proposta de rebalanceamento, com base em um sistema produtivo já implementado, deve-se buscar propostas que sejam factíveis à disponibilidade de recursos na Linha A. Embora essa consideração limite a flexibilidade de reposicionamento, seu entendimento é crucial para que uma possível solução seja implementada sem a necessidade de investimentos considerados significativos, mantendo o escopo desse estudo concentrado no balanceamento de linha.

De um modo geral, recursos como parafusadeiras, torquímetros, soquetes e pequenos dispositivos, itens que comumente são utilizados para montagens de forma genérica, são disponibilizados em todas as estações da Linha A, inclusive na nova estação (S12 ilustrada na Figura 2), logo são recursos que não interferem na viabilidade de realocação das atividades que os utilizam. Em contrapartida, alguns recursos são fixos e exclusivos a determinados postos de trabalho, pode-se listar como exemplos de tais condições um robô aplicador de silicone instalado na estação S1 ou apertadeiras de alto torque disponibilizadas apenas nas estações S4 e S10. Para esses casos, uma série de restrições são impostas às tarefas que demandam tais recursos.

Novamente foram utilizadas as instruções de trabalho (Figura 10) para identificar os recursos necessários para cada tarefa e conseqüentemente construção das restrições. Partiu-se da premissa de que toda tarefa poderia ser executada em qualquer uma das 12 estações, e à cada nova restrição identificada essa premissa era reavaliada, diminuindo assim a liberdade para reposicionamento.

3.4 Proposta otimizada de rebalanceamento por meio de modelo matemático

Entende-se que as condições de entrada (Figura 9) da metodologia proposta, podem ser traduzidas em uma função objetivo (detalhada *a posteriori* na seção 4.2), que deve respeitar restrições de precedência (seção 3.2) e de posicionamento (seção 3.3). Dessa forma o estudo é direcionado à modelos de solução adequados a esse contexto. Michels *et al.* (2018) faz uma revisão sobre trabalhos relacionados à resolução de Problemas de Balanceamento de Linha Multioperada (MALBP*) e identifica limitada literatura, a qual é classificada em relação à diversidade de produtos, função objetivo e método da solução.

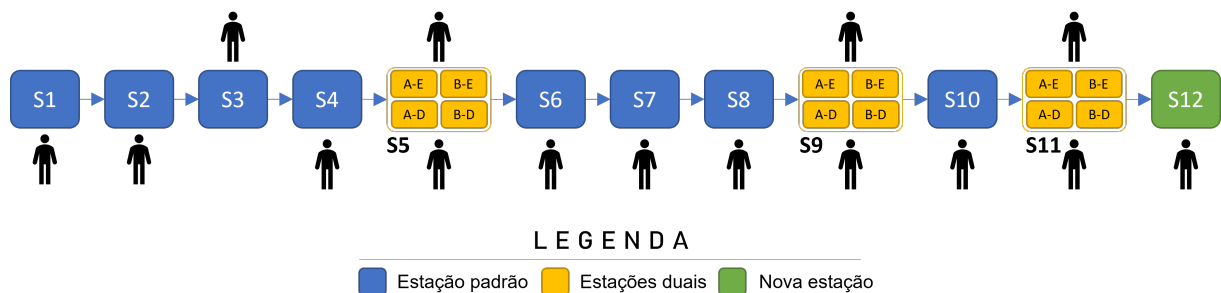
Na presente etapa foi utilizado como base o modelo matemático desenvolvido por (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017). Essa decisão foi tomada uma vez que o modelo matemático proposto pelos autores, além de ter sua efetividade comprovada ao lidar com problemas de balanceamento da literatura, também foi utilizado em problemas reais de balanceamento de linhas e obteve resultados satisfatórios, conforme documentado por (MARQUEZE, 2019), ou por (SUGUINOSHITA; MAGATÃO, 2018). Ao longo do desenvolvimento desse estudo, particularidades da Linha A fizeram com que fossem necessárias customizações para incluir, remover ou alterar diferentes funcionalidades do modelo base, tais adaptações são brevemente comentadas a seguir e detalhadas no Capítulo 4.

Por se tratar de trabalho com aplicação real busca-se por soluções que sejam factíveis de implementação, de forma que a quantidade de alterações propostas seja necessariamente um fator a ser considerado na função objetivo, acompanhando, se possível, a redução no tempo de ciclo e o refinamento da suavidade entre diferentes estações (*e.g.*, conforme ilustrado na Figura 7). Em seguida foi idealizada uma divisão adjacente em subestações para cada estação dual, onde, com base em duas possibilidades viáveis de posicionamento do produto (posições alta e baixa do motor em relação ao operador), a divisão em subestações é realizada, podendo dessa forma adicionar-se à formulação o balanceamento para cada subestação.

Por exemplo, considerando a estação dual S5 sendo dividida em quatro subestações: S5_alto_esquerdo (lado *esquerdo* do motor seguindo o fluxo da linha, com o produto na posição *alta*), S5_alto_direito, S5_baixo_esquerdo e S5_baixo_direito. Uma representação da Linha A com as adaptações necessárias às estações duais é apresentada na Figura 11. É importante salientar que devido à condição ergonômica dos operadores foram adicionadas restrições específicas à formulação para indicar o equilíbrio na carga de trabalho entre as posições alta (ex: S5_alto_direito e S5_alto_esquerdo) e, da mesma forma, entre as posições baixa (ex: S5_baixo_direito e S5_baixo_esquerdo). Em seguida, o modelo busca soluções que considerem as particularidades apresentadas, sugerindo condições de balanceamento alinhadas com as necessidades reais, até mesmo para as estações duais.

O produto então gerado é uma proposta de rebalanceamento de atividades, onde busca-se atender à função objetivo, ao mesmo tempo em que as restrições impostas nas etapas anterior-

Figura 11 – Adaptação da Linha A para Estações Duais



Fonte: Autoria própria (2022).

res são respeitadas. Como em toda metodologia cíclica, podem existir mudanças nos resultados obtidos em cada nova versão. Essa evolução acontece em grande parte pela atualização de restrições, e ou novas condições que alteram os dados coletados. É coerente supor que ao passar do tempo, os operadores da Linha A adquiram maior destreza operacional de forma que o tempo total de montagem do motor seja reduzido (conforme seção 2.2), ao mesmo passo que novos procedimentos sejam incorporados aos processos da Linha A, resultando de forma oposta em um aumento do tempo total de montagem.

Para cada nova versão, a proposta de rebalanceamento foi documentada conforme exemplificado na Tabela 3. Nessa tabela, as duas primeiras colunas são utilizadas para a identificação das tarefas. Na coluna denominada *Modelo* é indicado a qual modelo de produto determinada tarefa pertence, havendo diferentes possibilidades para essa combinação frente aos quatro modelos propostos nesse estudo. Em seguida nas colunas *Estação Atual* e *Estação Proposta* é onde efetivamente as alterações são sugeridas, e finalizando a tabela, na última coluna é registrado o reposicionamento, caso exista a necessidade de mudança.

Tabela 3 – Proposta de rebalanceamento (*template*)

ID	Descrição	Modelo	Est. Atual	Est. Proposta	Comentários
...
44	Montagem dos filtros de óleo	A,B	4	5	Reposicionar
45	Fixação do cárter	A,B,C,D	3	3	Manter
46	Aplicar silicone entre junções	A,B,C,D	3	3	Manter
47	Montagem da bomba de água	C,D	5	1	Reposicionar

Fonte: Autoria própria (2022).

3.5 Verificação da solução

Um diferencial explorado nesse estudo de rebalanceamento foi a possibilidade de conciliar a aplicação de um modelo matemático para resolver um problema com a aplicação real:

verificou-se por meio de checagens de especialista da linha e por testes *in loco* na linha física a efetividade da resposta teórica obtida. A etapa aqui denominada como *Verificação da Solução* foi estruturada de maneira que permitisse a melhor avaliação da proposta de rebalanceamento, buscando representar de forma realista as condições futuras atribuídas à Linha A. A Figura 12 a seguir sintetiza o racional empregado.

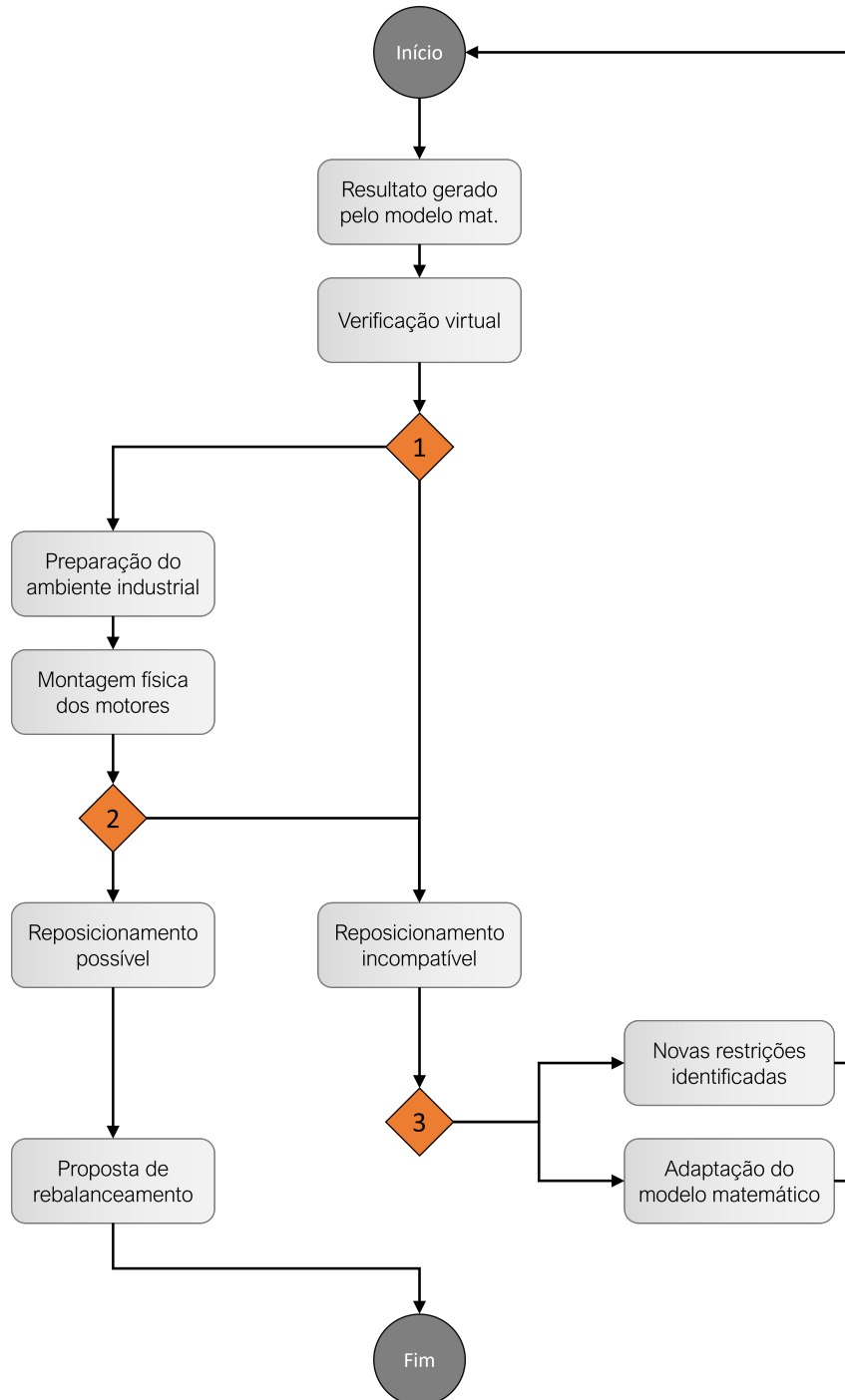
A primeira etapa da atividade de verificação da solução acontece em ambiente virtual, onde o responsável técnico pela Linha A recebe o resultado gerado pelo modelo matemático e busca por inconsistências, que na maior parte das vezes, são ocasionadas por alguma restrição não documentada previamente. Com base nessa análise é tomada a primeira de três decisões que garantem uma proposta de balanceamento factível: deve-se decidir se a proposta de balanceamento *deve seguir para verificação no ambiente industrial* ou já pode ser considerada como uma *proposta com reposicionamento(s) incompatível(eis)*. Caso seja decidido prosseguir para verificação em ambiente industrial é necessário, previamente à montagem dos motores, assegurar sua preparação. Decidiu-se por seguir os critérios estabelecidos pelo método de *Ishikawa*, utilizado para identificar a relação entre eventuais problemas e as respectivas causas (FILHO, 2007). Entende-se que os distúrbios para tal validação podem ser reduzidos quando estabelecidas previamente as seguintes condições básicas:

- **Método:** Instruções de trabalho atualizadas e disponibilizadas em cada posto de trabalho, refletindo a proposta de rebalanceamento a ser verificada e contendo as informações necessárias para conduzir corretamente cada montagem.
- **Material:** Identificação visual e organização das peças em *pallets*, seguida de sua disponibilização próximo à cada posto de trabalho. Para alguns poucos casos houve a necessidade de pré montar determinados conjuntos de peças antes do evento de validação. Essa decisão se deu por conta de que a industrialização da Linha A não estava concluída.
- **Mão-de-obra:** Condução do evento de montagem sendo realizada por operadores experientes, e que já estejam familiarizados com os novos modelos de produto.
- **Máquina:** Dispositivos e equipamentos previamente disponibilizados e, quando necessário, configurados para realização das respectivas montagens.
- **Medição:** Para cada evento de verificação devem ser planejadas atividades de inspeção. Onde em alguns casos, o motor deve ser auditado pela equipe de qualidade ou ainda submetido à testes de funcionamento e performance.
- **Meio ambiente:** Planejamento dos eventos de montagem observando demais riscos ou condições adversas relacionadas ao ambiente industrial.

Uma vez que todos os critérios listados estejam atendidos, a montagem dos motores pode ser executada. Ao final da montagem uma segunda decisão deve ser tomada: *indicar a*

compatibilidade (ou não) da proposta de rebalanceamento sugerida. Primeiramente, quando o reposicionamento é incompatível, é necessário decidir novamente sobre qual tratativa deve ser tomada: *documentar novas restrições* que não haviam sido identificadas previamente ou *aprimorar o modelo matemático* para considerar alguma característica do processo produtivo em questão. De forma alternativa, quando o reposicionamento se mostra possível, é validada a proposta de rebalanceamento. Dessa forma, salienta-se que na metodologia proposta a apresentação de uma proposta de rebalanceamento está necessariamente atrelada à realização de procedimentos que envolvam a montagem física dos motores.

O detalhamento do modelo matemático utilizado como ferramenta para indicação da proposta de rebalanceamento será apresentado a seguir no Capítulo 4.

Figura 12 – Fluxograma de atividades da etapa de verificação da solução

Fonte: Autoria própria (2022).

4 MODELO MATEMÁTICO

O presente capítulo apresenta o modelo matemático proposto, o qual tem por base a estrutura de formulação apresentada por Sikora, Lopes e Magatão (2017). Os autores desenvolveram um modelo matemático para o balanceamento de linhas com a possibilidade de presença de operadores que se movimentam entre estações, o assim denominado *Traveling Worker Assembly Line Balancing Problem* (TWALBP). O referido modelo será denominado no presente trabalho como “modelo base”.

O problema em análise envolve um conjunto de tarefas, com tempos de processamento considerados determinísticos, relações de precedências entre tarefas e tempos de movimentação de trabalhador entre estações também determinísticos. O problema engloba encontrar a designação tarefa-estação-trabalhador, respeitando-se as relações de precedência. Cada trabalhador deve, dentro do tempo de ciclo, desenvolver as tarefas a ele designadas e, caso necessário, se movimentar entre as estações de trabalho. O problema considera o *layout* como conhecido *a priori* e, portanto, uma série de parâmetros podem ser obtidos a partir da configuração da linha (*e.g.*, distâncias entre estações). Dessa forma, não se observa um problema de projeto de *layout* (*layout design problem*) e sim um problema de balanceamento, dado o *layout* da linha.

Sikora, Lopes e Magatão (2017) também incorporaram uma série de características práticas à modelagem, tais como: restrições de designação (tarefas que podem somente ser designadas a um subconjunto de estações); tarefas comuns (tarefas que demandam mais de um operador para sua execução); tarefas automáticas (aquelas que precisam de um operador para a liberação de execução, mas após são realizadas automaticamente por dispositivo/máquina dedicada); tempos de processamento diferentes de acordo com a estação de execução da tarefa.

Vale notar que simplificações foram realizadas em relação ao modelo base pois nem todas as características de modelagem apresentadas serem necessárias à correta representação do problema em análise (*e.g.*, tarefas comuns entre diferentes modelos de produto). Por outro lado, algumas características do problema tratado não são contempladas no trabalho de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017), em especial as relativas a estações duais. Sendo assim, optou-se em desenvolver uma formulação que segue a notação e várias restrições presentes no trabalho de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017), mas realizando simplificações e expansões conforme a necessidade do problema em análise. A seção 4.1 à seção 4.3 a seguir detalham o modelo matemático implementado e utilizado.

4.1 Notação Adotada

O modelo proposto em (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017) foi pensado para tratar um problema de balanceamento com 3 dimensões de análise: tarefa, trabalhador e estação. Assim, a resposta desejada não é simplesmente a alocação de tarefas a estações, como encontrado num contexto SALPB tradicional, mas sim: “Se uma tarefa t é realizada na estação s por um

trabalhador w ". Em adição a este ponto ainda considera-se o seguinte fato: "O trabalhador w se movimenta da estação s_1 para a estação s_2 ?" Neste contexto, o problema combina decisões de balanceamento com decisões de deslocamento de trabalhadores entre estações. As principais funcionalidades pensadas no modelo base são utilizadas na presente proposta de formulação matemática.

A seguinte notação é utilizada para descrever o modelo proposto (Tabela 4  Tabela 7). Ressalta-se que, a partir deste ponto, são realizadas simplificações e expansões em relação ao modelo base.

Tabela 4 – Índices usados no modelo

t	índice para as tarefas	$1...NT$
w	índice para os trabalhadores	$1...NW$
s	índice para as estações de trabalho	$1...NS$
m	índice para os modelos de motores	$1...NM$

Fonte: Adaptado de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017).

Tabela 5 – Parâmetros do modelo

DT_{tm}	tempo de duração de cada tarefa t para cada modelo m [u.t.]
OR_m	taxa de ocupação do modelo m dentro do <i>mix</i> produtivo; valor no intervalo contínuo [0 ... 1]
$TSfeas_{ts}$	pares possíveis para a alocação tarefa-estação devido a restrições de equipamentos
$MT_{s_1s_2}$	tempo de deslocamento entre as estações s_1 e s_2 [u.t.]
$WSfix_{ws}$	lista de alocações fixas entre trabalhador-estação
$WSfeas_{ws}$	lista de possibilidades de alocações entre trabalhador-estação; restrições de zoneamento
Mb	parâmetro auxiliar utilizado em formulações <i>Big-M</i> ($Mb = NT$)
$D_{t_1t_2}$	distância máxima entre as tarefas $t_1 - t_2$, em estações
CT_{max}	tempo de ciclo máximo considerando-se todos os modelos de produtos; no caso, adotou-se o valor do <i>takt time</i> definido pela companhia para este parâmetro
k_{RefCT}	fator de tolerância para o qual $vRefCT$ pode superar CT_{max}
$k_1 \dots k_7$	fatores de ponderação usados na função objetivo
avS	valor temporal médio, considerando que todas as estações estejam igualmente ocupadas [u.t.]
avW	valor temporal médio, considerando que todos os trabalhadores estejam igualmente ocupados [u.t.]

Fonte: Adaptado de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017).

A Tabela 6 apresenta os conjuntos utilizados na geração do modelo matemático. Ressalta-se que um pré-processamento dos dados é realizado de modo que os conjuntos sejam gerados de modo a conter somente combinações de valores válidos (conjuntos esparsos). Deste modo, alguns parâmetros fornecidos na Tabela 5 (e.g., $TSfeas_{ts}$, $WSfix_{ws}$ e $WSfeas_{ws}$) são utilizados para a geração de conjuntos esparsos na Tabela 6.

Tabela 6 – Conjuntos usados do modelo

<i>Tasks</i>	conjunto de todas as tarefas
<i>Workers</i>	conjunto de todos os trabalhadores
<i>Stations</i>	conjunto de todas as estações
<i>Models</i>	conjunto de todos os modelos de motores
<i>NotDual</i>	conjunto com todas as estações, exceto as duais
<i>TWS</i>	conjunto de todas as designações factíveis tarefa-trabalhador-estação
<i>TS</i>	conjunto de todas as designações factíveis tarefa-estação
<i>TW</i>	conjunto de todas as designações factíveis tarefa-trabalhador
<i>WS</i>	conjunto de todas as designações factíveis trabalhador-estação
<i>WSS</i>	conjunto com os movimentos possíveis do trabalhador w da estação s_1 para a estação s_2
<i>VertEq</i>	conjunto com todos os pares de estações nos quais deve ser considerado o equilíbrio vertical
<i>TwoSideEq</i>	conjunto referente às estações duais que indica os respectivos lados/posições a serem equilibrados (<i>e.g.</i> , Figura 11, S5, A-E e A-D)
<i>TwoSideBl</i>	conjunto referente às estações duais que indica as posições de um mesmo lado (<i>e.g.</i> , Figura 11, S5, A-E e B-E)
<i>TS_{ini}</i>	conjunto com as designações tarefa-estação já presentes na linha configuração inicial do balanceamento da linha
<i>Prec</i>	conjunto com a relação de precedência entre os pares de tarefas (t_1, t_2) : t_1 deve preceder t_2
<i>Dist</i>	conjunto com os pares (t_1, t_2) em que há distâncias máximas (em estações)

Fonte: Adaptado de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017).

A formulação MILP de base possui variáveis relativas ao problema de balanceamento de linhas bem como outras relativas ao problema de caixeiro viajante (TSP - *Travelling Salesman Problem*). As restrições essenciais do balanceamento são pautadas no trabalho de (PATTERSON; ALBRACHT, 1975), enquanto os movimentos dos trabalhadores são relativos ao trabalho de (MILLER; TUCKER; ZEMLIN, 1960). No modelo proposto, o aspecto relativo à movimentação dos trabalhadores foi simplificado, conforme detalhado *a posteriori* na seção 4.3. As variáveis do modelo (Tabela 7) são representadas com um v minúsculo antes do restante do nome da variável de modo a facilitar ao leitor a identificação de variáveis presentes na formulação.

4.2 Função Objetivo

A função objetivo proposta em (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017) é focada em minimizar o tempo de ciclo da linha (vCT). Os autores comentam sobre possíveis objetivos secundários (*e.g.*, minimização de movimentações de trabalhadores, $vMovTime$), propondo uma abordagem em duas fases para esta resolução ou uma função objetivo ponderada: (minimize) $C_1 \cdot vCT + C_2 \cdot vMovTime$, com $C_1 \gg C_2$. No presente trabalho, particularidades da Linha A fizeram com que fossem necessárias customizações para incluir termos diferentes na função ob-

Tabela 7 – Variáveis do modelo

vCT	tempo de ciclo da linha [u.t.]
$vWTime_w$	tempo de ciclo de cada trabalhador [u.t.]
$vSTime_s$	tempo de ciclo de cada estação [u.t.]
$vSTimeMod_{sm}$	tempo de ciclo de cada estação s para cada modelo m [u.t.]
$vRefCT$	tempo de ciclo de referência permitido para a linha [u.t.]
vTS_{ts}	igual a 1 se a tarefa t é realizada na estação s , 0 caso contrário (c.c.) uma variável binária para cada elemento do conjunto TS
vWS_{ws}	igual a 1 se trabalhador w é designado à estação s , 0 c.c. uma variável binária para cada elemento do conjunto WS
vTW_{tw}	igual a 1 se a tarefa t é realizada pelo trabalhador w , 0 c.c. uma variável binária para cada elemento do conjunto TW
$vTWS_{tws}$	igual a 1 se tarefa t é realizada pelo trabalhador w na estação s , 0 c.c. uma variável binária para cada elemento do conjunto TWS
$vWSS_{ws_1s_2}$	igual a 1 se o trabalhador w se movimenta da estação s_1 para a s_2 , 0 c.c. uma variável binária para cada elemento do conjunto WSS
$vMaxDifS$	máxima diferença de tempo das estações em relação ao valor médio avS [u.t.]
$vMaxDifW$	máxima diferença de tempo dos trabalhadores em relação ao valor médio avW [u.t.]

Fonte: Adaptado de (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017).

jetivo em relação ao apresentado em (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017). Objetivou-se, por exemplo, representar corretamente as condições de posicionamento das estações duais. Os principais termos da função objetivo (f.o.) são ilustrados na Equação 1.

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } z = \\
& k_1 \cdot vRefCT + \\
& k_2 \cdot vMaxDifS + \\
& k_3 \cdot vMaxDifW + \\
& k_4 \cdot \sum_{(w,s_1,s_2) \in WSS} vWSS_{ws_1s_2} + \\
& k_5 \cdot \sum_{(t,s) \in TS: (t,s) \notin TS_{ini}} vTS_{ts} + \\
& k_6 \cdot \sum_{(s_1,s_2) \in TwoSideEq} |vSTime_{s_1} - vSTime_{s_2}| + \\
& k_7 \cdot \sum_{(s_1,s_2) \in VertEq, m \in Models} |vSTimeMod_{s_1m} - vSTimeMod_{s_2m}|
\end{aligned} \tag{1}$$

Na Equação 1 são indicados fatores de ponderação k_1 a k_7 , os quais são utilizados para adequar a importância relativa dos sete termos considerados na função objetivo, referenciados como termo (i) a (vii). De modo simplificado, os termos envolvem: (i) a minimização do tempo de ciclo de referência ($vRefCT$), ou seja, busca-se minimizar o tempo de ciclo de cada um dos modelos envolvidos no *mix* produtivo; nos termos (ii) e (iii) busca-se minimizar, respectivamente, as variáveis $vMaxDifS$ e $vMaxDifW$ com a intenção de que diferenças significativas em relação a valores temporais médios não ocorram; com o termo (iv) busca-se minimizar as movimentações realizadas por operadores ($vWSS_{ws_1s_2}$) entre diferentes estações; o termo (v) evidencia que a linha em análise possui uma alocação inicial de tarefas a estações (TS_{ini}) e objetiva-se realizar um rebalanceamento no qual as mudanças em relação à alocação inicial sejam minimizadas; com o termo (vi) busca-se minimizar a diferença de tempo entre as posições simétricas das estações duais, por exemplo, objetiva-se que os tempos das posições alta dos lados direito e esquerdo de uma estação dual tendam a apresentar valores similares; com o termo (vii) busca-se minimizar a diferença de tempo entre diferentes estações para cada modelo, ou seja, é um fator que busca aprimorar o balanceamento vertical da solução. Salienta-se que nos termos (vi) e (vii) é utilizada uma função módulo, a qual pode ser linearizada conforme conceitos apresentados em Wolsey (2020).

4.3 Restrições

As restrições do modelo matemático são apresentadas da Equação 2 à Inequação 33. O primeiro conjunto de restrições é adaptado do problema de balanceamento de linhas clássico de (PATTERSON; ALBRACHT, 1975). A Equação 2 é a restrição de ocorrência: cada tarefa deve ser realizada em uma estação. A restrição para estabelecer as relações de precedência entre tarefas é definida na Inequação 3, enquanto a Inequação 4 impõe que a variável vCT tenha seu valor maior ou igual ao valor da estação com maior carga de trabalho associada (tempo de trabalho). O tempo de ciclo ponderado de uma estação s é calculado por meio da Equação 5. A referida ponderação ocorre em relação à taxa de ocupação dos modelos m dentro do *mix* produtivo, conforme parâmetro OR_m .

$$\sum_{(t,s) \in TS} vTS_{ts} = 1 \quad \forall t \in Tasks \quad (2)$$

$$\sum_{(t_1,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_1s} \leq \sum_{(t_2,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_2s} \quad \forall (t_1, t_2) \in Prec \quad (3)$$

$$vSTime_s \leq vCT \quad \forall s \in Stations \quad (4)$$

$$vSTime_s = \sum_{\substack{(t,w,s) \in TWS, \\ m \in Models}} OR_m \cdot DT_{tm} \cdot vTWS_{tws} \quad \forall s \in Stations \quad (5)$$

As Inequações 6 e 7 são utilizadas para determinar o valor da máxima diferença temporal entre estações em relação ao valor médio avS . São válidas para as estações não duais. Já as Inequações 8 e 9 são utilizadas para determinar o valor da máxima diferença no contexto das estações duais. Neste caso, o somatório dos tempos nas posições alta e baixa de um dos lados configuram o tempo total do referido lado da estação dual.

$$vMaxDifS \geq (vSTime_s) - avS \quad \forall s \in NotDual \quad (6)$$

$$vMaxDifS \geq -(vSTime_s) + avS \quad \forall s \in NotDual \quad (7)$$

$$vMaxDifS \geq (vSTime_{s_1} + vSTime_{s_2}) - avS \quad \forall (s_1, s_2) \in TwoSideBl \quad (8)$$

$$vMaxDifS \geq -(vSTime_{s_1} + vSTime_{s_2}) + avS \quad \forall (s_1, s_2) \in TwoSideBl \quad (9)$$

A formulação estabelecida por Sikora, Lopes e Magatão (2017) não contempla questões relativas a balanceamento vertical, ou seja, o equilíbrio dos tempos de cada modelo m entre estações adjacentes. A Equação 10 à Equação 12 determinam o valor do tempo de cada estação s para cada modelo m ($vSTimeMod_{sm}$), considerando-se estações não duais (Equação 10) e duais (Equação 11 e Equação 12). No caso das duais, o tempo das posições alta e baixa de um determinado lado é agregado para fins de comparação com a estação antecessora, conforme Equação 11.

$$vSTimeMod_{sm} = \sum_{(t,w,s) \in TWS} DT_{tm} \cdot vTWS_{tws} \quad \forall s \in NotDual, m \in Models \quad (10)$$

$$vSTimeMod_{s_1m} = \sum_{(t,w,s_1) \in TWS} DT_{tm} \cdot vTWS_{tws_1} + \sum_{(t,w,s_2) \in TWS} DT_{tm} \cdot vTWS_{tws_2} \\ \forall (s_1, s_2) \in TwoSideBl, m \in Models \quad (11)$$

$$vSTimeMod_{s_2m} = \sum_{(t,w,s_2) \in TWS} DT_{tm} \cdot vTWS_{tws_2} \\ \forall (s_1, s_2) \in TwoSideBl, m \in Models \quad (12)$$

O modelo originalmente proposto em (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017) permitia a decisão relativa à designação de trabalhadores a estações e tarefas. No contexto em análise, contudo, considera-se que as decisões relativas à alocação de trabalhadores são fornecidas para a linha em análise. Em outras palavras, a alocação trabalhador-estação passa a ser um parâmetro no contexto em análise. Cabe, contudo, a decisão relativa à alocação trabalhador-estação

em cada uma das posições das estações duais; deste modo, o modelo pode decidir alocar um trabalhador a somente uma posição dos lados de uma estação dual (*e.g.*, posição alta) ou às duas posições de cada um dos lados das duais.

A Equação 13 determina que uma tarefa é realizada por somente um trabalhador. As Inequações 14 a 16 representam um “*and*” lógico, implicando que a tarefa é realizada por um trabalhador em uma certa estação ($vTWS$) se e somente se a tarefa é realizada pelo trabalhador (vTW) e a tarefa é designada a esta estação (vTS). As Inequações 17 e 18 são restrições complementares, as quais impõem que as variáveis vTW e vTS assumam o valor 1 se qualquer variável $vTWS$ assumir também o valor 1.

$$\sum_{(t,s) \in TS} vTS_{ts} = \sum_{(t,w) \in TW} vTW_{tw} \quad \forall t \in Tasks \quad (13)$$

$$vTWS_{tws} \leq vTW_{tw} \quad \forall (t, w, s) \in TWS \quad (14)$$

$$vTWS_{tws} \leq vTS_{ts} \quad \forall (t, w, s) \in TWS \quad (15)$$

$$vTWS_{tws} \geq vTW_{tw} + vTS_{ts} - 1 \quad \forall (t, w, s) \in TWS \quad (16)$$

$$\sum_{(t,w,s) \in TWS} vTWS_{tws} \geq vTW_{tw} \quad \forall (t, w) \in TW \quad (17)$$

$$\sum_{(t,w,s) \in TWS} vTWS_{tws} \geq vTS_{ts} \quad \forall (t, s) \in TS \quad (18)$$

As restrições 19 e 20 são utilizadas para estabelecer a conexão entre a alocação de um trabalhador a uma estação e as variáveis $vTWS$. O parâmetro Mb utilizado na Inequação 20 deve ser um valor suficientemente grande em relação ao número máximo de tarefas a serem alocadas a um trabalhador, por exemplo, $Mb = NT$. Adicionalmente, a Inequação 21 estabelece que, no contexto em análise, somente um trabalhador pode ser alocado a cada estação. Salienta-se que os lados direito e esquerdo das estações duais são considerados com numerações de “estações separadas” e, portanto, somente um trabalhador pode ser alocado ao respectivo lado. Cada lado da estação dual, por sua vez, é dividido em posição alta e baixa, conforme ilustrado na Figura 11. A cada uma destas posições é associada a numeração de uma “estação”, a qual somente um trabalhador pode vir a ocupar. Seguindo-se a nomenclatura apresentada na Figura 11, a S5 posição alta do lado direito (A-D) receberia o índice de “estação” 5, a S5 A-E o índice 6, S5 B-D o índice 7 e a S5 B-E o índice 8. A estação real da linha nominada com S6 passa a ser identificada no modelo pelo índice 9. Deste modo, para fins de transcrição ao modelo, o número total de índices de “estações”, considerando as 9 estações não duais e as 3 duais efetivamente

presentes na linha, acarretaria um total de 21 índices para “estações”.

$$vWS_{ws} \leq \sum_{(t,w,s) \in TWS} vTWS_{tws} \quad \forall (w,s) \in WS \quad (19)$$

$$vWS_{ws} \cdot Mb \geq \sum_{(t,w,s) \in TWS} vTWS_{tws} \quad \forall (w,s) \in WS \quad (20)$$

$$\sum_{(w,s) \in WS} vWS_{ws} \leq 1 \quad \forall s \in Stations \quad (21)$$

As Inequações 22 a 24 representam um “and” lógico com o objetivo de determinar se é realizada a movimentação de um trabalhador w entre as “estações” s_1 e s_2 . De fato, no contexto em análise, a referida movimentação somente pode ocorrer entre as posições alta e baixa de um dos lados da estação dual.

$$vWSS_{ws_1s_2} \leq vWS_{ws_1} \quad \forall (w,s_1,s_2) \in WSS, (w,s_1) \in WS \quad (22)$$

$$vWSS_{ws_1s_2} \leq vWS_{ws_2} \quad \forall (w,s_1,s_2) \in WSS, (w,s_2) \in WS \quad (23)$$

$$vWSS_{ws_1s_2} \geq vWS_{ws_1} + vWS_{ws_2} - 1 \quad \forall (w,s_1,s_2) \in WSS, (w,s_1) \in WS, (w,s_2) \in WS \quad (24)$$

Em um problema de balanceamento que envolve somente decisões de alocação de tarefa-estação, o tempo de ciclo (vCT) é limitado pela estação mais carregada, ou estação gargalo (*bottleneck station*). Por outro lado, quando as atividades de um trabalhador podem ocorrer em mais de uma estação, o trabalhador em si pode ser o gargalo da linha quando são considerados os somatórios dos tempos das tarefas nas estações envolvidas, acrescido ainda dos deslocamentos realizados por este trabalhador. A Inequação 25 auxilia a limitar o valor mínimo de vCT a partir da carga de trabalho do colaborador, enquanto a Equação 26 determina o tempo de ciclo de cada trabalhador, considerando-se tarefas realizadas em diferentes estações e também os possíveis deslocamentos entre estações.

O trabalho de Sikora, Lopes e Magatão (2017) incorpora restrições oriundas do problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem*), originalmente propostas por (MILLER; TUCKER; ZEMLIN, 1960), dentro do contexto de balanceamento no qual os operadores podem realizar movimentos em diferentes estações, por exemplo um circuito envolvendo várias estações de trabalho. No contexto em análise a movimentação é restrita a somente um dos lados das estações duais, especificamente entre as posições alta e baixa, conforme Figura 11. Desse modo, a referida movimentação, se existir, pode ocorrer entre somente 2 “estações”. Assim, utilizou-se uma forma simplificada de representação do deslocamento, contabilizando-se

as movimentações necessárias para ida e volta do trabalhador, conforme Equação 26.

$$vWtime_w \leq vCT \quad \forall w \in Workers \quad (25)$$

$$\begin{aligned} vWtime_w = & \sum_{\substack{(t,w,s) \in TWS, \\ m \in Models}} OR_m \cdot DT_{tm} \cdot vTWS_{tws} + \\ & + \sum_{(w,s_1,s_2) \in WSS} 2 \cdot MT_{s_1s_2} \cdot vWSS_{ws_1s_2} \quad \forall w \in Workers \end{aligned} \quad (26)$$

As Inequações 27 e 28 estabelecem o valor da máxima diferença de tempo entre trabalhadores, valor que é minimizado na função objetivo.

$$vMaxDifW \geq (vWTime_w) - avW \quad \forall w \in Workers \quad (27)$$

$$vMaxDifW \geq -(vWTime_w) + avW \quad \forall w \in Workers \quad (28)$$

As Inequações 29 e 30 estabelecem condições relativas à distância máxima (em estações) que algumas tarefas devem possuir. São restrições que auxiliam a modelar condições tecnológicas que podem existir no ambiente fabril. Por exemplo, se duas tarefas devem ser alocadas à mesma estação, então $d = 0$; se d for configurado para 1 entre duas tarefas, então estas podem ser alocadas na mesma estação ou, no máximo em estações subsequentes da linha.

$$\sum_{(t_1,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_1s} \leq \sum_{(t_2,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_2s} \quad \forall (t_1, t_2) \in Dist \quad (29)$$

$$\sum_{(t_1,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_1s} + D_{t_1t_2} \geq \sum_{(t_2,s) \in TS} s \cdot vTS_{t_2s} \quad \forall (t_1, t_2) \in Dist \quad (30)$$

A Inequação 31 e a Inequação 32 determinam os valores mínimos que a variável $vRefCT$ deve assumir a partir das alocações das tarefas nas estações e trabalhadores. Ressalta-se que no cômputo da referida variável, diferentemente do que ocorre com vCT , não é considerado o valor da taxa de ocupação de cada modelo m dentro do *mix* produtivo (OR_m); não se trata de um valor ponderado. De fato, $vRefCT$ captura o tempo total mínimo considerando o que ocorre com todos os modelos de veículos. Assim, busca-se uma solução em que nenhum modelo m ultrapasse um tempo de ciclo permitido, conforme detalhado na Inequação 33.

$$\sum_{(t,s) \in TS} DT_{tm} \cdot vTS_{ts} \leq vRefCT \quad \forall s \in Stations, m \in Models \quad (31)$$

$$\sum_{(t,w,s) \in TWS} DT_{tm} \cdot vTWS_{tws} + \sum_{(w,s_1,s_2) \in WSS} 2 \cdot MT_{s_1s_2} \cdot vWSS_{ws_1s_2} \leq vRefCT$$

$$\forall w \in Workers, m \in Models \quad (32)$$

A Inequação 33 estabelece o máximo valor admissível ao tempo de ciclo de referência ($vRefCT$) a partir do parâmetro CT_{max} e da tolerância k_{RefCT} . Em termos práticos, considera-se que há o *takt time* estabelecido pela companhia para o contexto em análise, adota-se CT_{max} com este valor de *takt time*, mas eventuais violações de, por exemplo, 5% em CT_{max} ($k_{RefCT} = 1,05$) podem ser admissíveis pelas razões fundamentadas na seção 2.2. A restrição 33 auxilia a modelagem do referido contexto.

$$vRefCT \leq CT_{max} \cdot k_{RefCT} \quad (33)$$

Desta forma, a Equação 1 à Inequação 33 apresentam o modelo matemático utilizado, o qual foi inspirado na formulação proposta por Sikora, Lopes e Magatão (2017). Em relação ao modelo base, cita-se a significativa mudança na função objetivo considerada (Equação 1), a criação das restrições 6 a 9 para capturar a máxima diferença temporal entre estações, a criação das restrições 10 a 12 para contemplar questões relativas ao balanceamento vertical, a criação de restrições que determinassem o tempo de movimentação dos trabalhadores no contexto das estações duais (25 e 26), restrições usadas para determinação da máxima diferença temporal entre trabalhadores (27 e 28), além da criação de restrições atreladas à variável $vRefCT$ (31 a 33), a qual se fez de importância ímpar na determinação do tempo de ciclo de referência da linha, levando-se em conta cada modelo de produto. De modo simplificado, aproximadamente, 50% do modelo matemático apresentado tem por base equacionamentos propostos. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir da formulação matemática detalhada.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos evoluíram conforme a metodologia proposta (Capítulo 3) e são apresentados a seguir, refletindo a mais recente versão de soluções para rebalanceamento da Linha A, denominada aqui como V10 (versão 10), e que difere de versões anteriores pelo cumprimento dos objetivos estabelecidos e factibilidade de implementação.

O início da seção 5.1 apresenta os principais resultados da proposta de rebalanceamento, sendo aprofundado na subseção 5.1.1, onde são apresentados dados que demonstram a evolução dos resultados obtidos ao longo das diferentes versões. Em resposta à um dos objetivos específicos, e como ponto de destaque deste trabalho, a seção 5.2 apresenta o equilíbrio dos operadores para as estações duais. O diagrama de precedência, junto com a evolução das restrições impostas ao contexto industrial são apresentados na seção 5.3. Por fim, na seção 5.4 é destacada a etapa de verificação da solução, na qual, por meio de verificações virtuais e físicas, as propostas de redistribuição de tarefas foram validadas no ambiente fabril.

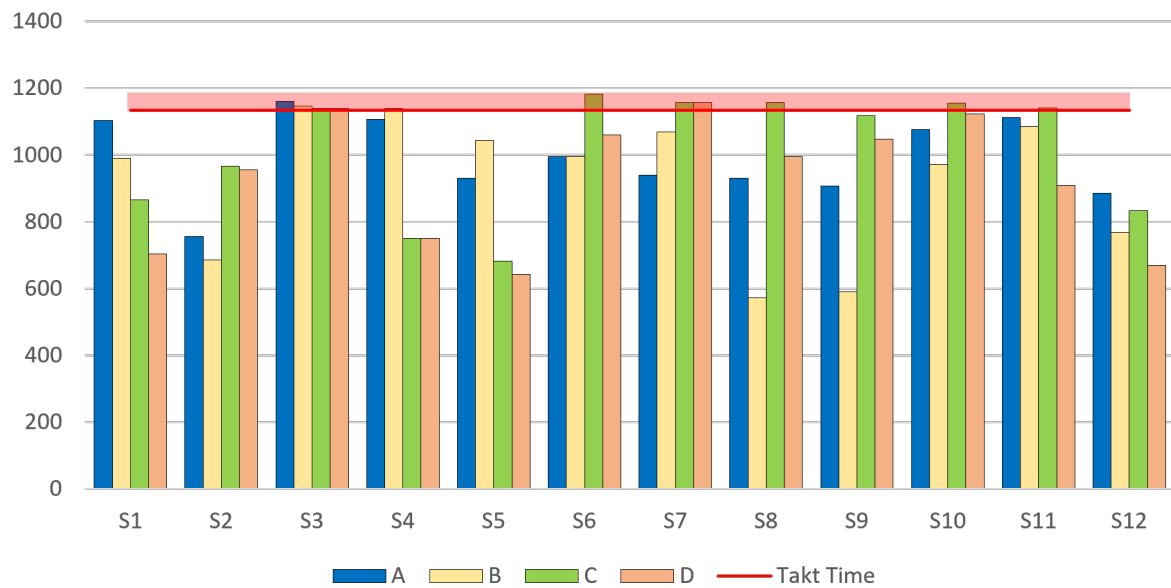
O modelo matemático (Capítulo 4) foi implementado e executado no ambiente computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*, em uma CPU Intel™ i7 de 64 bits - 2,9 GHz, 8 GB de RAM, com um limite de tempo de 3600 segundos. O resultado foi alcançado em sua otimalidade em tempos não proibitivos (menor do que 100 segundos). O modelo matemático gerado apresentou 9041 restrições e 4849 variáveis, das quais, 4577 são variáveis binárias.

5.1 Proposta de rebalanceamento

A solução de rebalanceamento obtida em V10 apresenta um resultado positivo frente às condições estabelecidas para funcionamento da Linha A, respondendo ao objetivo principal do estudo (seção 1.3). A Figura 13 apresenta o resultado principal da proposta de rebalanceamento: o tempo de ciclo das 12 estações (S1 a S12) para cada um dos 04 modelos (A, B, C e D) de motores. Evidencia-se nessa figura um tempo de ciclo menor do que o objetivo (1134 u.t.) para 09 dos 12 postos de trabalho, considerando os 04 modelos de produto. Para os outros 03 postos de trabalho, ao menos 01 dos modelos de produto apresenta tempo de ciclo maior do que o objetivo, mas ainda dentro da tolerância aceitável de +5%. É de comum acordo que a absorção do tempo excedente ao objetivo estabelecido deve ser alcançada por meio de melhorias no processo dedicadas a cada modelo e também pelo ganho de destreza operacional dos operadores, decorrente da familiaridade de montagem dos novos modelos de produto, conforme fundamentado na seção 2.2.

É possível notar que a estação S3 demanda maior atenção para sua implantação, pois diferentemente de outros postos de trabalho, apresenta tempo de ciclo levemente acima do objetivo para todos os modelos de produto. As tarefas consideradas nesse posto de trabalho possuem baixa liberdade para movimentação, seja pela necessidade de recursos dedicados ou por restrições impostas pela precedência à demais tarefas.

Figura 13 – Resultados do tempo de ciclo (em u.t.) em cada estação (V10)



Fonte: Autoria própria (2022).

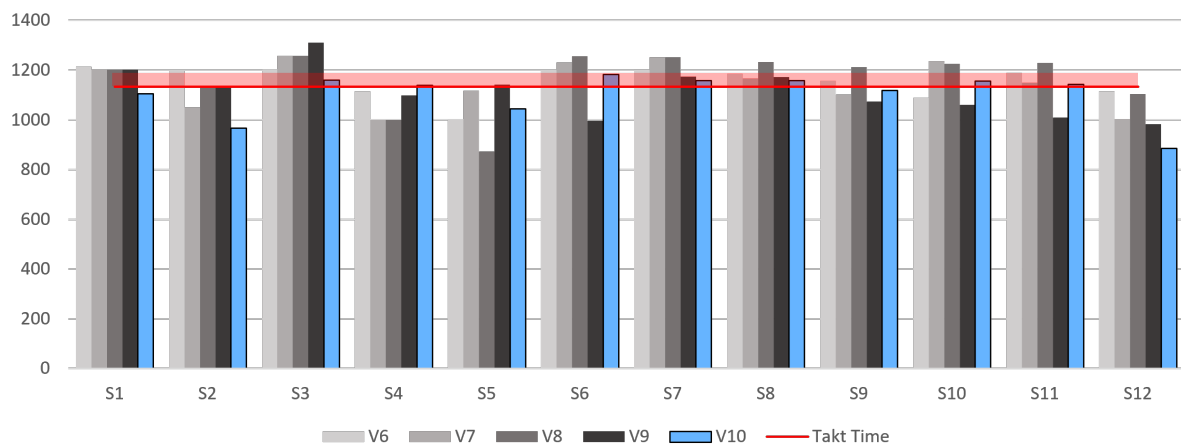
Devido à maior complexidade do modelo A em relação aos demais modelos, é esperado que o balanceamento horizontal não possa ser alcançado plenamente. Em V10 essa condição é comprovada e pode ser observada na Figura 13. No entanto, é importante considerar que dentro da função objetivo foram estabelecidos critérios para melhor balanceamento dos seus termos (Equação 1). Minimizar o tempo de ciclo de referência e a quantidade de tarefas redistribuídas são fatores priorizados frente à critérios que buscam melhor suavidade entre modelos, estações e operadores. Em linhas gerais, os pesos adotados para k_1 a k_7 na Equação 1, após testes preliminares de aderência da resposta, seguiram o seguinte racional: $k_1 > k_5 > k_6 > k_2, k_3, k_4 > k_7$. O balanceamento dos fatores que compõem a função objetivo poderia ser reformulado, impactando os resultados encontrados em V10, no entanto não refletiria os interesses de implementação que regem esse estudo.

5.1.1 Evolução dos resultados

O desenvolvimento de soluções foi seguido de significativa evolução nos resultados, de forma que à cada novo ciclo foram identificadas novas restrições, ou ainda, premissas para a composição dos dados de entrada foram reestruturadas. Pode-se citar como exemplo, atividades que são compostas por montagem seguida de fixação, onde preliminarmente eram definidas como uma única tarefa, e foram decompostas em duas tarefas separadas, aumentando assim o grau de liberdade para sua redistribuição. Além disso, ao adotar essa abordagem, para alguns poucos casos, foi possível identificar atividades que poderiam ser redirecionadas para estações de pré-montagem, que não integram o escopo do corrente trabalho.

Somente a partir da sexta versão de resultados (V6) é que o atual escopo de atividades, com as divisões e agrupamentos pertinentes, permaneceu estável. A partir de V6, então, foi possível obter soluções factíveis para pelo menos 01 dos modelos de produto, ao passo que à cada novo ciclo o resultado foi melhorado, expandindo a viabilidade para demais modelos ou se adequando de melhor forma aos objetivos específicos (seção 1.3). A Figura 14 representa a evolução das soluções propostas desde V6 até a atual V10, considerando o modelo com maior tempo de ciclo para cada estação.

Figura 14 – Evolução do tempo de ciclo das estações (em u.t.) para V6 a V10



Fonte: Autoria própria (2022).

A cada ciclo de soluções, diferentes conjuntos de alterações foram propostos, seja por alterações nos dados de entrada ou pela adição de novas restrições identificadas ao decorrer do trabalho. É possível observar na Tabela 8 a quantidade de alterações propostas em cada ciclo de resultado, relacionando ainda essa quantidade entre as diferentes versões de solução. A proposta V10 por exemplo, se comparada com sua versão anterior (V9), propõem a redistribuição de 38 atividades, no entanto, quando essa mesma análise é feita, mas tomando como base o balanceamento referencial, adotado antes do início desse trabalho (Ref.), é indicado que 78 tarefas sejam redistribuídas.

Tabela 8 – Evolução da quantidade de alterações

	REF	V6	V7	V8	V9	V10
REF		74	87	81	80	78
V6			60	65	62	68
V7				45	59	65
V8					36	45
V9						38

Fonte: Autoria própria (2022).

Por se tratar de um caso de aplicação real de rebalanceamento de atividades, é essencial permanecer com um número factível de alterações. Dessa forma, o resultado apresentado com

78 atividades redistribuídas (de um total de 212) pode em um primeiro momento gerar certa estranheza devido ao número de mudanças relativamente elevado, mas dois pontos devem ser considerados antes de qualquer conclusão prévia:

- Novo posto de trabalho - Conforme apresentado na subseção 1.1.2, o novo posto de trabalho *S12* passa a ser utilizado e deve absorver atividades novas ou que estejam distribuídas nas demais estações. Um total de 08 atividades são redistribuídas para a nova estação.
- Novas montagens - Conforme definido na apresentação do problema, novas atividades referentes aos novos modelos de produto devem ser adicionadas à proposta de rebalanceamento. Das alterações quantificadas, 27 representam essa adesão.

Deste modo, considerando as questões relativas à inclusão de novas montagens e presença de um novo posto de trabalho, o número de mudanças sugeridas em V10 foi considerado aceitável, dada a considerável mudança operacional que a Linha A deve sofrer.

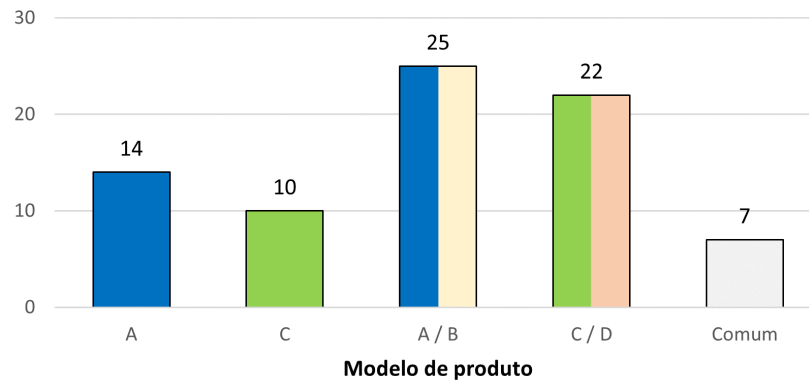
A fim de suportar a futura implementação da proposta de rebalanceamento foi identificado como as 78 mudanças sugeridas estão associadas à cada modelo de produto, conforme ilustrado na Figura 15. Evidencia-se que 14 tarefas exclusivas ao modelo A devem ser reposicionadas, enquanto 10 tarefas necessárias para o modelo C e apenas 07 tarefas que são comuns a todos os modelos se enquadram da mesma forma. Completando o conjunto de tarefas a serem reposicionadas estão 25 necessárias aos modelos A e B e outras 22 aos modelos C e D.

Pode-se notar na Figura 15 que todos os modelos são impactados de certa forma. Mesmo que os modelos A e C sejam relativamente mais impactados do que os demais, requerendo mais mudanças, essa relativa dificuldade de implementação pode ser compensada devido ao maior volume de produção que estes modelos representam, conforme detalhado na Tabela 1. Entende-se que diferentes estratégias podem ser adotadas para a implementação das alterações na Linha A, à critério da equipe técnica e com base em fatores que estão além do contexto desse trabalho, podendo por exemplo ser iniciada por tarefas vinculadas apenas ao modelo A (de maior volume) ou ainda iniciando por aquelas que são comuns à todos os modelos. Ao final do Capítulo 6 é sugerido aprofundamento desse tema.

5.2 Resultado do equilíbrio em estações duais

Conforme apresentado na Figura 3, a possibilidade de atuação dos operadores (A e B) sofre limitações provenientes do posicionamento otimizado do produto para apenas um dos operadores. A importância desse tópico reforçou a necessidade de adaptação do modelo matemático, e sua resolução foi estabelecida como um dos objetivos deste estudo (seção 1.3).

Foi adotado como indicador um índice percentual de “sinergia” para conferência da efetividade da resposta do modelo matemático em relação ao equilíbrio em estações duais. Esse

Figura 15 – Distribuição da quantidade de alterações necessárias para cada modelo de produto

Fonte: Autoria própria (2022).

índice pode ser definido como o tempo em que ambos os operadores executam coordenadamente operações na mesma posição do produto, dividido pelo tempo total disponível para a operação (*TaktTime*), ou seja, reflete uma medida relativa do total de tempo no qual os operadores atuam de forma conjunta em uma determinada posição do motor. Dessa forma, o indicador numérico de “sinergia” é adotado em valores percentuais (%). Um posto de trabalho que apresente 100% de sinergia está em perfeito equilíbrio de carga de trabalho para ambos operadores, nos dois posicionamentos do motor na estação.

Para os postos de trabalho S5, S9 e S11 (estações duais) o resultado obtido em V10 para a sinergia foi satisfatório; o equilíbrio entre os dois lados de montagens e a respectiva altura do produto é apresentado na Tabela 9. No caso do posto de trabalho S5 para o modelo A, por exemplo, tanto o operador do lado esquerdo quanto o operador do lado direito executam a maior parte do trabalho com o motor na posição alta, com 724 u.t. e 864 u.t., respectivamente. Em seguida procedem juntos para operações com o motor na posição baixa, com 208 u.t. e 32 u.t., respectivamente. O tempo de espera dos operadores pode ser obtido pela diferença entre as respectivas cargas de trabalho para cada posição do produto, sendo nesse caso de 140 u.t. para o produto na posição alta ($864 - 724$) e 176 u.t. na posição baixa ($208 - 32$). Considerando que o *takt time* previamente definido é de 1134 u.t, pode-se calcular o valor de sinergia para o posto de trabalho S5, como $(1 - 140/1134)$ para o motor na posição alta e $(1 - 176/1134)$ na posição baixa.

A fim de estabelecer o maior grau de sinergia frente ao escopo total que rege esse estudo, foi adotado na função objetivo (Equação 1) a otimização de tal equilíbrio para o modelo equivalente, onde é considerada a participação de cada modelo de produto em relação ao volume de produção total, dessa forma a sinergia dos operadores é otimizada considerando a média ponderada da carga de trabalho. Em detrimento à essa decisão, especificamente para o modelo C na estação S11 e para o modelo D na estação S9, o índice de sinergia ficou abaixo do recomendado pela equipe técnica responsável pela Linha A ($> 60\%$). Para os demais modelos e estações esse

índice alcançou níveis desejados. Os índices de sinergia para o modelo equivalente foram iguais ou superiores a 98% em S5, S9 e S11, indicando um correto alinhamento de resposta do modelo matemático em relação à função objetivo estabelecida (Equação 1).

Em futuros desenvolvimentos, pode-se realizar aprimoramentos no modelo matemático de modo a considerar a sinergia para cada modelo de produto ao invés da consideração centrada no modelo equivalente, avaliando-se a evolução da resposta em relação à sinergia para cada modelo, mas também em relação aos demais aspectos considerados e ponderados na função objetivo (Equação 1). Entende-se que embora sejam possíveis refinamentos no índice de sinergia, o destaque desse trabalho se dá na proposta e utilização desse índice. Em V10, a resposta validada operacionalmente tomou em conta a sinergia para o modelo equivalente, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Sinergia em estações duais (V10)

	Posição	A		B		C		D		MODELO EQ.	
		Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo
S5	Esquerdo	724	208	724	321	448	0	643	0	647	152
	Direito	864	32	732	32	311	373	265	373	646	151
	Diferença	140	176	8	289	138	373	378	373	1	1
	Sinergia (%)	88%	85%	99%	75%	88%	67%	67%	67%	100%	100%
S9	Esquerdo	907	0	591	0	689	311	405	311	755	109
	Direito	567	216	567	0	1058	59	988	59	732	129
	Diferença	340	216	24	0	370	251	583	251	23	20
	Sinergia (%)	70%	81%	98%	100%	67%	78%	49%	78%	98%	98%
S11	Esquerdo	872	240	770	240	910	0	910	0	870	156
	Direito	1010	0	1085	0	578	564	578	157	870	157
	Diferença	138	240	316	240	332	564	332	157	0	1
	Sinergia (%)	88%	79%	72%	79%	71%	50%	71%	86%	100%	100%

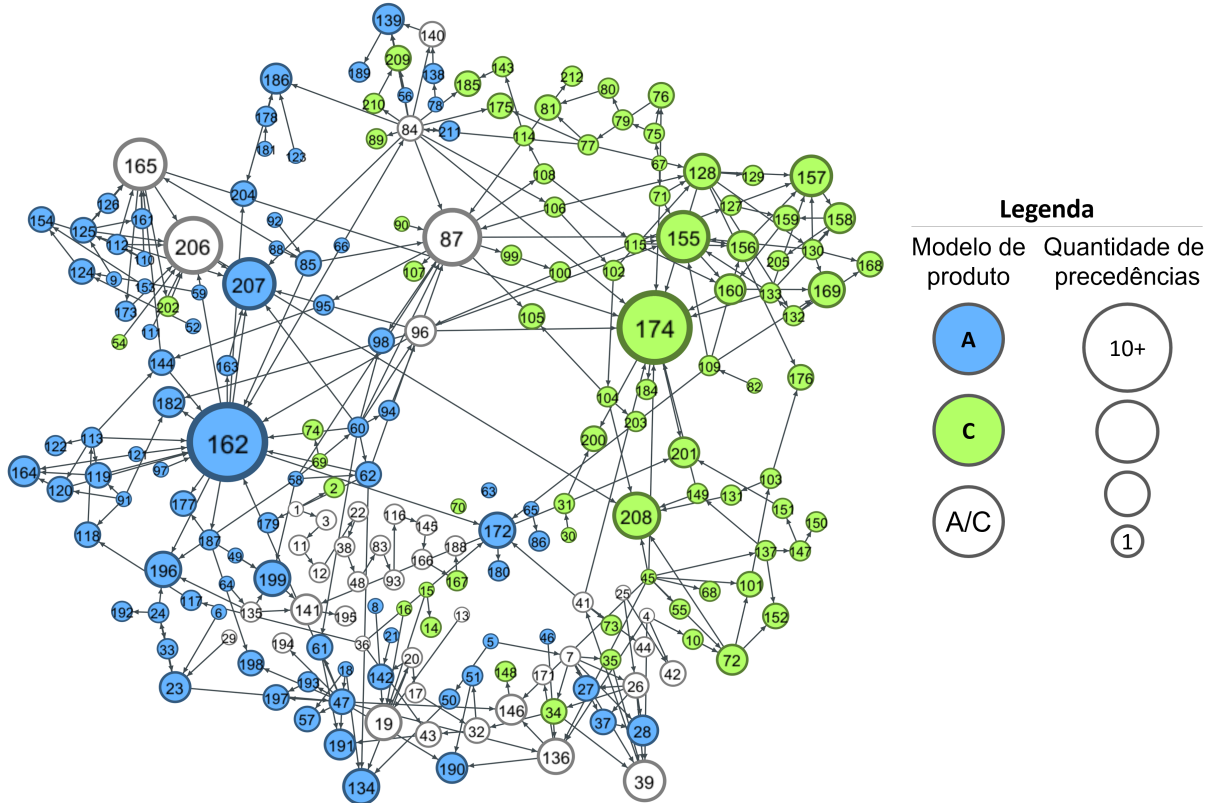
Fonte: Autoria própria (2022).

5.3 Diagrama de precedência e restrições resultantes

Conforme apresentado na seção 3.2, a relação de montagem entre diferentes tarefas pode resultar em uma condição de precedência, gerando assim uma restrição à proposta de rebalanceamento. Para melhor visualização do conjunto de restrições de precedências, foi elaborada a Figura 16, na qual pode ser observada a inter-relação entre as tarefas que compõem os modelos de produto com maior volume de produção, (A e C), e também as tarefas que são comuns entre ambos. A representação de cada tarefa é feita por um nó, onde é inserido o respectivo índice. A relação de precedência é indicada por uma seta que parte da tarefa precedente para a

tarefa sucessora, e ainda, o diâmetro do nó reflete a quantidade de restrições de precedência que envolvem tal tarefa.

Figura 16 – Diagrama de precedências (V10)

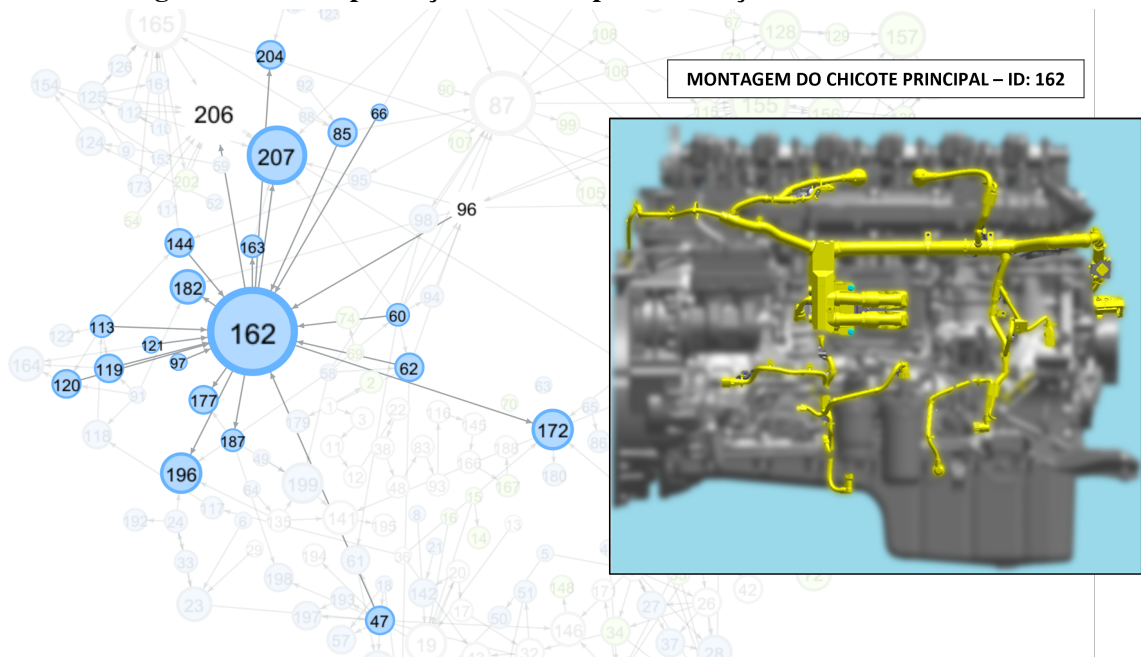


Fonte: Autoria própria (2022).

Diferentemente de diagramas de precedência teóricos encontrados na literatura, a condição real da Linha A gera um diagrama de precedência onde é visualmente ilustrada a complexidade existente em sistemas produtivos. As características e método de montagem das tarefas executadas são fatores que contribuem para a grande quantidade de inter-relações entre as tarefas, uma vez que os diferentes sistemas de funcionamento do motor são integrados (subseção 1.1.2).

Foi possível observar durante a etapa de validação dos resultados (seção 5.4), que algumas tarefas geram maior dificuldade para validação do seu novo posicionamento. Tais tarefas estão associadas a um maior número de restrições de precedência para sua conclusão. Isso é evidenciado na Figura 17, na qual é tomado como exemplo a tarefa 162, que corresponde à montagem do chicote principal. Essa tarefa consiste em posicionar o chicote elétrico sobre o motor e, em seguida, realizar as conexões com cada um dos sistemas que possuem interface elétrica. Dessa forma, a tarefa demanda que cada um desses componentes já esteja devidamente fixado. Assim, quando determinada versão de solução sugere a redistribuição dessa atividade para uma nova estação, é necessário validar a interface com cada um dos componentes predecessores e su-

Figura 17 – Exemplificação de tarefa para validação de resultados



Fonte: Autoria própria (2022).

cessores. De forma contrária, tarefas que possuem apenas uma restrição de precedência podem ser facilmente validadas.

De modo complementar ao exposto ao final da subseção 5.1.1, a dificuldade de validação de um novo posicionamento de tarefa, evidenciada no diagrama de precedências elaborado na Figura 16, pode também vir a ser um critério que auxilie a equipe técnica a decidir as tarefas com prioridade de serem reposicionadas.

Conforme sugerido na metodologia proposta (Capítulo 3), após concluída a etapa de identificação das restrições de precedência, deve-se considerar as restrições de recursos impostas à proposta de rebalanceamento. É possível observar na Tabela 10 que dentre as 212 tarefas que compõem o presente estudo, 34 devem ser alocadas à um único posto de trabalho, consideradas para o modelo matemático como tarefas fixas. A maior parte das tarefas possui determinado grau de liberdade para reposicionamento, sendo esse grupo dividido em 41 tarefas que possuem baixo grau de liberdade para reposicionamento (entre 2 e 4 postos de trabalho), 114 tarefas com liberdade moderada para reposicionamento (entre 5 e 8 postos de trabalho) e, por fim, 23 tarefas que possuem alto grau de liberdade, podendo ser reposicionadas entre 9 e 11 diferentes postos de trabalho.

O elevado número de tarefas com alto grau de liberdade pode ser vinculado à natureza das operações realizadas na Linha A, que em sua grande maioria são operações manuais que utilizam recursos comumente disponíveis nos postos de trabalho. No entanto, nenhuma das tarefas listadas possui total liberdade para reposicionamento, indicando dessa forma que as

Tabela 10 – Relação de tarefas e o respectivo grau de liberdade para reposicionamento.

	Qtd de postos de trabalho	Qtd de tarefas
Tarefas fixas a um único posto de trabalho	1	34
Tarefas com limitada liberdade para reposicionamento	2 - 4	41
	5 - 8	114
	9 - 11	23
Tarefas totalmente livres para reposicionamento	12	0

Fonte: Autoria própria (2022).

restrições de recursos são fatores limitadores às possibilidades de rebalanceamento, afetando diretamente todo o escopo deste trabalho.

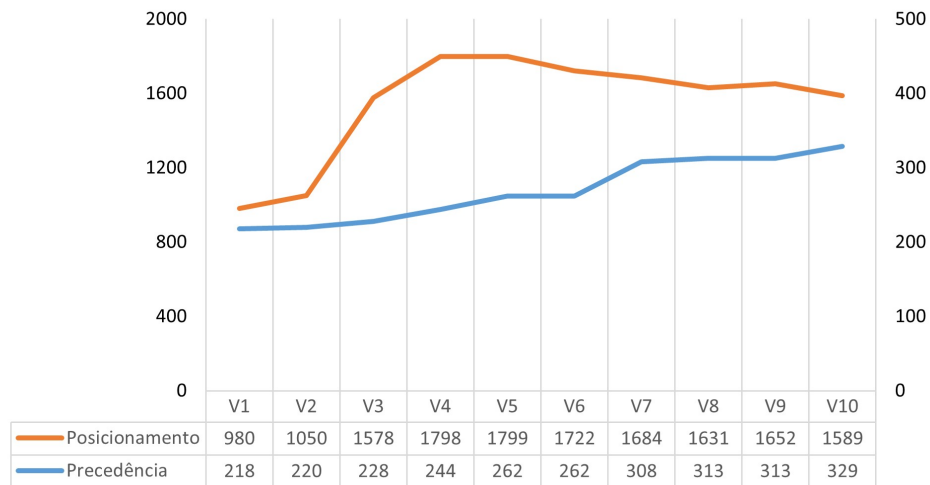
O aprimoramento das condições práticas para a obtenção da solução ao longo das versões pode ser observado no fato de que novas restrições físicas foram identificadas durante a etapa de validação dos resultados. Um resumo dessa evolução pode ser observado na Figura 18, na qual indica-se para cada versão (de V1 até V10), o número de restrições físicas relativas a “Posicionamento” e “Precedência” (*e.g.*, linhas de dados coletados em planilha a partir de folhas de processo e observações *in loco*). Vale ressaltar que o modelo matemático considera tais restrições físicas a partir dos diferentes parâmetros fornecidos e gera as restrições matemáticas representativas às condições estabelecidas pelos diferentes parâmetros de entrada. Em V10, mais de 9000 restrições matemáticas são geradas para o caso estudado.

Na Figura 18, em relação às restrições de precedência entre diferentes tarefas, pode ser observado que o aumento foi gradativo, fazendo com que a solução fique cada vez mais restrita. Para as restrições de possibilidades de posicionamento, primeiramente houve um aumento na quantidade de restrições, que nesse caso indicam a quantidade de estações para quais as respectivas tarefas podem ser redistribuídas. O aumento do grau de liberdade vem sendo gradativamente corrigido a cada nova versão, refletindo um maior entendimento das possibilidades de montagem dos modelos de produto.

5.4 Validação dos resultados

Seguindo o fluxo de trabalho proposto na Figura 12, todas as soluções sugeridas pelo modelo matemático foram primeiramente verificadas em ambiente virtual, observando as propostas de reposicionamento das tarefas, responsabilizando essa que foi atribuída ao engenheiro responsável pelo processo produtivo da Linha A. Para as versões que passaram sem ressalvas pela verificação virtual (V2, V6, V9 e V10, conforme Tabela 11), decidiu-se então prosseguir para a montagem física dos motores. Além de finalizar o ciclo da metodologia proposta, essas quatro versões tiveram objetivos complementares e que são detalhados na sequência.

A versão V2 refletiu o primeiro resultado obtido através da implementação e resolução computacional do modelo matemático em ambiente IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*

Figura 18 – Evolução das restrições físicas ao longo das versões

Fonte: Autoria própria (2022).

(o modelo foi previamente desenvolvido em ambiente GUSEK¹). No entanto, o resultado foi considerado como incompatível por uma série de restrições que não haviam sido previamente consideradas. Um reflexo importante dessa primeira validação física pode ser observado na Figura 18, onde há um aumento na quantidade de restrições de posicionamento, fato esse que só foi percebido a partir dos primeiros testes em ambiente produtivo.

Na versão V6, cujo resultado foi detalhado em (BATISTA; MAGATÃO, 2021), validou-se a adaptação feita no modelo matemático, considerando as particularidades da Linha A em relação ao balanceamento em estações duais. Nesta ocasião a proposta de rebalanceamento foi considerada como possível de implementação segundo a equipe técnica, no entanto algumas sugestões de melhorias foram identificadas, particularmente em relação ao equilíbrio no balanceamento vertical.

Na versão V9, buscou-se validar a adaptação feita no modelo matemático em relação ao equilíbrio vertical entre os diferentes modelos de produto, obtendo um resultado positivo e considerado novamente como possível de implementação, no entanto, estabelecendo um tempo de ciclo maior do que o *takt time* para um dos modelos de produto em uma das estações, item que viria a ser corrigido em uma próxima versão.

A versão V10, aqui documentada, buscou superar uma condição crônica estabelecida às demais versões, onde devido à falta de liberdade para realocação de atividades fixas à estação S3, essa permanecia com elevado tempo operacional. Um consolidado sobre as verificações realizadas é apresentado na Tabela 11.

Vale ressaltar que para viabilizar a montagem física dos motores, todos os postos de trabalho foram previamente adaptados segundo a proposta de rebalanceamento. Itens como instrução operacional de montagem, ferramentas e peças, foram disponibilizados nas respectivas

¹ <http://gusek.sourceforge.net>

Tabela 11 – Verificação das propostas de soluções

Versão	Verificação		Resultado	Comentários
	Virtual	Física		
V1	x		Incompatível	
V2	x	x	Incompatível	Validação do modelo matemático implementado no ambiente CPLEX Studio 12.10.0
V3	x		Incompatível	
V4	x		Incompatível	
V5	x		Incompatível	
V6	x	x	Possível	Validação da adaptação feita na F.O. para consideração do equilíbrio em estações duais
V7	x		Incompatível	
V8	x		Incompatível	
V9	x	x	Possível	Validação da adaptação feita na F.O. para consideração do equilíbrio vertical entre modelos.
V10	x	x	Possível	Validação da remoção de restrições para atividades fixas à S3 e S6.

Fonte: Autoria própria (2022).

estações e, assim, o teste representou o cenário futuro onde a industrialização dos novos modelos estará em vigor. Para garantir que a falta de destreza e pouca familiaridade com as novas montagens não fosse impeditivo para validação da proposta de rebalanceamento, todas as atividades foram executadas pelos técnicos mais experientes e que compõem a equipe de validação desse estudo. Muitas das montagens foram redistribuídas para estações em que, por razões diversas, já foram montadas no passado pelos técnicos, o que facilitou a validação nestes casos. Em outros casos, houve a necessidade de validar a mudança sugerida por reprodução *in loco* da montagem.

Ao longo das dez versões de resultados, todos os aspectos que constituem esse estudo foram, de alguma forma, modificados: novas restrições identificadas, diferentes funcionalidades implementadas no modelo matemático e reformulação dos dados de entrada. Nessa condição volátil, a etapa de validação dos resultados se fez extremamente necessária, primeiramente para assegurar que exista evolução nos resultados obtidos, mas também para fornecer a confiança necessária para a futura implementação da solução de rebalanceamento em ambiente real.

Tendo por base os desenvolvimentos realizados e os resultados obtidos, o Capítulo 6 a seguir apresenta as considerações finais do trabalho e perspectivas para futuros desenvolvimentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho aborda uma linha de montagem final de motores diesel, conforme ilustrado na Figura 2. As operações de montagem são realizadas por 15 operadores em 12 postos de trabalho; há 3 postos de trabalho nos quais 2 operadores atuam, os quais são denominados de estações duais. A linha passa por uma significativa mudança operacional, devido a aumento do volume de produção e a diversificações do *mix* produtivo, conforme Tabela 1. O correto equilíbrio da carga de trabalho entre operadores e estações, tendo em conta o *takt time* estabelecido pela companhia para o novo cenário de produção (1134 unidades de tempo), ao mesmo tempo em que as condições pré-existentes são respeitadas, é um desafio operacional. Configura-se, portanto, um problema de rebalanceamento de uma linha de montagem real multioperada e de modelo misto.

O presente estudo propõe uma metodologia de solução ágil para o problema (Figura 9), a qual é centrada no uso de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista, apresentado no Capítulo 4. Foram considerados quatro diferentes modelos de produto a serem produzidos na referida linha, bem como fatores inerentes a um processo produtivo já existente, por exemplo: quantidade fixa de estações e operadores e limitações de movimentação das tarefas devido a restrições de equipamentos. A natural precedência de realização das diferentes tarefas foi traduzida na criação de um diagrama de precedências (*e.g.*, Figura 16) com mais de 300 arcos.

Destaca-se no contexto abordado a necessidade de equilíbrio da carga de trabalho dos operadores que atuam nas estações duais, para as diferentes posições de montagem do motor na estação. De fato, são restrições relativas à ergonomia dos operadores nas estações duais que devem ser observadas, evitando situações onde o motor esteja posicionado de forma que um dos operadores não possa executar suas atividades de maneira apropriada.

Um trabalho *in loco* foi realizado de modo a obter tempos de execução das tarefas que fossem representativos do real processo produtivo em análise. Foi realizada a implementação do modelo matemático em ambiente computacional (*solver* matemático), obtendo-se respostas em tempos de poucos minutos. Dentro da metodologia de solução proposta, sumarizada na Figura 12, há necessidade de verificação da resposta primeiramente em ambiente computacional (verificação virtual) por especialista do sistema e, posteriormente, ocorre a preparação do ambiente industrial e montagem física do motor. Os resultados apresentados no Capítulo 5 refletem a décima versão de solução, conforme Tabela 11.

Ao todo, sugere-se a redistribuição de 78 tarefas de uma maneira ótima, respeitando as restrições impostas para novos ou diferentes postos de trabalho; esse número representa 35% do conjunto de tarefas atualmente executadas na Linha A. Embora esse índice seja relativamente elevado, foi avaliado como factível de implementação após concluída a etapa de verificação das soluções. O resultado encontrado condiz com a complexidade inerente a um sistema de produção real e corrobora com a própria definição deste trabalho como sendo um problema de

viabilidade de balanceamento de linha de montagem de modelo misto (MALBP). Outro ponto a ser considerado refere-se à implementação futura dos resultados obtidos, que pode ocorrer em uma única vez ou em etapas, o que poderia amenizar os impactos associados.

Além de atender aos objetivos propostos (seção 1.3), foi possível desenvolver uma solução ímpar na literatura ao combinar balanceamento de linha com a condição limitante imposta pelas restrições ergonômicas atreladas às estações duais. Nesse sentido, houve a necessidade de adequação do modelo matemático de base (SIKORA; LOPES; MAGATÃO, 2017), e tal adequação resultou conforme o esperado, assegurando um percentual superior à 98% para a sinergia dos operadores nos postos de trabalho multioperados (Tabela 9), considerando-se o modelo equivalente de produto. Ainda assim é sugerido um aprofundamento sobre este tema; em especial, é recomendado que versões futuras de rebalanceamento da Linha A possam alcançar resultados onde seja otimizada a sinergia dos operadores para cada modelo de produto.

A metodologia adotada se mostrou promissora no sentido em que a proximidade de um resultado implementável e melhor adequado às necessidades práticas tende a ser reforçada a cada nova iteração. Ao longo do desenvolvimento e verificação das dez versões de resultados foi possível identificar novas restrições (Figura 18), ao mesmo tempo em que melhorias no modelo matemático passaram a integrar o trabalho (Tabela 11). De modo complementar, a abordagem centrada na presença de um modelo matemático de otimização permite a análise ponderada dos diferentes fatores envolvidos no contexto de solução, os quais foram quantificados na função objetivo presente no modelo matemático (Equação 1).

A metodologia proposta foi bem aceita no ambiente industrial, contando com a colaboração de diferentes profissionais para a execução dos ciclos de desenvolvimento. A etapa de verificação da solução, composta pela verificação virtual e montagem física dos motores, teve destaque na metodologia proposta pois possibilitou a representatividade do cenário no qual a industrialização dos novos modelos de produto estará em vigor. Fatores como confiabilidade da solução proposta e sua própria implantação no sistema produtivo em vigor podem ser abordados em trabalhos futuros. Alguns outros temas foram abordados indiretamente nessa dissertação e se mostram como promissores tópicos a serem estudados futuramente. Ressaltam-se as seguintes possibilidades:

- Otimização do sequenciamento de produção em associação ao balanceamento de linha para diferentes modelos de produto, a exemplo das tratativas desenvolvidas por Lopes *et al.* (2019).
- Desenvolvimento de modelo matemático que possibilite a implantação de um sistema de manufatura autoconfigurável.
- Associar à cada tarefa um índice que represente a complexidade para seu reposicionamento, podendo esse ser baseado no diagrama de precedência e sua otimização como um fator adicional à ser inserido na função objetivo.

- Vincular às soluções de rebalanceamento uma ordem de priorização de tarefas a serem reposicionadas com base no impacto que os reposicionamentos geram.
- Expansão do uso do modelo matemático para solucionar demais casos reais de balanceamento de linha multioperada onde a limitação ergonômica dos operadores seja um aspecto relevante.

Como comentário final, ressalta-se que o trabalho desenvolvido permitiu a associação de diversos fatores que geram um maior entendimento sobre o tema de rebalanceamento de linha. A necessidade de aproximar soluções teóricas aos problemas reais encontrados na maioria das empresas é fato amplamente apontado por estudiosos e esperado por aqueles que atuam no ambiente industrial. Quando essa combinação é feita de maneira eficiente o conhecimento de todos pode ser expandido e esse trabalho reforça tal premissa.

REFERÊNCIAS

- ASKIN, R. G. *et al.* **Modeling and analysis of manufacturing systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons Incorporated, 1993.
- BATISTA, L. dos S.; MAGATÃO, L. Multi-manned Assembly Line Balancing Problem in a Diesel Engine Manufacturing Company: A Real-World Case Study. *In: 26th ICPR – International Conference on Production Research – Intelligent and Transformative Production in Pandemic Times*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 694 – 715, 2006. ISSN 0377-2217. Balancing Assembly and Transfer lines. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704004801>.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 168, n. 3, p. 694–715, 2006.
- BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GALLAGHER, M. An evolutionary model of continuous improvement behaviour. **Technovation**, v. 21, n. 2, p. 67–77, 2001. ISSN 0166-4972. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166497200000237>.
- BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. Lean manufacturing: literature review and research issues. **International Journal of Operations & Production Management**, Emerald Group Publishing Limited, 2014.
- BLANCETT, R. S. Learning from productivity learning curves. **Research-Technology Management**, Taylor & Francis, v. 45, n. 3, p. 54–58, 2002.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, p. 674 – 693, dez. 2007.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 509 – 528, 2008. ISSN 0925-5273. Special Section on Sustainable Supply Chain. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527307000965>.
- CAMPANELLI, A. S.; PARREIRAS, F. S. Agile methods tailoring – A systematic literature review. **Journal of Systems and Software**, Elsevier, v. 110, p. 85–100, 2015.
- CHAN, F. K.; THONG, J. Y. Acceptance of agile methodologies: A critical review and conceptual framework. **Decision Support Systems**, Elsevier, v. 46, n. 4, p. 803–814, 2009.
- DESSOUKI, M. M.; ADIGA, S.; PARK, K. Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards. **International Journal of Production Research**, p. 757–775, 1995.
- DIMITRIADIS, S. G. Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers’ groups operating on the same product and workstation. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 33, n. 9, p. 2757–2774, 2006.
- DOLGUI, A.; PROTH, J. M. Outsourcing: definitions and analysis. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 23-24, p. 6769–6777, 2013.

- EREL, E.; SARIN, S. C. A survey of the assembly line balancing procedures. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v. 9, n. 5, p. 414–434, 1998.
- FILHO, G. V. *Gestão da Qualidade Total: uma abordagem prática*. Campinas, SP: Alínea, 2007.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. [S.l.]: Cengage Learning, 2002.
- GÖKÇEN, H.; EREL, E. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 34, n. 2, p. 451–461, 1998.
- GORI, R. M. O balanceamento de uma linha de montagem seguindo a abordagem lean manufacturing. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXXII. Bento Gonçalves. 2012.
- GRÄSSLER, I. *et al.* Skill-based worker assignment in a manual assembly line. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 100, p. 433–438, 2021.
- HART, C. W. Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits. **International Journal of Service Industry Management**, MCB UP Ltd, 1995.
- IIDA, I. **Ergonomia: Projeto e Produção**. [S.l.]: Edgard Blücher, 2005.
- JADOON, G. *et al.* Smart and agile manufacturing framework, a case study for automotive industry. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 21, p. 5766, 2020.
- KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- LEAL, E. G.; GRESPAN, L. A. **Balanceamento de uma linha de montagem de motores diesel por programação matemática**. 2018. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- LOPES, T. C. *et al.* An iterative decomposition for asynchronous mixed-model assembly lines: combining balancing, sequencing, and buffer allocation. **International Journal of Production Research**, 2019.
- LOPES, T. C. *et al.* Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. **European Journal of Operational Research**, p. 1033–1048, 2017.
- MARQUEZE, T. T. **Balanceamento de uma linha de montagem de painel de instrumentos automotivos por Programação Linear Inteira Mista**. 2019. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- MEIRA, M. da S. **Otimização de Produção de uma Linha de Montagem Mista na Indústria Automotiva por meio de Programação Matemática**. 2015. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- MERENGO, C.; NAVA, F.; POZZETTI, A. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. **International Journal of Production Research**, v. 37, p. 2835–2860, 1999.
- MICHELS, A. S. *et al.* The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions. **Computers & Industrial Engineering**, v. 120, p. 320–333, 2018.
- MICHELS, A. S. *et al.* A Benders' decomposition algorithm with combinatorial cuts for the multi-manned assembly line balancing problem. **European Journal of**

- Operational Research**, v. 278, n. 3, p. 796–808, 2019. ISSN 0377-2217. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221719303844>.
- MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, E. A. Integer programming formulation of travelling salesman problems. **Journal of the ACM**, v. 3, p. 326–329, 1960.
- MOSENG, B.; ROLSTADAS, A. Success factors in the productivity process. *In: 10th World Productivity Congress*. [S.l.: s.n.], 2001.
- MURA, M. D.; DINI, G. Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2019.
- NEUMANN, W. P.; KOLUS, A.; WELLS, R. W. Human factors in production system design and quality performance—a systematic review. **IFAC-PapersOnline**, Elsevier, v. 49, n. 12, p. 1721–1724, 2016.
- PATTERSON, J. H.; ALBRACHT, J. J. Assembly-Line Balancing: Zero-One Programming with Fibonacci Search. **Operations Research**, v. 23, n. 1, p. 166–172, 1975.
- PILATI, F. *et al.* Multi-manned assembly line balancing: workforce synchronization for big data sets through simulated annealing. **Applied Sciences**, MDPI, v. 11, n. 6, p. 2523, 2021.
- PILATI, F. *et al.* Multi-Manned Assembly Line Balancing: Workforce Synchronization for Big Data Sets through Simulated Annealing. **Applied Sciences**, v. 11, n. 6, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/6/2523>.
- RAO, D. N. **Single and mixed-model assembly line balancing methods for both deterministic and normally distributed work element times**. 1971. Tese (Doutorado) — Oregon State University, 1971.
- ROODBANDI, A. S. J. *et al.* The correlation between ART and OCRA methods used for posture assessment of repetitive tasks. **La Medicina del Lavoro**, v. 112, n. 5, p. 370, 2021.
- SAIF, U. *et al.* A survey on assembly lines and its types. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 9, p. 95–105, jun. 2014.
- SANTOS, Z. G. dos; VIEIRA, L.; BALBINOTTI, G. Lean manufacturing and ergonomic working conditions in the automotive industry. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 3, p. 5947–5954, 2015.
- SCHOLL, A. **Balancing and Sequencing of Assembly Lines**. [S.l.]: Springer, 1999.
- SCHOLL, A.; BECKER, C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 666 – 693, 2006.
- SCHOLL, A.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. The assembly line balancing and scheduling problem with sequence-dependent setup times: problem extension, model formulation and efficient heuristics. **OR Spectrum**, 2011.
- SEBRINA, L. D.; CAKRAVASTIA, A. Learning curves in automobile assembly line. *In: International Conference on Industrial Engineering*. [S.l.: s.n.], 2011.
- SHRINIVASA, U. The evolution of diesel engines. **Resonance**, Springer, v. 17, n. 4, p. 365–377, 2012.

- SIKORA, C. G. S.; LOPES, T. C.; MAGATÃO, L. Traveling worker assembly line (re)balancing problem: Model, reduction techniques, and real case studies. **European Journal of Operational Research**, v. 259, p. 949–971, 2017.
- SUGUINOSHITA, G.; MAGATÃO, L. Resolução de um Problema Real de (Re)Balanceamento de Linha de Montagem de Motores Por Meio de Programação Matemática. *In: Anais do 50º SBPO*. [S.l.: s.n.], 2018.
- TAPPING, D.; LUYSTER, T.; SHUKER, T. **Value Stream Management: eight steps to planning, mapping, and sustaining lean improvements**. [S.l.]: Productivity Press, 2002.
- TEMPELMEIER, H. Practical considerations in the optimization of flow production systems. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 41, n. 1, p. 149–170, 2003.
- THOMOPOULOS, N. T. Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. **Management Science**, v. 14, p. 59–75, 1967.
- TU, Q.; VONDEREMBSE, M. A.; RAGU-NATHAN, T. The impact of time-based manufacturing practices on mass customization and value to customer. **Journal of Operations Management**, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 201–217, 2001.
- WILD, R. **Mass-Production Management: The Design and Operation of Production Flow-Line Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1972.
- WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. New York, USA: Wiley, 2020.
- YELLE, L. E. The learning curve: Historical review and comprehensive survey. **Decision Sciences**, Wiley Online Library, v. 10, n. 2, p. 302–328, 1979.