

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

**LEONARDO TORQUES CAVALLI**

**CONTRIBUIÇÕES POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA  
PARA O (RE)BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM  
OPERANDO EM MODO DEGRADADO**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2021**

**LEONARDO TORQUES CAVALLI**

**CONTRIBUIÇÕES POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO  
MATEMÁTICA PARA O (RE)BALANCEAMENTO DE UMA  
LINHA DE MONTAGEM OPERANDO EM MODO  
DEGRADADO**

**Contributions Based on Mathematical Programming to  
(Re)Balancing of an Assembly Line Operating in Degraded Mode**

Dissertação apresentado(a) como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre(a) 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**

**2021**



[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.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



LEONARDO TORQUES CAVALLI

**CONTRIBUIÇÕES POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA O (RE)BALANCEAMENTO DE  
UMA LINHA DE MONTAGEM OPERANDO EM MODO DEGRADADO**

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 Julho de 2021

Prof Leandro Magatao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luiz Carlos De Abreu Rodrigues, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

Prof Ricardo Luders, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/07/2021.

A conclusão deste projeto resume-se em dedicação. Dedicção que vi ao longo dos anos em meus pais e irmã, em minha família, em meus amigos e meus professores.

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria seguido o mesmo rumo sem todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a sua consolidação. A todos, os quais seria exaustivo aqui enunciar, aqui deixo meus sinceros agradecimentos.

Um agradecimento especial aos meus pais que sempre me incentivaram a realizar meus sonhos, a não desistir quando a situação se torna difícil ou conturbada e que me ensinaram, acima de tudo, a ser humano. Ao meu pai Carlos Cesar (*in memoriam*), deixo meus agradecimentos por todos os momentos em que teve a paciência de me ensinar quando tive dúvidas, por todos os momentos de invenções, aventuras e calmarias que tivemos juntos, pelo companheirismo. À minha mãe, Vera, deixo meus agradecimentos por jamais ter deixado eu desistir de realizar meus sonhos, por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, e por estar sempre presente quando mais precisei. À minha irmã, Luana, meus agradecimentos por todos os momentos de diversão, risadas, palhaçadas e companheirismo. Certamente, sem esses momentos de descontração, a trajetória até a conclusão deste projeto seria ainda mais árdua.

À minha família, agradeço pelo carinho, incentivo, críticas e todo apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador, Leandro Magatão, que me convidou a dar continuidade neste projeto iniciado em 2018 na graduação, que mostrou os caminhos a serem seguidos, pela confiança depositada, por todos os conselhos e momentos de conversa que foram determinantes para a finalização desta dissertação. Agradeço, também, por todo o tempo disponibilizado e pela atenção dada ao projeto, pela acessibilidade e pela constante valorização deste trabalho, que foram fundamentais o resultado final alcançado.

A todos os amigos pelo apoio e compreensão neste momento. Aos professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo (Albert Einstein).

## RESUMO

CAVALLI, Leonardo . **CONTRIBUIÇÕES POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA O (RE)BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM OPERANDO EM MODO DEGRADADO**. 2021. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

O balanceamento de linhas de montagem por meio de modelos matemáticos surgiu como uma proposta para a otimização de linhas produtivas, resultando em aumento de produtividade, redução de gargalos produtivos dentre outras contribuições. Estes modelos visam equalizar os tempos de produção entre diferentes estações de trabalho e operadores, balanceando o sistema produtivo. Não suficiente, uma nova vertente do segmento de otimização de sistemas produtivos se mostrou de igualitória importância, qual seja o rebalanceamento de linhas de montagem. A presente dissertação se enquadra neste segmento, visto que tem como objetivo a obtenção de um modelo matemático e soluções para o rebalanceamento de uma linha de montagem operando em modo degradado de produção, ou seja, com estações de trabalho em modo de falha. O estudo realizado teve como base uma linha de montagem instalada na região de Curitiba/PR, a qual possui dois segmentos de produtos, nominados segmentos A e B. Dentro de cada um dos segmentos uma série de modelos de produtos são produzidos. Para tal objetivo, foram considerados os quatro modelos de produtos enquadrados no segmento A desta empresa. Esses quatro modelos representam a totalidade de produtos do segmento em questão. Partido deles, das características da linha existente, e sabendo que a linha de montagem já passou por um processo de otimização e balanceamento e opera desta maneira quando não há estações em falha, objetiva-se encontrar um modelo matemático e soluções para o rebalanceamento desta linha para quando a mesma operar em modo degradado, ou seja, quando uma, ou mais, de suas estações de trabalho entra(m) em modo de falha. Foram analisados os índices e históricos de falhas das sete estações presentes na linha de montagem e realizou-se, inicialmente, uma avaliação da influência de todas as estações de trabalho, individualmente, no tempo de ciclo da linha de montagem para, posteriormente, realizar os estudos para as duas estações com maior incidência de paradas por falhas: estações 1 e 3, gerando três cenários de estudo: estação 1 em modo de falha; estação 3 em modo de falha; e estações 1 e 3 em modo de falha simultaneamente. Tendo por base estes cenários apresentados, quatro estudos de caso foram realizados para a primeira fase de execução do modelo matemático, nos quais a possibilidade de realocação das tarefas foi mais/menos restritiva. Dentro de cada um dos estudos foram obtidas soluções para o rebalanceamento da linha para operar em modo degradado de produção. Para a segunda fase de execução do modelo, um estudo complementar ao abordado na primeira fase foi executado, buscando a minimização do número de alterações na linha de montagem dado um tempo de ciclo máximo permitido. Deste modo, disponibilizam-se condições de trabalho otimizadas para a linha, mesmo quando um modo degradado de operação se faz necessário.

**Palavras-chave:** (Re)balanceamento de linhas de montagem. Modelos em Programação Matemática. Modo degradado de produção.

## ABSTRACT

CAVALLI, Leonardo . **CONTRIBUTIONS BASED ON MATHEMATICAL PROGRAMMING TO (RE)BALANCING OF AN ASSEMBLY LINE OPERATING IN DEGRADED MODE**. 2021. 89 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical Engineering and Industrial Computing) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

The balancing of assembly lines by mathematical models emerged as a viable proposal for production lines optimization, resulting in increased productivity, reduction of productive bottlenecks and other contributions. These models aim to equalize production times between workstations and workers, balancing the productive system. In addition, a new aspect of the production systems optimization segment proved to be of equal importance: the rebalancing of assembly lines. This research project fits into this segment, since it aims to obtain a mathematical model and solutions for the rebalancing of an assembly line operating in degraded mode of production, that is, with workstations in failure mode. This study was based on an assembly line installed in the region of Curitiba/PR; the line has two product segments, namely A and B. Within each segment, a series of product models are produced. For this project purpose, the four product models framed in A segment of this company were considered. These four models represent the totality of products in the A segment. This study aims to find a mathematical model and solutions for the rebalancing of this line for the operation in degraded mode, that is, when one (or more) workstation(s) goes(go) into failure mode. As a basic hypothesis, the studied assembly line has already undergone a process of optimization and balancing for normal conditions (without failure) and it operates in this way; thus, the characteristics of the existing line are known *a priori*. The historical data of failures of the seven stations in the assembly line were analyzed. First, the influence of workstations on the cycle time of the assembly line was evaluated, individually, in order to subsequently perform the studies for the two stations with the highest incidence of stopping failure conditions: stations 1 and 3. This fact generated three study scenarios: station 1 in failure mode; station 3 in failure mode; and stations 1 and 3 in failure mode, simultaneously. Based on these presented scenarios, four case studies took place, for the first phase of the mathematical model execution, in which the possibility of reallocating tasks was more / less restrictive. On the second phase of the model execution, a complementary study to the one addressed in the first phase was carried out, seeking to minimize the number of changes to the assembly line given a maximum allowed cycle time. Within each of the studies, the three scenarios presented were considered, leading to rebalancing solutions of the line operating in degraded mode of production.

**Keywords:** (Re)balancing assembly lines. Mathematical Programming models. Degraded production mode.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação simplificada do <i>Layout</i> da Linha de Montagem analisada . . .	17
Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Precedências . . . . .	30
Figura 3 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção desbalanceada x Linha de produção balanceada. . . . .	40
Figura 4 – Diagrama de desenvolvimento do método utilizado. . . . .	41
Figura 5 – Execução do modelo matemático em duas fases. . . . .	47
Figura 6 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem	51
Figura 7 – Avaliação da influência das estações de trabalho no tempo de ciclo da linha de montagem. . . . .	52
Figura 8 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1 . . . . .	56
Figura 9 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha	56
Figura 10 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3 . . . . .	57
Figura 11 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha	58
Figura 12 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente . . . . .	58
Figura 13 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, simultaneamente . . . . .	59
Figura 14 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	61
Figura 15 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	62
Figura 16 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	63
Figura 17 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	64
Figura 18 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	65
Figura 19 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	66

Figura 20 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	67
Figura 21 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	68
Figura 22 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	69
Figura 23 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	70
Figura 24 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	71
Figura 25 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	72
Figura 26 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	73
Figura 27 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	74
Figura 28 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	75
Figura 29 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	76
Figura 30 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	77
Figura 31 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho . . . . .	78
Figura 32 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para a estação 1 operando em modo degradado (N indica número de mudanças de tarefas). . . . .	78
Figura 33 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para a estação 3 operando em modo degradado. . . . .	79

Figura 34 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para as estações 1 e 3 operando em modo degradado, simultaneamente. . . . 79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Mix</i> de Produção na Linha Analisada. . . . .	16
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para elaboração do modelo matemático. . . . .	45
Tabela 3 – Índices e conjuntos utilizados para elaboração do modelo matemático. . . . .	45
Tabela 4 – Variáveis adotadas para elaboração do modelo matemático. . . . .	45
Tabela 5 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo ( <i>CT</i> ) e da quantidade de alterações requeridas ( <i>N</i> ) . . . . .	72
Tabela 6 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo ( <i>CT</i> ) e da quantidade de alterações requeridas ( <i>N</i> ) para a fase 2 do estudo. Considerando aumentos percentuais de até 10% no Tempo de Ciclo . . . . .	75
Tabela 7 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo ( <i>CT</i> ) e da quantidade de alterações requeridas ( <i>N</i> ) para a fase 2 do estudo. Considerando aumentos percentuais do Tempo de Ciclo de 10 a 35%. . . . .	76
Tabela 8 – Índices de Suavidade para os rebalanceamentos propostos . . . . .	80

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ALBP	Problemas de Balanceamento de Linhas de Montagem, do inglês <i>Assembly Line Balancing Problem</i>
ALRP	Problemas de Rebalanceamento de Linhas de Montagem, do inglês <i>Assembly Line Rebalancing Problem</i>
CT	Tempo de Ciclo, do inglês <i>Cycle Time</i>
CT <sub>max</sub>	Tempo de Ciclo Máximo, do inglês <i>Maximum Cycle Time</i>
GALBP	Problemas de Balanceamento de Linhas de Montagem Generalizados, do inglês <i>Generalized Assembly Line Balancing Problem</i>
MMD	Modelo Determinístico Múltiplo, do inglês <i>Multi-Model Deterministic</i>
MMS	Modelo Estocástico Múltiplo, do inglês <i>Multi-Model Stochastic</i>
SALBP	Problemas de Balanceamento de Linhas de Montagem Simples, do inglês <i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
MALBP	Problemas de Balanceamento de Linhas de Montagem de Modelo Misto, do inglês <i>Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem</i>
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
SMD	Modelo Determinístico Unitário, do inglês <i>Single-Model Deterministic</i>
SMS	Modelo Estocástico Unitário, do inglês <i>Single-Model Stochastic</i>
u.t	Unidades de Tempo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTO DO TEMA EM ESTUDO	15
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO	16
1.3	OBJETIVOS	18
1.4	JUSTIFICATIVAS	18
1.5	ESTRUTURAÇÃO	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	ARRANJO FÍSICO	20
2.2	LINHAS DE MONTAGEM	21
2.2.1	Índice de Suavidade na Linha de Montagem	24
2.3	BALANCEAMENTO DE LINHA	25
2.4	TEMPO DE CICLO E TEMPO <i>TAKT</i>	28
2.5	DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS	29
2.6	PROGRAMAÇÃO LINEAR	31
2.6.1	Formulação para Programação Linear	32
2.6.2	Programação Linear Inteira Mista	33
2.6.3	Programação por Metas Lexicográficas	35
2.7	REBALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM	36
2.8	MODO DEGRADADO DE PRODUÇÃO	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA APLICADA</b>	<b>39</b>
3.1	APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA	40
3.2	ETAPAS DA METODOLOGIA EMPREGADA	40
3.3	FORMULAÇÃO PARA O MODO DEGRADADO DE PRODUÇÃO	44
3.3.1	Variáveis e Parâmetros	45
3.3.2	Execução em Duas Fases	45
3.3.3	Função Objetivo	46
3.3.4	Restrições do modelo	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>50</b>
4.1	DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS ATUAL	50
4.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES DE TRABALHO NO TEMPO DE CICLO	52
4.3	PONDERAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO DO MODELO	53
4.3.1	Modo degradado - Realocação Livre de Tarefas	55
4.3.2	Modo degradado - Realocação Livre de Tarefas com Redução de Alterações	59
4.3.3	Modo degradado - Realocação Limitada de Tarefas	62
4.3.4	Modo degradado - Realocação Restrita de Tarefas	64
4.4	MODO DEGRADADO - MINIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE REALOCAÇÕES DE TAREFAS EM FUNÇÃO DO AUMENTO DO TEMPO DE CICLO PERMITIDO	66
4.5	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>81</b>

5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	81
5.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	83
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>85</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação versa sobre um problema encontrado em linhas de montagem, particularmente quando ocorrem falhas operacionais em uma ou mais de suas estações de trabalho. Neste capítulo apresentam-se elementos para o entendimento do tema abordado, os quais refletem as seções 1.1 a 1.5: Contexto do tema em estudo; Caracterização do problema abordado; Objetivos a serem obtidos com o desenvolvimento da pesquisa; Justificativa para o desenvolvimento do trabalho e Estruturação da dissertação.

## 1.1 CONTEXTO DO TEMA EM ESTUDO

A diminuição de custos de produção, a busca pela melhoria dos produtos e serviços, a redução dos tempos de fabricação e a otimização dos sistemas produtivos são objetivos comuns em diversos setores industriais. Para chegar a esses objetivos, tomadas de decisões estratégicas, com relação ao planejamento e programação da produção, devem ser realizadas. Devido à complexidade existente nos sistemas produtivos, essas tomadas de decisões são conduzidas com o uso de critérios experimentais, gerando decisões conservativas, as quais não utilizam a capacidade máxima de operação dos meios produtivos (YIN; AZIZ, 2018). Nesse contexto, a otimização da operação de linhas produtivas por meio de modelos matemáticos para o balanceamento das referidas linhas tem se tornado cada vez mais evidente e presente nas indústrias. O balanceamento de linhas de produção pode ser entendido como a atribuição de tarefas a estações de trabalho em uma linha de modo a obter o índice de produção desejado com o menor número de estações de trabalho (KRAJEWSKI *et al.*, 2009). Em contrapartida, outros literatos descrevem o balanceamento de linhas de produção como a análise das linhas produtivas que divide igualmente a carga de trabalho a ser executada entre as estações de trabalho, a fim de que o número de estações de trabalho necessário na linha de produção seja minimizado (GAITHER; FRAZIER, 2002).

Partindo de ambas definições apresentadas, o problema de balanceamento de linhas produtivas configura-se como um problema combinatorial complexo no contexto da otimização da manufatura, mas a solução otimizada desse problema é capaz de propiciar ganhos operacionais significativos (BOYSEN *et al.*, 2007).

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO

A linha de montagem utilizada como base para o desenvolvimento desta dissertação e posterior discussão está implementada em uma fábrica de equipamentos de grande porte, na região de Curitiba/PR, desde meados de 1975. Durante toda a sua existência, a fábrica buscou adotar novos processos industriais visando, entre outros fatores: redução da emissão de poluentes; redução do gasto de combustíveis; aumento da eficiência e capacidade de seus produtos. Esta fábrica é responsável pela produção de dois segmentos de equipamentos que serão denominados, por questões de sigilo, de segmentos A e B. Dentro de cada um dos segmentos, uma série de variedades (modelos) de equipamentos são encontrados.

Para o projeto de pesquisa são considerados os 4 modelos de produtos enquadrados no segmento A, aqui denominados de Modelo 1, Modelo 2, Modelo 3 e Modelo 4. Os tempos de produção, em unidades de tempo (u.t.), e a representatividade aproximada no *mix*<sup>1</sup> produtivo do segmento são apresentados na Tabela 1. Os dados apresentados foram mascarados, a pedido da empresa, por meio de uma constante aplicada aos tempos reais, coletados e fornecidos pela mesma. A extração dos tempos de cada atividade realizada nos postos de trabalho se deu por meio de cronoanálise, que se trata de uma ferramenta de gestão para analisar os tempos requeridos para execução das atividades durante o processo produtivo. A análise dos 4 modelos foi realizada nas 46 tarefas necessárias para a confecção dos mesmos, distribuídas nas 7 estações de trabalho presentes na linha de montagem (Figura 1), fato que será detalhado *a posteriori* no Capítulo 3, Metodologia.

**Tabela 1 – Mix de Produção na Linha Analisada.**

<b>Modelo</b>	<b>Tempo para produção [u.t.]</b>	<b>Participação no <i>mix</i> da linha [%]</b>
<b>Modelo 1</b>	79,7	23
<b>Modelo 2</b>	234,7	37
<b>Modelo 3</b>	236,3	30
<b>Modelo 4</b>	251,8	10

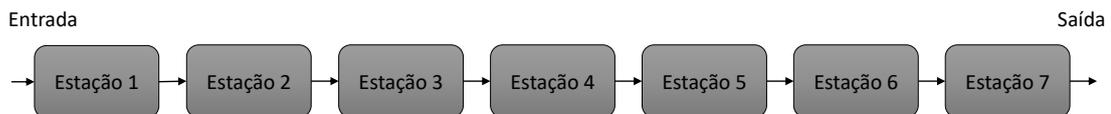
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Tabela 1, os 4 modelos apresentados representam 100% da ocupação da linha de montagem ilustrada na Figura 1, a qual é responsável pela confecção dos produtos do segmento A. Estes produtos apresentam similaridades em diversos aspectos, tais como: geometria, dimensões, características físicas e mecânicas, características produtivas, sequenciamento de atividades, dentre outros, o que justifica o agrupamento destes produtos em

<sup>1</sup> O *mix* produtivo representa a participação % de um determinado produto no total a ser produzido.

um único segmento. Em contrapartida, quando comparamos os tempos de produção de cada um dos 4 modelos, pode-se perceber que o Modelo 1 apresenta um tempo significativamente inferior aos demais modelos (2, 3 e 4). Este fato ocorre devido à menor complexidade de montagem requerida pelo Modelo 1. Neste modelo não são necessários, por exemplo, a montagem de sistemas de comando, controle e automação, sistemas estes que requerem mais tempo de montagem.

**Figura 1 – Representação simplificada do *Layout* da Linha de Montagem analisada**



**Fonte: Autoria própria.**

A linha de montagem, ilustrada esquematicamente na Figura 1, possui sete estações de trabalho e já passou por um processo de otimização e balanceamento. No entanto, a análise dos índices e históricos de falhas das sete estações da linha indica que duas destas estações apresentam maior incidência de paradas por falhas<sup>2</sup>: estações 1 e 3. Quando há falha em alguma das estações diz-se que a linha opera em *modo degradado*. De forma a complementar as informações industriais, e para facilitar o entendimento da influência de eventuais paradas de cada estação de trabalho no tempo de ciclo da linha de montagem, uma análise da falha de cada uma das estações é realizada e apresentada na Seção 4.2.

Quando as referidas falhas ocorrem, o sistema entra em modo degradado de operação até a recuperação da estação, fato que pode levar um tempo muito significativo (*e.g.*, de várias horas a dias), o que de fato ocorre para a linha analisada, justificando a necessidade de obter soluções otimizadas para o modo degradado de produção. Assim, assumindo como premissa o elevado tempo necessário para a execução das manutenções na linha quando ocorrem falhas, acredita-se que existam formas ainda otimizadas de operação da linha mesmo em modo degradado, fato a ser investigado no presente trabalho.

<sup>2</sup> Os índices de falha não são apresentados pois são informações internas e sigilosas da empresa fornecedora dos dados.

### 1.3 OBJETIVOS

Como objetivo geral desta dissertação encontra-se a otimização do sistema produtivo analisado quando o mesmo encontra-se em modo de falha (modo degradado), por meio da solução de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Para consecução do referido objetivo geral, apresentam-se os seguintes Objetivos Específicos:

- Analisar as operações (tarefas) presentes na linha de montagem avaliada, visando compreender: (i) as etapas de montagem dos diferentes modelos de produtos existentes no segmento A; (ii) as precedências de cada atividade de montagem, para cada um dos modelos; (iii) as restrições operacionais existentes devido ao *layout* físico da planta; (iv) restrições práticas que devam ser observadas em caso de operação em modo degradado.
- Implementar um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o balanceamento da linha em análise quando opera em modo degradado. Se necessário, estratégias de decomposição podem vir a ser propostas para a obtenção de soluções em tempo computacional adequado (*e.g.*, de segundos a poucos minutos) ou para a adequada representação do problema.
- Propor soluções de operação para modo degradado na linha em análise, de acordo com diferentes condições de operação, realizando análises comparativas.

### 1.4 JUSTIFICATIVAS

*“O objetivo principal de um balanceamento de linha de produção é fazer com que não haja grandes discrepâncias nos tempos de trabalho de cada operador... Se um engenheiro industrial quiser focar-se na redução de custos, deverá sempre incidir sobre este mesmo posto gargalo anteriormente referido.”* (ALMEIDA, 2015). Estabelecer uma linha de montagem/produção eficiente é um dos desafios encontrados e enfrentados por pesquisadores e engenheiros que trabalham com linhas produtivas, visto que linhas eficientes, operando de maneira otimizada e balanceada resultam, diretamente, na redução de custos, na otimização dos tempos e alocação de recursos, no equilíbrio da carga de trabalho dos operadores, dentre outros fatores.

Comparado ao grande número de trabalhos desenvolvidos visando o balanceamento e otimização de linhas de montagem e sistemas produtivos, poucos são os estudos a respeito do rebalanceamento das linhas, ou seja, da melhora do balanceamento de linhas já instaladas e operantes (SIKORA *et al.*, 2017). De modo ainda mais específico, mais escassos são os estudos existentes para o rebalanceamento de uma linha de montagem operando em *modo degradado*, conforme apresentado *a posteriori* na seção 2.8. Comumente, quando há paralisação de uma tarefa e/ou posto de trabalho na linha de montagem, toda a linha tende a ficar paralisada até que o problema seja solucionado ou, em outros casos, as tarefas são puramente realocadas em outras estações de trabalho que tenham condições de executá-las, de modo a manter a linha de produção operando, não havendo preocupação com o tempo de ciclo e a existência de estações gargalo. Um estudo inicial à respeito deste tema específico, rebalanceamento de linhas de montagem operando em modo degradado, pode ser assimilado no artigo publicado por Cavalli *et al.* (2019).

Tendo por base a observação da carência de estudos nesse nicho dentro da otimização de sistemas e balanceamento de linhas de montagem, e da percepção dos elevados custos para rebalancear e reprojeter os *layouts* das linhas de montagem e produção (BOYSEN *et al.*, 2008), realiza-se a presente dissertação. Desenvolve-se uma abordagem de solução que viabiliza a análise de falha em um número genérico de estações que fazem parte de uma linha produtiva, contudo, no caso prático estudado, limitou-se a avaliação numérica de falha em até 2 estações de modo simultâneo. Ressalta-se que resultados preliminares da pesquisa foram publicados em (CAVALLI *et al.*, 2019), evidenciando a relevância do tema de estudo.

## 1.5 ESTRUTURAÇÃO

No presente capítulo apresenta-se a contextualização do tema, a caracterização do problema, os objetivos da dissertação, a justificativa para a elaboração deste trabalho e a maneira como o mesmo está estruturado. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica. No Capítulo 3, a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos e, por fim, no Capítulo 5 as considerações finais e discussões de futuros desenvolvimentos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre a qual esta dissertação está pautada, enfatizando-se questões estruturais (*layouts*) e estratégias de solução para problemas de (re)balanceamento de linhas de montagem. Esta apresentação se dará a partir dos seguintes tópicos: Arranjo Físico de Processos Produtivos; Linhas de Montagem; Balanceamento de Linhas; Tempos de Montagem; Diagramas de Precedência; Programação Linear (e suas vertentes) aplicadas ao problema em análise; Rebalanceamento de Linhas de Montagem; e, por fim, Modo Degradado de Produção, uma condição que enseja ações de rebalanceamento na linha.

### 2.1 ARRANJO FÍSICO

A maneira como são alocados fisicamente os recursos de transformação, ou seja, equipamentos, máquinas, pessoal e instalações de produção, é o que denomina-se arranjo físico de produção (SLACK *et al.*, 2009). Segundo os autores, é o arranjo físico que determina a maneira como as operações irão ocorrer e fluir nos recursos transformados (materiais, informações e clientes). Segundo os mesmos autores, é possível dividir o arranjo físico em quatro grupos:

1. Arranjo físico posicional;
2. Arranjo físico por processo;
3. Arranjo físico celular;
4. Arranjo físico por produto.

O primeiro grupo é caracterizado pelo fato de os recursos de transformação (equipamentos e operários) se deslocarem até os recursos a serem transformados (materiais, informações e consumidores) para, então, realizar o processamento dos recursos transformados. Como exemplo deste grupo, pode-se citar a construção de grandes navios e embarcações, no qual o produto possui dimensões e características que dificultam a movimentação do mesmo de um posto de trabalho para outro.

Em relação ao segundo grupo, as necessidades, funções e características dos recursos transformadores (*e.g.*, máquinas) constituem a disposição final do arranjo físico em questão,

o qual apresenta, como qualidade, a flexibilidade, conseguindo atender as demandas menos previsíveis e mais diversas.

No terceiro grupo, arranjo físico celular, os produtos são selecionados previamente e deslocados até uma célula de trabalho equipada com todos os recursos de transformação necessários para atender as necessidades imediatas e específicas deste produto ou desta gama de produtos similares, também conhecida como família de produtos (SLACK *et al.*, 2009).

O quarto grupo, arranjo físico por produto, pode ser entendido como aquele no qual os recursos de transformação são dispostos em sequência de maneira a atender a ordem de montagem dos recursos transformados. Como características deste modelo pode-se citar a elevada produtividade, porém, em contrapartida, baixa flexibilidade (PEINADO; GRAEML, 2007). Exemplificando este grupo, estão as linhas de produção e montagem encontradas em grande parte das indústrias e ambientes fabris com necessidade de elevada produtividade. Contudo, apesar da intrínseca baixa flexibilidade do referido arranjo produtivo, a tendência atual das linhas de produção é tentar incorporar elementos que tragam maior flexibilidade, dadas as necessidades de “customização em massa” observadas em muitos produtos, fato que eleva as dificuldades relativas ao gerenciamento da operação do referido arranjo produtivo (GAITHER; FRAZIER, 2002), conforme detalhado na Seção 2.2 a seguir.

## 2.2 LINHAS DE MONTAGEM

Linhas de montagem podem ser definidas como sistemas de produção compostos por estações de trabalho dispostas em série, através das quais os produtos são movidos de estação para estação, sendo que, em cada estação, determinadas tarefas são realizadas e o somatório dos tempos de execução de todas as tarefas nas estações resulta no tempo de ciclo da linha (BECKER; SCHOLL, 2006).

Por se tratarem de um arranjo físico por produto, as linhas de montagem possuem algumas vantagens (SLACK *et al.*, 2009):

- Para grandes volumes de produção, apresentam baixo custo unitário;
- Permitem a utilização de equipamentos específicos, de elevada customização e rendimento, devido à particularização das estações de trabalho;
- Permitem um maior controle de produtividade em função do gerenciamento das movimentações de materiais.

Como desvantagens, pode-se citar (SLACK *et al.*, 2009):

- Baixa flexibilidade para trabalhar com *mix* de produtos muito divergentes;
- Pouco robusta à interrupções inesperadas na linha;
- Devido à particularização das estações de trabalho, os operadores podem possuir funções monótonas e repetitivas.

Utilizando a abordagem simplificada de tipos de organização de trabalho, três tipos de linhas de montagem podem ser definidos (FERNANDES; DALALIO, 2000):

1. Linhas de montagem com trabalho individual;
2. Linhas de montagem operadas por equipes de trabalho;
3. Linhas de montagem operadas por grupos auto gerenciados.

O primeiro tipo de linha de montagem é caracterizado pela existência de um posto de trabalho em cada estação de trabalho e, adicionalmente, um trabalhador para cada estação de trabalho. Esta pode, ainda, ser subdividida em duas subclasses: linhas de montagem com trabalho individual com rotação de trabalho, na qual os trabalhadores possuem uma rotatividade entre os postos de trabalho para evitar monotonia e repetitividade das funções; e linhas de montagem com trabalho individual sem rotação de trabalho, na qual cada trabalhador é fixo em um mesmo posto de trabalho.

O segundo grupo é definido como aquele no qual a linha de montagem é subdividida em sublinhas, cada uma contendo um número de estações de trabalho operadas por uma equipe de trabalhadores determinada; o número de trabalhadores tende a ser o mesmo do número de estações de trabalho. Complementarmente, este modelo pode ser dividido em dois sub-casos: cada tarefa é previamente delegada a uma sublinha; algumas tarefas são pré-atribuídas a uma sublinha. Neste modelo há uma rotação de trabalho entre os trabalhadores.

Na terceira e última classificação, linhas de montagem operadas por grupos auto gerenciados, as estações de trabalho são definidas *a priori*. Posteriormente, são atribuídas tarefas às estações de trabalho definidas. Cada estação é operada por um grupo de trabalho que definirá autonomamente, *a posteriori*, os postos de trabalho que deverão estar presentes.

Além desta classificação, uma segunda classificação define seis vertentes de estudo de linhas de montagem (SAIF *et al.*, 2014): (i) abordagem, (ii) *layout*, (iii) variedade de produto, (iv) fluxo, (v) função objetivo (função de avaliação), (vi) tempo de execução das tarefas.

Segundo Saif *et al.* (2014), há quatro tipos de *layout*: linhas em série, linhas em paralelo, em forma U e linhas *two-sided*. No primeiro caso, a estação de trabalho que determina o tempo de ciclo é a estação gargalo, sendo que os produtos percorrem as estações, dispostas em série, sucessivamente. Quando é desejável dividir a demanda entre as estações de trabalho, as estações em paralelo são as mais recomendadas. Normalmente empregadas em tarefas e operações que requerem mais tempo, objetivando reduzir o tempo de ciclo da linha principal. O terceiro, linhas em U, possui como característica a permissibilidade no reaproveitamento das estações de trabalho para a realização de outras tarefas ou revisar as tarefas já realizadas. O último *layout*, *two-sided*, é utilizado no processamento de produtos de grande porte, quando é necessário/possível alocar mais de um trabalhador nas estações de trabalho, simultaneamente, comumente distribuídos um em cada “lado” do produto.

Segundo a variedade de produtos, as linhas de montagem podem ser classificadas em três grupos (BECKER; SCHOLL, 2006): linhas de modelo único, na qual um único produto é produzido na linha, de modo que as tarefas não se alteram ao longo da produção. Linhas de modelo misto, na qual mais de um produto pode ser produzido simultaneamente. Isso demanda que a linha sofra (pequenas) alterações durante o processo em si, sendo que estas alterações e variações estão incluídas no processo como tarefas específicas de cada modelo. Linhas multi-modelo, na qual diversos produtos podem ser produzidos na mesma linha de montagem, porém, diferentemente das linhas de modelo misto, as linhas multi-modelo devem ser rebalanceadas para aceitar o novo lote, ou então, tempos de preparação (*setup*) significativos ocorrem na mudança de lotes.

Quando se trata de fluxo de linha, o mesmo pode ser dividido em dois grupos (SAIF *et al.*, 2014): linhas de passo contínuo e não contínuo. No primeiro, o produto se move de modo contínuo, ininterrupto, normalmente com o auxílio de um transportador (*conveyor*). Os operadores se deslocam ao longo de suas respectivas estações de trabalho de modo a acompanhar o fluxo do produto em movimento e executar suas atividades. Para as linhas de passo não contínuo, o produto é transferido de uma estação para outra apenas quando todas as tarefas que deveriam ter sido realizadas na estação predecessora já estiverem concluídas, e a estação seguinte está apta para receber o produto. Ainda tratando das linhas de passo não contínuo, é possível encontrar

duas variantes: linhas de passo não contínuo sincronizado e não sincronizado. Basicamente, a diferença entre elas está pautada no “tempo de ciclo” de cada estação. Para o passo sincronizado o avanço do produto ocorre de maneira simultânea para todas as estações; para o passo não sincronizado, o avanço ocorre em tempos de ciclo diferentes, assim que a tarefa é finalizada na estação e pode ser deslocada para a próxima estação, pois há uma diferença no tempo de execução das tarefas em cada posto de trabalho. Buscando amenizar as diferenças de tempo existente entre as estações subjacentes, diferença essa denominada de desbalanceamento, uma possível solução é inserir *buffers* intermediários entre as estações, os quais atuam como estoques temporários disponíveis entre os postos de trabalho (DONNINI *et al.*, 2010).

### 2.2.1 Índice de Suavidade na Linha de Montagem

O índice de suavidade pode ser definido como a variação entre os tempos de trabalho nos postos e o tempo total máximo obtido entre as estações, o que permite verificar se o balanceamento realizado foi satisfatório em relação à distribuição das tarefas nos postos de trabalho (GERHARDT *et al.*, 2007).

O índice de suavidade pode ser determinado pela equação 1.

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

Em que:

- $S_{max}$  - maior tempo total de operação entre as estações (tempo de ciclo), em unidades de tempo [u.t.];
- $j$  - índice que identifica a estação de trabalho;
- $S_j$  - definido como o tempo total de trabalho da estação  $j$  [u.t.];
- $K$  - representa o número total de estações de trabalho.

Para linhas de montagem de modelo misto, é introduzido o conceito de índice de suavidade horizontal (MERENGO *et al.*, 2010), o qual avalia a diferença de tempo que as

estações de trabalho apresentam quando produzem modelos diferentes de produtos, e pode ser calculado pela equação 2.

$$\text{Índice de Suavidade Horizontal} = \sum_{j=1}^K \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^m (S_{jk} - \sum_{w=1}^m S_{jw} \cdot a_w)^2}}{\sum_{k=1}^m S_{jk} \cdot a_k} \quad (2)$$

Em que:

- $S_{jk}$  - tempo total da estação  $j$  para o modelo  $k$ ;
- $k$  e  $w$  - representam os modelos em produção;
- $m$  - representa o número de modelos produzidos;
- $a_k$  e  $a_w$  - indicam a demanda parcial do modelo  $k$  e  $w$ , respectivamente.

Deste modo, os índices de suavidade mencionados são de grande valia para avaliar a “homogeneidade” das distribuições de tempo entre as diferentes estações de trabalho de uma linha, ou seja, são indicadores importantes para analisar o balanceamento de linhas, fato discutido na subseção 2.3 a seguir.

### 2.3 BALANCEAMENTO DE LINHA

Balancar linhas de montagem ou produção consiste em atribuir conjuntos de tarefas a estações de trabalho específicas, objetivando aumentar a produtividade da linha de montagem e reduzir o custo e tempo de produção (DOLGUI; PROTH, 2013). Ademais, a montagem de um produto exige que algumas atividades sejam processadas sendo que a alocação destas, nos postos de trabalho, deve ser realizada de forma a respeitar as restrições de precedência entre atividades e minimizar o tempo ocioso de produção. Assim sendo, o fluxo de produção de um ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) deve ser organizado de maneira que a carga de trabalho seja a mesma entre os operadores ou máquinas, tendo, como resultado, a eliminação dos gargalos de produção nas linhas de montagem.

Os objetivos mais comuns para os problemas de balanceamento de linhas de montagem podem ser divididos em dois tipos (EREL; SARIN, 1998): 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: (i) minimizar a quantidade de estações de trabalho, conhecendo-se o tempo de ciclo; ou, (ii) minimizar o tempo de ciclo, conhecendo-se o número de estações de trabalho.

Considerando-se a natureza dos tempos de operação, duas vertentes são majoritariamente observadas: a consideração dos tempos de produção como determinísticos ou estocásticos. O primeiro caso, determinístico, estabelece que os tempos de execução de cada tarefa sejam constantes, restando, como objetivo, a realocação das tarefas nos postos de trabalho de modo ordenado, respeitando as relações de precedência e otimizando o desempenho da linha em questão (EREL; SARIN, 1998). Para um modelo com considerações de tempo estocásticas, o uso de distribuições de probabilidade para representar tempos de tarefas é recorrente (EREL; SARIN, 1998).

De maneira complementar, é possível classificar os problemas de balanceamento de linhas de montagem em quatro segmentos (FERNANDES *et al.*, 2008), de acordo com a abordagem empregada (tempos determinísticos ou estocásticos):

1. SMD (*Single-Model Deterministic*) - um único modelo com tempos determinísticos de tarefas;
2. SMS (*Single-Model Stochastic*) - um único modelo com tempos estocásticos de tarefa;
3. MMD (*Multi-Model Deterministic*) - múltiplos modelos com tempos determinísticos de tarefas;
4. MMS (*Multi-Model Stochastic*) - múltiplos modelos com tempos estocásticos de tarefas.

Levando em consideração as simplificações empregadas aos modelos matemáticos para solução dos problemas de balanceamento de linhas, duas classificações relevantes são apresentadas (FERNANDES *et al.*, 2008):

1. SALBP - Problemas de balanceamento de linhas de montagem simples (*Simple Assembly Line Balancing Problem*), no qual o termo “simples” indica que uma série de hipóteses simplificadoras é inserida e admitida, as quais discutir-se-ão *a posteriori*. As simplificações em questão tornam, na grande maioria dos casos, o SALBP um problema de contexto teórico, sem a devida conexão com as condições práticas de balanceamento;

2. GALBP - Problemas de balanceamento de linhas de montagem generalizados (*Generalized Assembly Line Balancing Problem*), em que podem ser encontrados balanceamentos de linha que objetivam solucionar problemas com características adicionais, tais como: possibilidade de seleção de processos ou equipamentos; linhas com diferentes *layouts*; limitação de recursos; tempos de tarefas estocásticos; entre outros. A adição destas características complementares tendem a aproximar os problemas do tipo GALBP com a realidade operacional presente nos contextos práticos de balanceamento de linhas.

Outros autores definem que o conceito de balanceamento de linha pode ser dividido em duas partes (BECKER; SCHOLL, 2006): *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP), caracterizado como a versão mais simples de um problema de balanceamento de linhas de montagem, e *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* (MALBP), tema que versa sobre linhas nas quais são encontrados diferentes modelos de produtos compartilhando a linha produtiva. Esta classificação é mais utilizada em linhas de montagem “mais modernas”, nas quais a demanda é caracterizada pela elevada versatilidade e distribuição entre os volumes de cada um dos modelos, ou seja, do *mix* de produção (BUKCHIN; RABINOWITCH, 2006). Um MALBP possui um grau de complexidade maior em relação à abordagem da solução, quando comparado a um modelo SALBP, em função da inserção de considerações adicionais, originadas nas interações dos diferentes modelos montados e produzidos.

A organização e reestruturação de uma linha produtiva, visando a otimização do número de postos de trabalho necessários a fim de atingir o índice de produção desejado, melhor define o balanceamento de linha (KRAJEWSKI *et al.*, 2009). Partindo desta consideração, outra definição bastante relevante pode ser elencada para problemas do tipo SALBP. Em um contexto SALBP, os tempos das estações podem ser inferiores ao tempo de ciclo, resultando em tempo ocioso na estação até que o tempo de ciclo seja atingido (BOYSEN *et al.*, 2007). Com isso, o balanceamento de linhas de montagem simples pode ser classificado em quatro tipos:

- 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 predeterminados, objetiva-se encontrar um equilíbrio viável (factível) para a linha.

Essas quatro classificações são baseadas nas seguintes hipótese simplificadoras e restritivas, as quais são utilizadas para simplificar problemas reais (BOYSEN *et al.*, 2007):

1. Produção em massa de um produto homogêneo;
2. Linhas de montagem com tempo de ciclo sincronizado entre todas as estações de trabalho;
3. Sequência de processamento das tarefas sujeita a restrições de precedência;
4. Todas as tarefas são realizadas de um modo determinado;
5. *Layout* tipo série, ou seja, sem linhas de alimentação ou elementos paralelos;
6. Tempos de tarefas determinísticos;
7. Sem restrição de atribuição de tarefa, além das restrições de precedência;
8. A execução de uma tarefa deve ser feita integralmente dentro de uma estação de trabalho, ou seja, não pode ser dividida em duas ou mais estações;
9. Todas as estações são igualmente equipadas.

Com base nas definições apresentadas nesta seção, verifica-se que o balanceamento das linhas de montagem é voltado a minimizar o tempo ocioso presente nas estações de trabalho, o qual é oriundo de uma distribuição desigual e desproporcional das tarefas nos postos. A minimização desta ociosidade tende a homogeneizar a distribuição de tarefas nos postos de trabalho, assim como a distribuição de operadores nas estações, maximizando o fluxo produtivo e reduzindo drasticamente, por consequência, os estoques (DESSOUKI *et al.*, 1995). Deste modo, se faz importante entender detalhes relativos aos tempos envolvidos na execução das tarefas (subseção 2.4 a seguir) pois diretamente afetam as condições de balanceamento.

## 2.4 TEMPO DE CICLO E TEMPO *TAKT*

Em uma linha de montagem, os operadores realizam um conjunto de atividades<sup>1</sup> para montar um produto ou peça, e a duração dessas operações, em cada estação de trabalho, pode

<sup>1</sup> Ao longo da dissertação utilizam-se os termos atividades, operações e tarefas com sentido correlato.

influenciar o tempo de ciclo (CT - *Cycle Time*) da linha. O tempo de ciclo da estação mais lenta é equivalente à taxa de produção média da linha, ou seja, a produtividade é afetada pela estação gargalo, ou estação com maior tempo de ciclo (GORI, 2012; LEE-MORTIMER, 2006). Deste modo, o intervalo de tempo necessário para se observar a saída da linha de produtos subsequentes finalizados indica o tempo de ciclo. Baseando-se no tempo de ciclo desejado para o sistema produtivo, é possível determinar a quantidade de estações de trabalho inescusáveis para a montagem de um produto na linha, a partir da equação 3 (PEINADO; GRAEML, 2007).

$$N^{\circ} \text{ de estações de trabalho} = \frac{\sum \text{Tempos individuais das operações}}{\text{Tempo de Ciclo}} \quad (3)$$

Um segundo conceito bastante relevante no âmbito dos tempos de produção, é o de *Takt Time*. Este termo, ou tempo *takt*, pode ser entendido como a taxa na qual uma unidade fabril precisa produzir determinado produto para atender a demanda existente (TAPPING *et al.*, 2002).

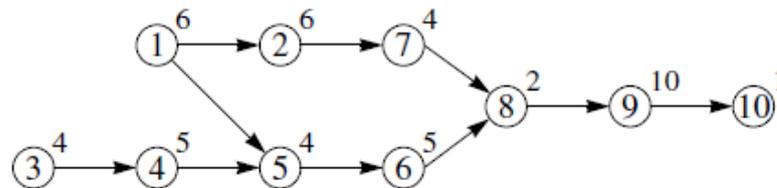
Ambos os conceitos apresentados, Tempo de Ciclo e *Takt Time*, não devem ser entendidos de maneira isolada, pelo contrário, há um encadeamento bastante significativo entre eles quando se trata de balanceamento de linhas de montagem. Em um sistema produtivo, se o CT for menor ou igual ao tempo *takt*, então, a linha tem capacidade produtiva para atender à demanda existente; caso contrário, é necessário reduzir o CT para que a linha consiga atender à demanda. Esta redução se faz necessária pois a unidade fabril possui uma demanda porém, a linha de produção desta unidade possui uma produção inferior à demandada (CT maior do que o *Takt Time*). Nesta condição, uma das alternativas viáveis para solucionar a carência de produção é o balanceamento da linha, buscando minimizar o tempo de ciclo. Há também, por exemplo, cenários em que se projetam crescimentos de demanda, com posterior redução do tempo *takt* e necessidade de diminuição do CT praticado. Contudo, na proposta de (novas) soluções de balanceamento de linhas, é fundamental o respeito às condições operacionais do processo produtivo, sintetizadas em um diagrama de precedências, conforme subseção 2.5 a seguir.

## 2.5 DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS

A execução das tarefas nas linhas de montagem requerem um tempo para sua realização. Além disso, demandam determinados equipamentos e habilidades dos operadores para realizar as operações. Estes aspectos, atrelados às condições organizacionais e aspectos tecnológicos,

resultam em restrições entre as tarefas a serem executadas (BECKER; SCHOLL, 2006), as quais definem as relações de precedências entre as tarefas na linha de montagem estudada (SAMOUEI; ASHAYERI, 2019). O diagrama pode ser melhor entendido e visualizado com o exemplo apresentado na Figura 2.

**Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Precedências**



**Fonte: Becker e Scholl (2006).**

O diagrama de precedências contém um nó para cada tarefa e cada um dos nós possui um tempo de execução das operações e são interligados por arcos, os quais determinam as relações de precedência (BECKER; SCHOLL, 2006). Na Figura 2 é possível observar um diagrama contendo 10 tarefas e tempos de tarefas entre 1 e 10 unidades de tempo. Tomando a mesma figura como exemplo, para realizar a tarefa 8, é necessário que as tarefas 7 e 6 já tenham sido realizadas e finalizadas (relação direta de precedência), e que as tarefas 1, 2, 3, 4 e 5 também já tenham sido realizadas (relação indireta de precedências). Analisando a sucessão das tarefas, para a execução da tarefa 9, a tarefa 8 deve ter sido finalizada e, conseqüentemente, as demais tarefas citadas anteriormente. Os diagramas de precedência permitem uma melhor visualização das atividades que devem ser realizadas, bem como as restrições existentes às relações de precedência e a alocação das tarefas nas estações de trabalho da linha de montagem em estudo (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004).

Thomopoulos foi um dos primeiros pesquisadores a apresentar estudos que formalizavam o uso dos diagramas de precedências para a análise do balanceamento de linhas de montagem de modelo misto (THOMOPOULOS, 1967). Para tanto, o autor adequou técnicas de balanceamento de linhas de modelo simples para priorizar a solução de um “modelo equivalente”, orientado por um diagrama de precedências equivalente para todos os modelos tratados. Este diagrama é construído a fim de obter todas as tarefas de todos os modelos dos produtos envolvidos, mesmo que os modelos não tenham nenhuma tarefa sendo executada nas estações. Quando isso ocorre, pode ser atribuída uma tarefa com tempo de execução de 0 u.t. na estação em questão. Desta forma, é possível tratar uma linha de modelo misto como uma linha de modelo simples, por meio de considerações de diagramas de precedência e tempos de ciclo equivalentes. Porém,

esta abordagem baseada no diagrama de precedências equivalente é mais adequada quando as diferenças entre os modelos não são estruturantes (SIKORA *et al.*, 2017), ou seja, não sejam diferenças necessárias para organizar e ordenar a linha produtiva.

A partir do conhecimento dos principais parâmetros envolvidos na análise da linha produtiva (*e.g.*, tempo *takt*, número de estações mínimo/desejado, tempo de ciclo desejado, diagrama de precedências e durações de tarefas), a ideia é aplicar uma técnica de solução para a obtenção de soluções (otimizadas) de balanceamento. Na presente pesquisa, a Programação Linear (Inteira), é utilizada como técnica de solução para a obtenção de soluções de balanceamento, técnica esta mencionada na sequência, seção 2.6.

## 2.6 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Modelos são maneiras encontradas para representar, de maneira simplificada, a realidade, seguindo determinadas situações, enfoques e equidade adequadas (GOLDBARG; LUNA, 2005). Os resultados obtidos por meio dos modelos geram conclusões e discussões que possuem relação com a realidade, devido às similaridades existentes entre a realidade e o modelo. Uma das técnicas de Programação Matemática, para a representação dos modelos desenvolvidos, é a Programação Linear (PL). Os modelos matemáticos desenvolvidos em PL possuem algumas características, tais como: as variáveis são contínuas, as restrições e a função objetivo apresentam comportamento linear (GOLDBARG; LUNA, 2005). Estas características apresentadas constituem os três conjuntos principais de elementos presentes nos modelos matemáticos em Programação Linear, e são definidos como (WILLIAMS, 2013):

- Variáveis: incógnitas a serem determinadas por meio da solução do modelo proposto;
- Restrições: condições que limitam os valores viáveis das variáveis, de maneira a incorporar as limitações físicas do problema em análise;
- Função objetivo: geralmente consideradas como funções de “maximização” ou “minimização”, esta função matemática define a adequação da solução obtida, considerando as variáveis de decisão empregadas.

Além dos elementos apresentados acima, a Programação Linear é governada por hipóteses limitadoras (PUCCINI, 1977), entre elas:

- **Divisibilidade:** As soluções encontradas para as variáveis do modelo podem assumir valores fracionários. Caso esta condição não seja satisfeita, o problema passa a ser considerado como um problema de Programação Inteira (PI), ou seja, as soluções admitidas para as variáveis só podem assumir valores inteiros;
- **Proporcionalidade:** Os recursos e retornos implementados no modelo variam proporcionalmente com o valor da variável do modelo. Com isso, não há “economia de escala”;
- **Aditividade:** Os efeitos individuais de duas variáveis quaisquer, quando somados, resultam no efeito total das duas variáveis. Ou seja, não há efeito de substituição e sinergia;
- **Certeza (Determinístico):** Todos os parâmetros declarados são valores conhecidos e constantes (abordagem determinística), e não variáveis aleatórias (abordagem estocástica).

As hipóteses de Proporcionalidade e Aditividade garantem a linearidade das restrições e da função objetivo. Há casos em que se faz necessário desenvolver um modelo sem considerar as hipóteses apresentadas como verdadeiras, como, por exemplo, os casos em que as variáveis devem assumir valores inteiros. Para tanto, uma alternativa viável é a modelagem considerando uma abordagem que oferece mais flexibilidade de representação, tal como a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), discutida na subseção 2.6.2. Contudo, a base de modelagem estabelecida em PL, brevemente apresentada na subseção 2.6.1, é de fundamental importância também para a criação de modelos em PLIM.

### 2.6.1 Formulação para Programação Linear

A Programação Linear, como previamente mencionado, é uma das mais importantes e amplamente utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional, para problemas que envolvem tomada de decisão. Isso ocorre porque a PL permite a solução de problemas tanto em modelos simples como em problemas mais complexos, não somente na área de balanceamento e otimização de sistemas produtivos, mas também, em diversos setores da economia, logística, setores de saúde, alimentício, dentre outros. Métodos para resolução destes problemas de Programação Linear vem sendo estudados por várias décadas tendo por base as contribuições seminais de George B. Dantzig (BALAS *et al.*, 2008).

Utilizando como base os três conjuntos de elementos presentes nos modelos matemáticos para Programação Linear, previamente mencionados, é possível apresentar a formulação

para os problemas de PL por meio das expressões 4, 5 e 6 (BARBOZA, 2005).

$$\text{minimize (ou maximize)} \quad z = \sum_{j \in N} c_j \cdot x_j \quad (4)$$

$$\text{sujeito a (s.a):} \quad \sum_{j \in N} a_{ij} \cdot x_j (\leq, = \text{ ou } \geq) b_i \quad \forall i \in M \quad (5)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (6)$$

Em que,  $x_j$  são variáveis não negativas e  $c_j$ ,  $a_{ij}$  e  $b_i$  são constantes conhecidas para todo  $i$  e  $j$ , sendo que os conjuntos  $N$  e  $M$  são definidos como:

$$N = \{1, \dots, n\} \quad \text{e} \quad M = \{1, \dots, m\}. \quad (7)$$

Ressalta-se que as restrições podem ser caracterizadas por inequações ( $\leq$ ,  $\geq$ ) ou equações ( $=$ ), a depender da natureza do contexto em análise.

### 2.6.2 Programação Linear Inteira Mista

Diversos são os problemas de programação da produção que podem ser resolvidos e enquadrados como modelos de Programação Linear Inteira Mista. Estes modelos envolvem variáveis contínuas e discretas que devem satisfazer as condições e restrições de linearidade, igualdade e desigualdade dos modelos (BARBOZA, 2005). Por se tratarem de problemas de natureza combinatória, estes modelos se tornam de difícil solução. Uma primeira abordagem para estes problemas combinatórios seria obter a solução com o maior valor de função objetivo (funções objetivo de maximização), ou de menor valor para a função objetivo (funções objetivo de minimização), por meio da solução de todas as combinações de variáveis inteiras. Esta abordagem se torna complicada e inviável computacionalmente pois o número de combinações cresce exponencialmente com o número de variáveis inteiras (ou binárias). Ou seja, problemas práticos com um número elevado de variáveis inteiras tendem a tornar-se computacionalmente inviáveis (WILLIAMS, 2013).

Uma segunda abordagem para os problemas de Programação Linear Inteira Mista seria a relaxação das restrições de integralidade e abordar as variáveis inteiras como variáveis contínuas. Porém, tratar as variáveis como contínuas e relaxar as restrições não garante que a solução encontrada seja uma solução com valores inteiros para as variáveis discretas (BARBOZA, 2005)

pois, o arredondamento das variáveis contínuas encontradas não conduz, geralmente, ao resultado correto. Para tanto, é aconselhável aplicar os procedimentos de busca, normalmente de busca em árvores (*e.g.*, *branch-and-bound*), para obter um conjunto solução ótimo de variáveis inteiras (WILLIAMS, 2013).

Considerando um contexto de minimização da função objetivo, uma formulação para modelos de PLIM pode ser escrita conforme as expressões 8 a 11 (MAGATÃO, 2005):

$$\min \sum_{j \in J} c_j \cdot x_j + \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \quad (8)$$

$$\text{sujeito a (s.a.) : } \sum_{j \in J} a_{kj} \cdot x_j + \sum_{i \in I} a_{ki} \cdot y_i \{\rho\} b_k \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$y_i \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall i \in I \quad (11)$$

Onde  $x_j$  representa as variáveis de decisão contínuas não negativas;  $y_i$  representa as variáveis de decisão inteiras não negativas, ou seja, pertencentes a  $\mathbb{Z}_+$ ;  $c_i$  e  $c_j$  representam os coeficientes de custo;  $a_{kj}$  representa os coeficientes das restrições das variáveis contínuas;  $a_{ki}$  representa os coeficientes das restrições das variáveis inteiras;  $b_k$  representa as restrições de recursos (parâmetros das restrições);  $J$  representa o conjunto de variáveis contínuas;  $I$  representa o conjunto das variáveis inteiras;  $K$  representa o conjunto de restrições, e  $\rho$  representa as relações matemáticas ( $\leq$ ,  $\geq$ ,  $=$ ).

O desenvolvimento de modelos em PLIM possui uma ampla aplicabilidade, viabilizando a modelagem de, por exemplo, condições lógicas, disjunções e conjunções. Esta flexibilidade possibilita a criação de modelos representativos de cenários mais práticos e próximos da realidade (MAGATÃO, 2005). Com a evolução tecnológica, os recentes avanços de *hardware* computacional, aliados à evolução dos métodos de resolução de PLIM, os quais são acoplados a *solvers*, tem se mostrado viável a solução de modelos na referida técnica com número relativamente elevado de variáveis e restrições (*e.g.*, de centenas a milhares), em tempos computacionais não proibitivos (*ex.*, segundos a poucos minutos). Com isso, torna-se promissor o uso e desenvolvimento de modelos matemáticos em PLIM, os quais podem, ainda, provar a otimalidade da resposta obtida (WILLIAMS, 2013).

De modo complementar, ressalta-se que há diversos trabalhos relativamente recentes na literatura que utilizaram em sua base modelos PLIM como estratégia de solução de problemas de balanceamento de linhas produtivas, *e.g.*: Sikora *et al.* (2017), Lopes *et al.* (2017), Michels *et al.* (2018), Lopes *et al.* (2019), Michels *et al.* (2019), Lopes *et al.* (2020), Michels *et al.* (2020). Este fato indica a provável viabilidade de uso da referida técnica para o problema em análise, conforme detalhado na seção 2.7 a seguir.

### 2.6.3 Programação por Metas Lexicográficas

Os problemas de Programação Linear (*PL*) são entendidos, mais comumente, como formulações nas quais a solução procurada está atrelada a um único critério, ou seja, a uma única função objetivo sujeita a diversas restrições, as quais não podem ser violadas. Porém, cotidianamente, problemas que requerem a resolução de vários critérios distintos, são encontrados. Neste caso, se faz necessária a implementação de modelos matemáticos “com mais de uma função objetivo” (GOMES, 2004), ou seja, problemas com natureza multiobjetivo.

A programação por metas lexicográficas surgiu como uma proposta de solução de problemas de otimização multiobjetivo (FERNANDES, 2015). Neste método, os diferentes critérios são organizados de maneira hierárquica do “mais importante” até o “menos importante”. Atrelados a estes critérios estão algumas restrições específicas. Estas restrições podem ser comuns aos critérios, como podem ser distintas. Tratando da execução do modelo, inicialmente é utilizada a formulação matemática (função objetivo e restrições) para o critério com nível hierárquico mais alto, seguido do segundo na lista de hierarquias, e assim sucessivamente. Porém, os resultados obtidos nas primeiras execuções podem vir a se tornar restrições para as execuções consequentes. Desta maneira, o modelo matemático é executado tantas vezes quantas forem os critérios presentes, até que se encontre a solução que respeite as metas dos níveis anteriores (FERNANDES, 2015).

Conforme será detalhado *a posteriori* no Capítulo 3, na presente dissertação os critérios observados são complementares e definiu-se a execução em fases. Os resultados obtidos pela execução da primeira fase do modelo matemático são tratados como restrições para a segunda fase de execução. Uma discussão mais aprofundada sobre a execução do modelo implementado ocorre na Seção 3.3. De todo o modo, ressalta-se que uma organização em metas lexicográficas é observada no presente trabalho.

## 2.7 REBALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Muitos têm sido os estudos realizados visando a otimização dos sistemas produtivos e a melhora dos processos industriais. Em particular, o balanceamento de linhas é um assunto recorrente dentre estes estudos. Pode-se citar os trabalhos de balanceamento em linhas de montagem robotizadas de veículos (LOPES *et al.*, 2017; MICHELS *et al.*, 2018), trabalhos com novas concepções para balanceamento de linhas (DOLGUI; GAFAROV, 2017) e com restrições industriais complexas (ESSAFI *et al.*, 2010). Além dos problemas de balanceamento de linhas, há os problemas de sequenciamento e dimensionamento de produção (OLIVEIRA; SANTOS, 2018) e alocação de *buffers* (DONNINI *et al.*, 2010; LOPES *et al.*, 2019). Em contrapartida, os estudos realizados visando o rebalanceamento de linhas de montagem são mais escassos, conforme detalhado por Sikora (2017) e Cavalli *et al.* (2019). A intensa necessidade para o rebalanceamento de linhas de montagem originou um novo ramo de pesquisa dentro do balanceamento de linhas de montagem: *Assembly Line Rebalancing Problem - ALRP* ou, Problemas de Rebalanceamento de Linhas de Montagem.

No melhor conhecimento do autor, o primeiro estudo realizado em ALRP consistiu no rebalanceamento de uma linha de montagem de motocicletas na qual, para determinadas épocas do ano, havia a necessidade de contratar mão-de-obra temporária para suprir a demanda existente. Esta mão-de-obra adicional, muitas vezes, era inexperiente, influenciando grandemente nos tempos de produção da linha, surgindo a necessidade de rebalancear a linha de montagem (COROMINAS *et al.*, 2008). Outros estudos realizados buscando o rebalanceamento se mostraram necessários quando foram implementadas alterações nos produtos, requerendo a adaptação da linha para tanto (GAMBERINI *et al.*, 2009). Mais recentemente, estudos buscando a minimização no número de tarefas a serem realocadas na linha de montagem, quando a mesma passa por rebalanceamento, foram realizados. Além disso, o modelo foi capaz de inferir o custo de abertura de uma nova estação de trabalho, caso necessário (MAKSSOUD *et al.*, 2015).

O trabalho desenvolvido por Sikora (2017) evidencia as dificuldades de se conduzir um processo de rebalanceamento quando várias mudanças são necessárias na linha produtiva. O autor ressalta que há uma tendência de ser oneroso realizar todas as mudanças sugeridas pelo modelo matemático em uma intervenção única na linha, o que poderia causar uma interrupção de muitas horas (dias). Sugere-se a divisão das mudanças em etapas, por exemplo, momentos distintos ao longo de um horizonte dedicado à implementação das mudanças, aproveitando

majoritariamente intervalos em que a linha não estivesse operando.

Em Sancı e Azizoglu (2017) os autores realizam o estudo considerando a necessidade de rebalanceamento a partir de “disrupções” (ou *shutdowns*) nas estações de trabalho, as quais são influenciadas pelo número de tarefas associadas a cada estação. Os autores destacam a dificuldade computacional do problema estudado e também a carência de abordagens de balanceamento que considerem a possibilidade de disrupções das estações ou, num estágio final, que tenham maior estabilidade de solução ante a eventos de falhas.

A presente pesquisa enquadra-se no segmento ALRP, visto que tem, como objetivo, fornecer soluções para a realocação de tarefas quando há ocorrência de falhas nas estações de trabalho. O rebalanceamento aqui apresentado será referenciado, a partir deste, como rebalanceamento de linhas de montagem operado em modo degradado de produção, modo este melhor detalhado na subseção 2.8 a seguir apresentada.

## 2.8 MODO DEGRADADO DE PRODUÇÃO

O modo degradado de produção consiste na manutenção das atividades operacionais da linha de montagem, mesmo com alguma(s) das estações de trabalho impossibilitadas de realizarem suas atividades, seja por uma parada planejada para manutenção ou por interrupções inesperadas como quebras ou falhas de equipamentos, como apresentado no trabalho de Li *et al.* (2021). Os estudos desenvolvidos pelos autores evidenciam a importância das questões de rebalanceamento quando o sistema sofre interrupções inesperadas (*sudden disruptions*).

Esta situação na qual há o impedimento de executar as tarefas nas estações de trabalho que estão inoperantes requer que estas tarefas sejam realocadas para outros postos de trabalho operantes. Este cenário de realocação das tarefas a outras estações de trabalho para manutenção das operações, enquanto as estações em falha passam por manutenções é denominado de *modo degradado de produção* (ROCHA, 2014). Esta realocação deve ser de tal maneira que modifique o mínimo possível a ordenação e execução das tarefas nas estações que receberão as tarefas dos postos em falha, impactando o mínimo possível o tempo de ciclo do sistema produtivo.

Os estudos realizados por Müller *et al.* (2017) avaliaram a influência de falhas nos equipamentos robóticos presentes em uma linha de montagem e a influência na performance global da linha em questão. Os autores sugerem que, por mais que as falhas e paralisações dos equipamentos sejam de curta duração, a falha em uma única estação de trabalho ou equipamento pode refletir, negativamente, no andamento e funcionamento de toda a linha de montagem em

função da conexão que existe entre as estações de trabalho devido aos sistemas de manuseio de material de uma estação para outra. Atrelado a esses fatores, algumas soluções tem sido buscadas de modo a minimizar os efeitos das paralisações e falhas dos equipamentos e estações de trabalho, como a alocação de *buffers* nas linhas e a condição de sistemas de produção com configurações redundantes (MÜLLER *et al.*, 2017), nas quais uma estação de trabalho é capaz de assumir as atividades de uma outra estação que apresentou falha, automaticamente.

Os desenvolvidos apresentados por Cavalli *et al.* (2019) indicam resultados preliminares aos apresentados na presente dissertação. Os autores evidenciam a necessidade de estudos voltados ao rebalanceamento de linhas de montagem quando ocorrem falhas em estações, elemento motivador aos desenvolvimentos apresentados no presente documento. No capítulo 3 a seguir detalha-se a metodologia proposta, a qual tem como base a solução de um modelo matemático em PLIM para obtenção de respostas para otimização do modo degradado de produção. O referido modelo foi obtido a partir da adaptação de um modelo clássico para condições de SALBP-2.

### 3 METODOLOGIA APLICADA

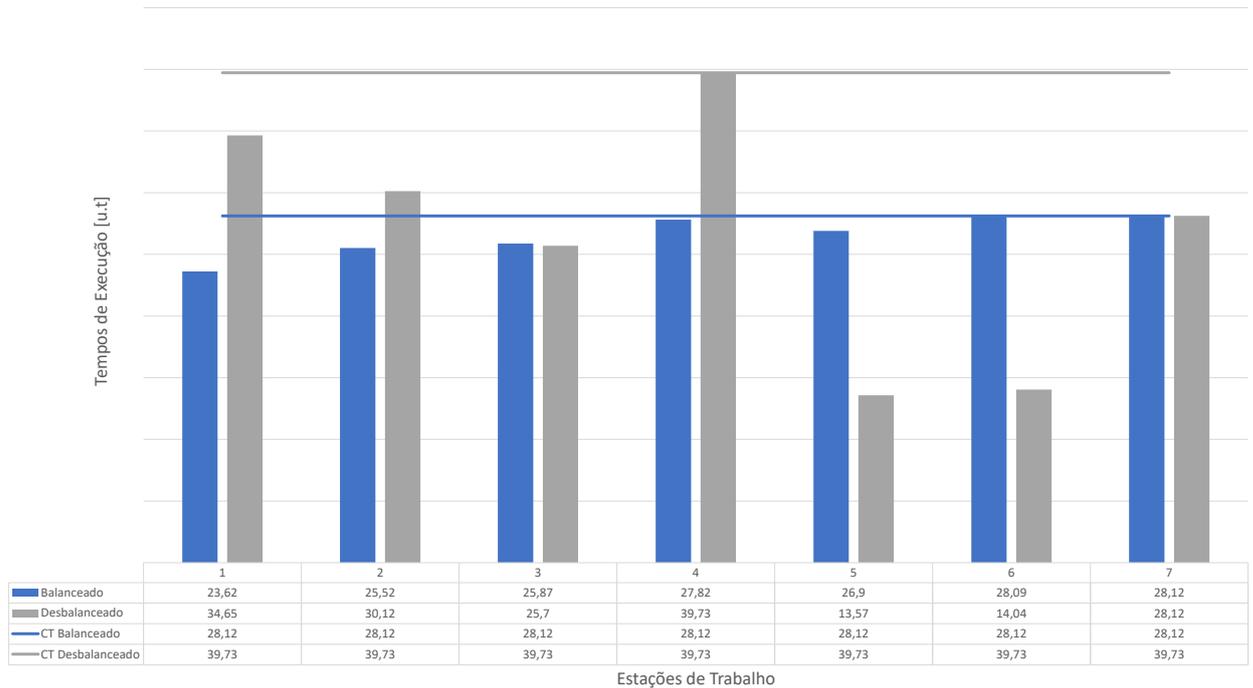
O presente capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia proposta para a elaboração da dissertação. Em síntese, a finalidade desta metodologia é fornecer passos essenciais para o balanceamento de linhas produtivas operando em modo degradado de produção. O desenvolvimento teve por elemento norteador uma linha de montagem de uma empresa na região de Curitiba/PR, a qual possui sete estações de trabalho, das quais duas possuem elevados índices de paralisação. Com base no apresentado na Tabela 1 (Capítulo 1), é possível perceber que os quatro modelos considerados representam a totalidade de ocupação e produção dos produtos enquadrados no segmento A da referida linha. Inseridas nas sete estações de trabalho previamente apresentadas, encontram-se 46 (quarenta e seis) tarefas pelas quais os quatro modelos de produtos do segmento considerado devem passar para, por fim, chegarem ao final da linha de montagem como produtos acabados.

Uma das últimas alterações que a empresa executou em suas linhas de montagem foi a implementação de um balanceamento de linha, visto que, de acordo com os dados e informações apresentados pela empresa, haviam estações gargalo, as quais aumentavam significativamente os tempos de ciclo e de produção das linhas presentes na indústria, como pode ser vislumbrado na Figura 3. Esta alteração da linha para operar com a condição balanceada de produção resultou na redução do tempo de ciclo de 39,73 u.t. para 28,12 u.t. Esta diferença, quando considerado um longo período de produção, refletiu em ganhos financeiros e de produção.

Usufruindo desta mesma técnica empregada pela empresa em questão, e sabendo-se da existência de estações de trabalho que tendem a falhar e paralisar a linha de maneira relativamente corriqueira, foi possível estudar e desenvolver maneiras de manter a linha de produção operante mesmo quando as estações “críticas” venham a falhar. Estes meios embasam-se nos resultados obtidos pela empresa, apresentados na Figura 3, e no interesse em encontrar uma solução para manutenção do sistema produtivo, mesmo quando operando em modo de falha ou modo degradado.

Ressalta-se que os tempos de produção, assim como a alocação das tarefas nas estações de trabalho, as relações de precedência e as restrições físicas e de processo existentes na linha em estudo foram fornecidos pela empresa, bem como as informações auxiliares que foram requeridas no decorrer do desenvolvimento da pesquisa.

**Figura 3 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção desbalanceada x Linha de produção balanceada.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.1 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA

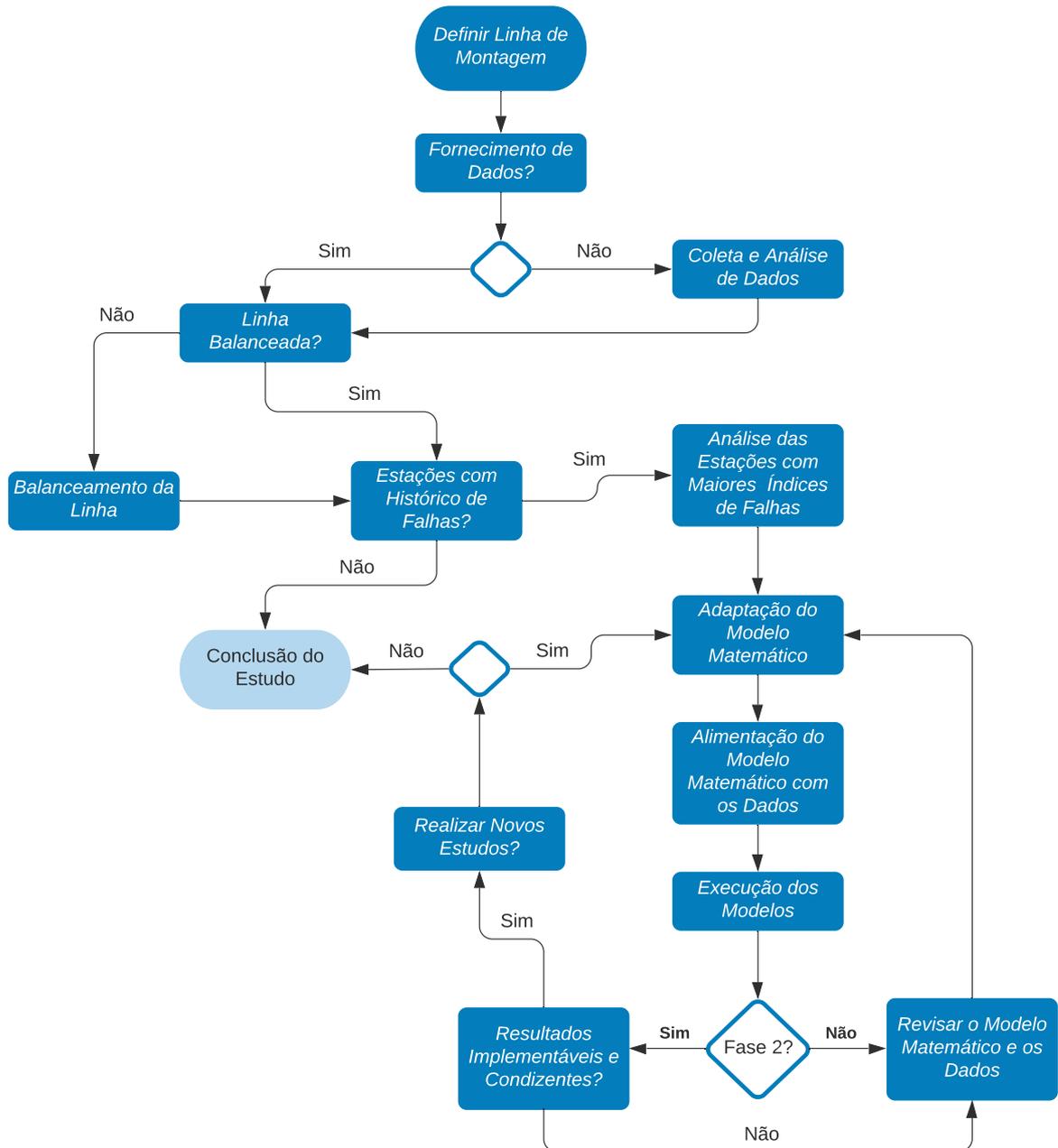
O diagrama proposto na Figura 4 ilustra as principais etapas de desenvolvimento indicadas para a execução do balanceamento, com potencial avaliação de condições de falha em estações. O detalhamento dos passos dados e suas ramificações é apresentado na seção 3.2.

### 3.2 ETAPAS DA METODOLOGIA EMPREGADA

A Figura 4 apresenta, de maneira sucinta e simplificada, uma série de etapas, as quais foram utilizadas no desenvolvimento da metodologia presente nesta dissertação. Vale ressaltar que o modelo matemático, parte integrante da metodologia de solução proposta, é implementado e executado em duas fases, conforme detalhado na Seção 3.3. Esta execução em duas fases se mostrou mais eficaz para encontrar respostas aderentes à problemática avaliada. As etapas principais da metodologia proposta são a seguir sumarizadas:

- **Definir linha de montagem:** etapa inicial do projeto de pesquisa relacionado à otimização e balanceamento de linhas de montagem e sistemas produtivos. Esta etapa consiste no

Figura 4 – Diagrama de desenvolvimento do método utilizado.



Fonte: Autoria própria.

estabelecimento de qual a linha de montagem (ou trecho da linha) que será utilizado como base de estudo para o balanceamento e estudos voltados à otimização das mesmas;

- **Fornecimento de dados:** verificar a existência e disponibilidade das informações necessárias para confecção do referido estudo, tais como tempos de produção, número de estações de trabalho e tarefas executadas, relações de precedência, entre outros;

- **Coleta e análise de dados:** caso os dados necessários não estejam disponíveis, é preciso que os mesmos sejam obtidos e coletados por meio dos recursos disponíveis, entre eles a vídeo-análise (LEAL *et al.*, 2019), cronometragem, visita à linha em estudo, visualização do processo produtivo, entre outros;
- **Linha balanceada:** após a obtenção das informações requeridas é necessário verificar se a linha em estudo (ou trecho de linha) está operando em modo balanceado/otimizado ou não;
- **Balanceamento da linha:** caso, na etapa anterior, seja constatado que o sistema produtivo não opera de maneira balanceada, é necessário realizar um estudo visando obter uma solução balanceada do mesmo; modelos matemáticos de otimização como o apresentado por Sikora *et al.* (2017) podem ser utilizados em diferentes contextos industriais;
- **Estações com histórico e probabilidade de falha:** após a verificação e confirmação de que a linha de montagem em estudo opera de modo otimizado, faz-se necessário investigar a existência de estações de trabalho com altos índices de falha e/ou paradas inesperadas. Caso não existam estações com índices de falha elevados, pode-se realizar um estudo para propor uma solução no caso de falha de alguma estação ou, de maneira simplificada, finalizar os estudos;
- **Análise das estações com maior incidência de falhas:** constatada a existência de estações propícias à falhas e/ou paradas, é necessário realizar um estudo nas mesmas buscando entender onde as tarefas que deveriam ser realizadas nesta podem ser realizadas, ao passo que a estação passa por manutenção para um retorno às atividades;
- **Adaptação do modelo matemático:** tomando como base um modelo matemático para solução de problemas do tipo SALBP-2, que visam minimizar o tempo de ciclo dado um número específico de estações de trabalho, sugerem-se algumas alterações nas restrições do mesmo e inserção de novas restrições para que o modelo forneça as soluções esperadas para o escopo da dissertação - (re)balanceamento de linhas de montagem operando em modo degradado de produção. Conforme salientado, o referido modelo é composto por duas fases de execução, onde os resultados obtidos na primeira (*e.g.*, tempo de ciclo) são parâmetros de base para a segunda fase.

- **Alimentação do modelo matemático com os dados:** findada a elaboração do modelo matemático, faz-se necessário “alimentar” o mesmo com todos os dados necessários para realização dos estudos e obtenção das soluções esperadas. Para este projeto, os dados foram disponibilizados na forma de planilhas. No caso da implementação realizada, para a execução da fase 2 do modelo faz-se necessário, ainda, o uso dos resultados obtidos na fase 1;
- **Execução dos modelos:** em posse do modelo matemático já alimentado com os dados necessários, é possível realizar os estudos e *execuções* em ambiente computacional por meio de um *solver (software)* específico e obter os resultados e soluções para os problemas de balanceamento em estudo;
- **Resultado implementável e condizente:** analisar a viabilidade de implementação dos resultados e soluções propostas pelo modelo matemático implementado, verificando detalhadamente a resposta sugerida no que se refere ao respeito às restrições de precedência e atendimento às restrições implementadas no modelo matemático;
- **Revisar modelo matemático, restrições e dados:** caso os resultados obtidos não sejam condizentes com o esperado, faz-se necessário revisar o modelo matemático, as restrições implementadas e os dados fornecidos pois pequenas imprecisões em um destes pode fornecer resultados bastante diferentes dos esperados/viáveis. Os *solvers* utilizados para solução dos modelos matemáticos podem ser também usados como ferramentas para encontrar lacunas e brechas nos modelos propostos, por exemplo, por meio da adição de restrições auxiliares;
- **Realizar novos estudos:** após terminados os estudos propostos para execução das pesquisas, é possível voltar ao modelo matemático, alterá-lo, e realizar outros estudos complementares. Muitas vezes isso ocorre apenas com a inserção de novas restrições e/ou alteração de elementos na função objetivo;
- **Conclusão dos estudos:** finalizados os estudos realizados no projeto de pesquisa por meio da implementação computacional do modelo matemático e obtidas as soluções, pode-se, então, encerrar o estudo com a implementação de um (re)balanceamento da linha de montagem ou concluir, a partir das soluções obtidas, que novos estudos ainda são desejáveis.

Um passo fundamental dentro da metodologia apresentada é a existência de um modelo matemático de otimização que possa fornecer respostas implementáveis diante da existência de estações em falha. A seção 3.3 a seguir detalha o modelo proposto para a referida análise de modo degradado.

### 3.3 FORMULAÇÃO PARA O MODO DEGRADADO DE PRODUÇÃO

Partido de um modelo apresentado por Boysen e Flidner (2007) para resolução de problemas do tipo SALBP-2, as considerações e formulações apresentadas a seguir foram desenvolvidas.

Ressalta-se que hipóteses embasadoras dos modelos SALBP foram respeitadas, tais como: alocação de todas as tarefas a serem executadas; realização das tarefas integralmente em um único posto de trabalho; respeito ao diagrama de precedências; entre outras apresentadas na seção 2.3. Contudo, algumas considerações adicionais foram feitas:

- O modelo de produto utilizado neste estudo é oriundo de um modelo médio ponderado pelos modelos apresentados na Tabela 1, Capítulo 1, ou seja, utilizou-se o conceito de modelo equivalente. Esta ponderação se deu pela ocupação dos modelos de produtos na linha de montagem em estudo;
- A(s) estação(ões) de trabalho desativadas (operando em modo degradado) não podem executar e receber nenhuma tarefa;
- As tarefas originalmente alocadas nas estações desativadas devem ser realocadas nas demais estações de trabalho da linha de montagem. Com isso, cada estação de trabalho ativa deve executar um grupo de tarefas de tal modo que a soma de todas as tarefas executadas em todos os postos de trabalho ativos deve ser igual ao número total de tarefas executadas na linha de montagem;
- As tarefas inicialmente alocadas às estações de trabalho ativas não precisam, necessariamente, permanecer nas mesmas estações de trabalho após o rebalanceamento. Contudo, considerações adicionais em relação à minimização de deslocamentos de tarefas originalmente alocadas a postos de trabalho ativos podem ser incorporadas na análise do rebalanceamento.

### 3.3.1 Variáveis e Parâmetros

Para elaboração do modelo matemático foram considerados os parâmetros, índices, conjuntos e variáveis elencados nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente. Além dos termos apresentados nas referidas tabelas, ressalta-se, ainda, a implementação dos conjuntos  $T$  e  $S$ , os quais referem-se, respectivamente, a todas as tarefas (*tasks*) e estações de trabalho (*stations*); o conjunto  $SC$  que contempla os pares  $\{s,c\}$  de estações ativas ( $c = 0$ ; parâmetro “closed” igual a zero) ou não ( $c = 1$ ); e o conjunto  $P$ , o qual contém os pares ordenados  $\{t,j\}$  que representam as relações de precedência (*precedence*) direta entre as tarefas.

**Tabela 2 – Parâmetros utilizados para elaboração do modelo matemático.**

Parâmetro	Tipo	Descrição
$D$	Real Positivo	Duração das tarefas em unidades de tempo (u.t.)
$c$	Binário	Determina se estações de trabalho estão ativas ( $c = 0$ ) ou não ( $c = 1$ )
$nS$	Inteiro	Número de estações de trabalho
$K$	Inteiro	Fator de ponderação da função objetivo
$CT_{max}$	Real Positivo	Tempo de ciclo máximo (usado na fase 2 de execução)

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 3 – Índices e conjuntos utilizados para elaboração do modelo matemático.**

Índice	Parâmetro	Descrição
$t$	$t \in T$	Índice da tarefa “ $t$ ”
$j$	$j \in T$	Índice da tarefa sucessora de “ $t$ ”
$s$	$s \in S$	Índice da estação de trabalho “ $s$ ”
$\{t,j\}$	$\{t,j\} \in P$	Par ordenado que indica relações diretas de precedência
$\{s,c\}$	$\{s,c\} \in SC$	Par ordenado que indica as estações ativas ( $c = 0$ ) e inativas ( $c = 1$ )
$\{t,s\}$	$\{t,s\} \in TS_{inicial}$	Par ordenado que indica as tarefas inicialmente alocadas às estações de trabalho

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 4 – Variáveis adotadas para elaboração do modelo matemático.**

Variável	Tipo	Descrição
$X[t,s]$	Binário	Variável que determina se a tarefa “ $t$ ” é alocada na estação “ $s$ ”
$CT$	Real Positivo	Tempo de Ciclo (em unidades de tempo, u.t.)

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.2 Execução em Duas Fases

A execução do modelo matemático proposto em duas fases se deu com o objetivo de obter soluções complementares, como descrito na seção 2.6.3. No primeiro momento, foi considerado o tempo de ciclo ( $CT$ ) como o fator principal da função objetivo, ou seja, partindo de um grupo de restrições, as quais serão apresentadas na subseção 3.3.4, deseja-se obter

uma solução “ótima” para o tempo de ciclo. Conseqüentemente, determina-se um número de realocações de tarefas nas estações de trabalho para atender o tempo de ciclo calculado pelo modelo matemático, sempre respeitando as restrições impostas.

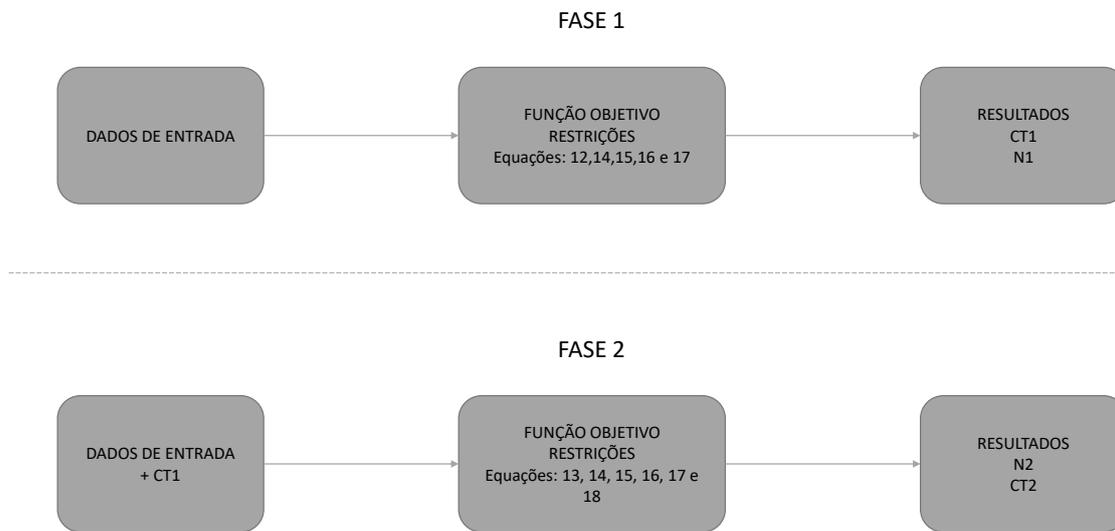
Na segunda fase de execução do modelo matemático, o tempo de ciclo deixa de ser o objetivo para se tornar uma restrição, e o número de realocações de tarefas passa a ser o objetivo principal do modelo matemático. O tempo de ciclo (valor de referência), agora como restrição, passa a limitar o número de realocações de tarefas. Este tempo de ciclo foi calculado na fase 1 (um) de execução do modelo matemático, e multiplicado por um fator percentual na fase 2 de modo a permitir uma certa flexibilidade em relação à solução “ótima” da fase 1 de execução do modelo. Com isso, é possível encontrar o número mínimo possível de realocações de tarefas nas estações de trabalho para a linha de montagem para todos os aumentos percentuais permitidos ao tempo de ciclo de referência (obtido na fase 1), como pode ser visto na Equação 18 da subseção 3.3.4.

Em posse dos resultados das duas fases de execução do modelo matemático, torna-se possível comparar os resultados da influência do número de realocações de tarefas nas estações de trabalho no tempo de ciclo, para a fase 1 de execução do modelo matemático, e a influência do tempo de ciclo no número de realocações de tarefas nos postos de trabalho. Uma ilustração do funcionamento da execução do modelo matemático em duas fases pode ser encontrada na Figura 5. Além disso, a comparação de resultados mencionada pode ser encontrada na seção 4.5.

### 3.3.3 Função Objetivo

*A priori*, na primeira fase de execução do modelo matemático, o objetivo principal do mesmo é a minimização do tempo de ciclo, dadas as restrições existentes. Contudo, visando uma abordagem mais próxima das dificuldades reais encontradas nos ambientes produtivos, um segundo termo foi adicionado à função objetivo do modelo, como mostrado na Equação 12. Este termo tem como finalidade a minimização do número de alterações realizadas na linha de montagem analisada, de modo que o modelo forneça soluções cuja implantação física seja facilitada. Nesta fase 1, portanto, a prioridade é a minimização de  $CT$ , mas considera-se como um objetivo secundário obter soluções em que o número de mudanças também seja considerado. Para a segunda fase de execução do modelo matemático, a função objetivo deixa de ser baseada na minimização do tempo de ciclo ( $CT$ ) para ser fundamentada na minimização da quantidade de realocações de tarefas na linha de montagem, dado um tempo de ciclo máximo permitido para

**Figura 5 – Execução do modelo matemático em duas fases.**



**Fonte: Autoria própria.**

o sistema produtivo em questão. Esta função é apresentada na Equação 13.

$$\text{Minimize } Z = CT + K \cdot \sum_{\{t,s\} \in TS \mid \{t,s\} \notin TS_{inicial}} X[t,s] \quad (12)$$

$$\text{Minimize } Z = \sum_{\{t,s\} \in TS \mid \{t,s\} \notin TS_{inicial}} X[t,s] \quad (13)$$

### 3.3.4 Restrições do modelo

De modo a considerar as limitações físicas do sistema produtivo, bem como para atender às hipóteses e considerações feitas para a modelagem, três conjuntos de restrições foram implementados:

1. Restrição para alocação de tarefas;
2. Restrição de precedência entre as tarefas;
3. Restrição para a duração das tarefas nas estações de trabalho.

Vale enfatizar que esses três grupos de restrições apresentados são comuns para as duas fases de execução do modelo matemático.

Tratando do primeiro item, restrição para alocação de tarefas, este conjunto apresenta três objetivos principais, e pode ser representada pelas equações 14 e 15:

- Garantir a alocação de todas as tarefas em alguma estação de trabalho;
- Assegurar a alocação de cada tarefa a somente um posto de trabalho, evitando a alocação da mesma tarefa em estações diferentes;
- Garantir que nenhuma tarefa será alocada nas estações de trabalho que encontram-se desativadas (modo degradado).

$$\sum_{\{s,c\} \in SC \mid c=1} X_{[t,s]} = 0 \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{\{s,c\} \in SC \mid c=0} X_{[t,s]} = 1 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

A Equação 14 representa a não alocação das tarefas nos postos de trabalho operando em modo degradado, ou seja, quando  $c = 1$ , visto que a soma de todas as tarefas alocadas na estação cujo parâmetro é este apresentado deve ser nula. Por outro lado, a Equação 15, impõe que as tarefas  $t$  podem ser alocadas em somente uma estação  $s$ , uma vez que o parâmetro  $c$  assume o valor nulo, indicando que a estação de trabalho opera de modo regular.

A Inequação 16 estabelece que as relações de precedência entre tarefas seja respeitada, ou seja, uma tarefa  $j$  será alocada a uma estação  $s$  somente se todas as suas tarefas  $t$  predecessoras já tiverem sido alocadas em alguma estação de trabalho anterior ou igual a  $s$  (seção 2.5). No Capítulo 4 a seguir, Figura 6, ilustra-se o diagrama de precedências do caso em estudo.

$$\sum_{s \in S} s \cdot X_{[t,s]} \leq \sum_{s \in S} s \cdot X_{[j,s]} \quad \forall \{t,j\} \in P \quad (16)$$

A restrição 17 limita a duração do tempo de ciclo de acordo como o somatório da duração das tarefas alocadas em cada uma das estações de trabalho. Avaliando-se de outro modo, o tempo total para a execução de todas as tarefas  $t$  alocadas na estação  $s$  não deve exceder o tempo de ciclo máximo existente na linha de montagem. A estação com maior tempo de execução de todas as suas tarefas será a estação que ditará o  $CT$  da linha, ou seja, será a estação gargalo.

Com isso, é possível perceber uma influência direta desta restrição na função objetivo, Equação 12, visto que esta visa, *a priori*, minimizar o tempo de ciclo.

$$\sum_{t \in T} s \cdot X_{[t,s]} \cdot D_t \leq CT \quad \forall s \in S \quad (17)$$

Na fase 2 de execução do modelo matemático, uma restrição complementar é implementada. Esta restrição é muito próxima da apresentada na Inequação 17, que visa ditar o tempo de ciclo da linha de montagem com base no tempo de execução das tarefas na estação mais ociosa. Na fase 2, esta restrição limitará o tempo de execução das tarefas nos postos de trabalho com base em seu tempo de ciclo máximo, o qual é obtido por meio de um aumento percentual do tempo de ciclo ótimo obtido na fase 1 de execução. Por exemplo, supondo que na fase 1 de execução do modelo, foi encontrado um  $CT$  valorado em 20 u.t, o tempo de ciclo máximo permitido na fase 2 de execução será o valor encontrado na fase anterior mais um aumento percentual do mesmo. Considerando, como exemplo, um aumento percentual de 10%, o tempo de ciclo máximo ( $CT_{max}$ ) será de 22 u.t. Esta restrição é apresentada na Inequação 18.

$$\sum_{t \in T} s \cdot X_{[t,s]} \cdot D_t \leq CT_{max} \quad \forall s \in S \quad (18)$$

Deste modo, os modelos da fase 1 e fase 2 envolvem as seguintes expressões matemáticas:

- Fase 1: Expressões (12), (14) a (17);
- Fase 2: Expressões (13) a (18).

No Capítulo 4 a seguir, utilizam-se as expressões (12) a (18), conforme a fase de execução em análise, para obter resultados para o caso em estudo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os testes realizados para obtenção dos resultados para o problema de (re)balanceamento de linhas de montagem com estações de trabalho operando em modo de falha (modo degradado). Primeiramente, na seção 4.1, é apresentado o diagrama de precedências existente para as 46 tarefas e 7 postos de trabalho analisados. Este diagrama de precedências refere-se à alocação atual das tarefas nas estações de trabalho para a linha operando em modo balanceado, e deve ser respeitado durante todos os estudos, visto que o mesmo é um parâmetro imposto ao modelo matemático. A seção 4.2 apresenta a influência de falhas nas estações de trabalho no desempenho da linha de montagem. A seção 4.3 detalha as questões de ponderação utilizada na função objetivo do modelo matemático (fase 1). Na sequência, subseções 4.3.1 a 4.3.4, são apresentados os resultados obtidos. Por fim, na seção 4.4, são apresentados os resultados oriundos da execução da segunda etapa do modelo matemático (fase 2), na qual há uma alteração na formulação do modelo matemático, visando a minimização da quantidade de realocações de tarefas, dado um tempo de ciclo.

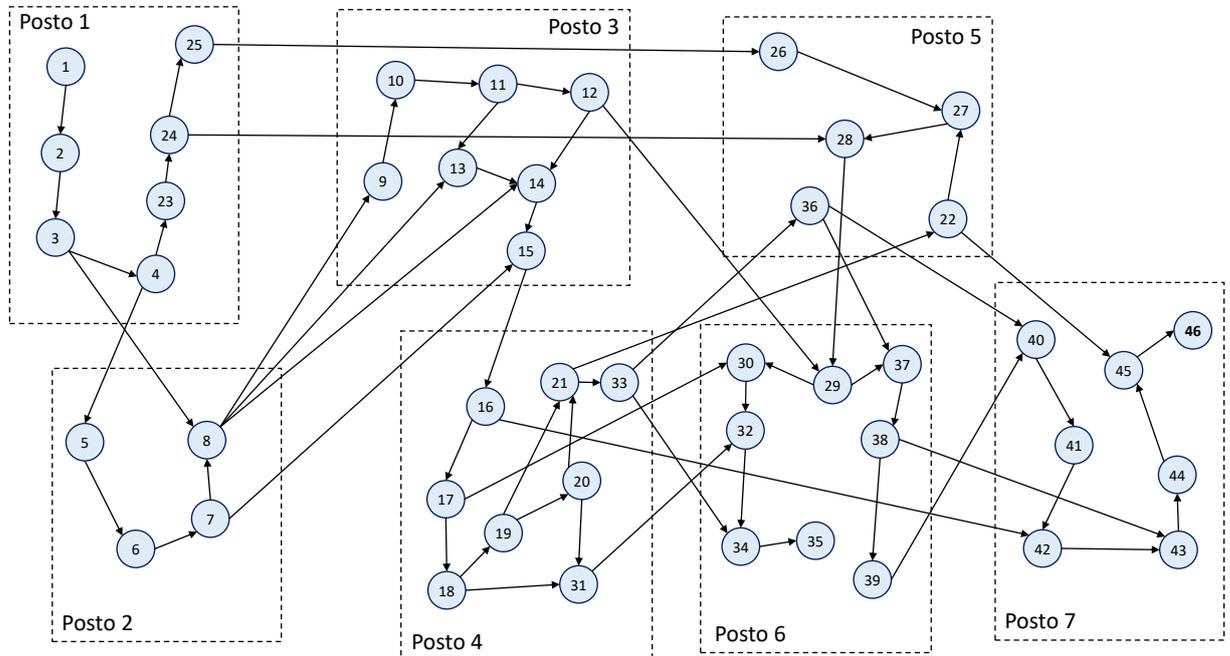
Ressalta-se que o ambiente computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* foi utilizado para todos os estudos realizados, processados em um computador Dell®, com processador Intel® i7-7550U e 16GB de memória RAM, a partir da resolução do modelo matemático que contou, na fase 1, com 323 variáveis, das quais 322 são variáveis binárias, e 162 restrições; e, na fase 2, com 329 variáveis, 322 das quais são binárias e 169 restrições. Os estudos foram executados em tempos não proibitivos (10 a 20 segundos) e forneceram os resultados numéricos. Estes resultados são, então, comparados com a disposição atual da linha de montagem.

### 4.1 DIAGRAMA DE PRECEDÊNCIAS ATUAL

A concepção do diagrama de precedências para a disposição atual (balanceada) da linha de montagem em estudo levou em consideração fatores como a ordenação das atividades no ambiente fabril, a precedência de execução das tarefas, as limitações físicas existentes, fatores físicos que restringem a mudança de alocação de algumas tarefas (*e.g.*, restrições de movimentação de equipamentos), as limitações de ferramental disponível nas estações de trabalho, entre outros. A Figura 6 apresenta o diagrama de precedências para a operação balanceada da linha de

montagem em estudo, no qual são indicadas todas as tarefas alocadas a cada um dos sete postos de trabalho.

**Figura 6 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem**



**Fonte: Autoria própria.**

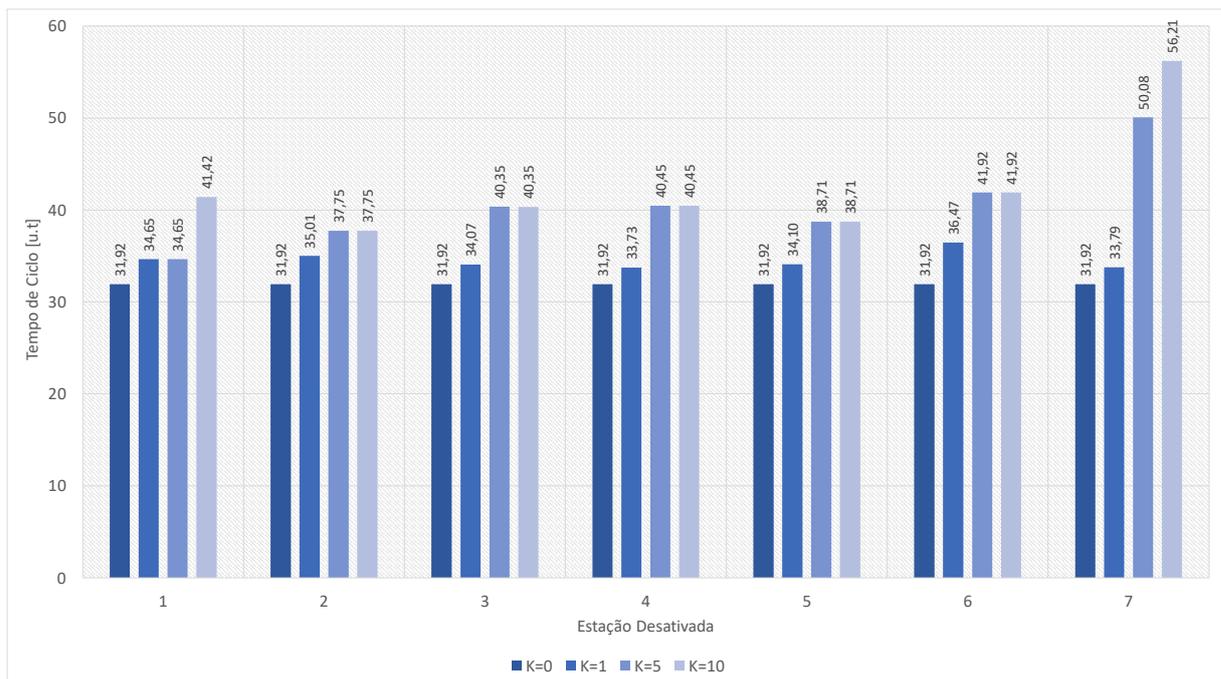
É possível perceber, pela Figura 6, a existência de diversas relações de precedência entre as 46 tarefas da linha em estudo. Vale ressaltar que as precedências, relações apresentadas pelos arcos ligando as tarefas, apenas indicam quais tarefas devem estar finalizadas para dar início aos próximos trabalhos, e não a ordem de execução das mesmas. Como exemplo pode-se citar a tarefa 29, que está sendo executada na estação de trabalho denominada de Posto 6, mas depende que as tarefas 12, executada no Posto 3, e 28, executada no Posto 5, estejam concluídas, caso contrário não é possível dar continuidade na produção.

A linha de produção operando em modo balanceado possui as tarefas alocadas nas estações de acordo com o exposto na Figura 6, e tempo de ciclo de 28,12 u.t, como apresentado na Figura 3 (Capítulo 3).

## 4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES DE TRABALHO NO TEMPO DE CICLO

De modo a entender como a ativação ou a ausência de cada uma das estações de trabalho influencia no tempo de ciclo da linha de montagem estudada, fez-se um conjunto de estudos com o uso do modelo matemático definido para a fase 1. Foram realizados estudos considerando as estações de trabalho operando em modo degradado individualmente. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7. Vale ressaltar que o fator de ponderação  $K$  deve ser definido para o modelo da fase 1 e, no referido estudo, utilizou-se  $K = 0, 1, 5$  e  $10$ . Com  $K = 0$  somente a minimização do tempo de ciclo é considerada e o modelo não é penalizado por movimentar tarefas em relação à condição original (condição inicial); esta é a configuração com menor tempo de ciclo possível. Na medida que os valores de  $K$  são elevados, há uma maior penalização em movimentar tarefas, com um consequente aumento no tempo de ciclo.

**Figura 7 – Avaliação da influência das estações de trabalho no tempo de ciclo da linha de montagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser visualizado na Figura 7, a estação de trabalho 7 apresenta uma maior influência no tempo de ciclo da linha de montagem, quando entra em modo degradado individualmente, chegando a aumentos no tempo de ciclo da ordem de 24,29 u.t (56,21–31,92), tomando como referência o tempo de ciclo mínimo (obtido com  $K = 0$ ) em relação à análise quando

$K = 10$ . A título de comparações, no caso da estação 1, é possível perceber que para  $K = 10$  é apresentado um aumento do tempo de ciclo da ordem de 9,5 u.t; na estação 2 há um aumento de 5,83 u.t; na estação 3 um aumento de 8,43 u.t; na estação 4 um aumento de 8,53 u.t; na estação 5 um aumento de 6,79 u.t e, por fim, na estação 6, um aumento de 10 u.t.

Com base nos valores apresentados para a análise supracitada, obtêm-se, da estação com maior influência no tempo de ciclo para a com menor influência, a seguinte sequência de postos de trabalho: 7, 6, 1, 4, 3, 5 e 2. Se movimentações de tarefas não forem penalizadas, é possível obter um tempo de ciclo mínimo equivalente com a entrada em modo de falha de qualquer uma das estações. É notório, contudo, que não há estações de trabalho que, se entrarem em modo de falha, não causam impacto no sistema.

Em adição a este fato, dados da empresa indicam um maior histórico de incidência de falhas e paradas nas estações 1 e 3, chegando a casos de falharem simultaneamente, ao passo que as falhas e paralisações nas demais estações apresentam índices bastante inferiores aos das estações acima mencionadas<sup>1</sup>. Deste modo, e sabendo que esta dissertação se deu, inicialmente, em caráter de avaliar o impacto das falhas e paralisações das estações com índices mais elevados, a seção 4.3 a seguir toma por base a análise de falhas em 2 das estações da linha para ilustrar os possíveis impactos no tempo de ciclo e deslocamento de tarefas. Embora os estudos e resultados aqui apresentados mostrem a existência de duas estações de trabalho operando em modo degradado simultaneamente, o modelo matemático implementado e apresentado na Seção 3.3 é capaz de obter soluções para tantas quantas forem as estações de trabalho que forem de interesse de estudo. Para o caso em questão se, por exemplo, fosse de interesse tratar a atuação da linha de montagem com 4 estações de trabalho operando em modo degradado, simultaneamente, seria possível uma vez que o modelo não é restrito a um único quantitativo de estações desativadas.

#### 4.3 PONDERAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO DO MODELO

Analisando a função objetivo modelada e implementada no modelo matemático (fase 1), Equação 12 (Capítulo 3), percebe-se a existência de um fator de ponderação  $K$ , o qual, como apresentado na Tabela 2, é um parâmetro inteiro, um fator multiplicador que altera o peso do segundo termo da função objetivo, responsável pela minimização das alterações na linha de

<sup>1</sup> Os índices de falha não são apresentados pois são informações internas e sigilosas da empresa fornecedora dos dados.

montagem a partir de uma solução inicial.

Este fator, inicialmente, foi adotado como 0 (zero) para validação do modelo com relação à minimização do tempo de ciclo, e forneceu os resultados para o caso denominado “realocação livre das tarefas”, apresentados na seção 4.3.1. Quando adotado o valor unitário ao parâmetro  $K$ , obteve-se a solução para a realocação livre das tarefas, mas já considerando uma “minimização das alterações” na linha em relação a uma solução inicial dada. Estes resultados são apresentados na seção 4.3.2.

Posteriormente, foram testados valores na ordem de  $10^2$  e  $10^3$  para o parâmetro  $K$ , de maneira a observar como o mesmo influencia as respostas fornecidas pelo modelo implementado. Pode-se perceber que as soluções propostas com estes parâmetros eram similares, com o mesmo valor de  $CT$  e a mesma alocação de tarefas. Seguindo-se com os testes, quando adotado o valor de  $K = 10$  para o parâmetro, os resultados encontrados continuaram os mesmos para os valores anteriores. Vale ressaltar que, para estes três estudos preliminares realizados (projeto de experimento), as realocações de tarefas sugeridas pelo modelo matemático foram somente daquelas atividades que eram realizadas nas estações que foram desativadas e necessitavam ser realocadas em outros postos de trabalho. Com isso, pode-se determinar que, quando o parâmetro  $K$  recebe o valor 10, para o estudo realizado, tem-se o caso de “realocação restrita de tarefas”, como apresentado posteriormente na seção 4.3.4.

Outro estudo realizado foi fundamentado na alteração do valor da ponderação de modo a permitir que algumas tarefas, originalmente alocadas a estações que não entraram em modo de falha, também fossem deslocadas para outra estação. Adotando um valor ponderativo de  $K = 5$  foi possível encontrar as soluções buscadas. Neste caso, a realocação das tarefas nas estações de trabalho ocorre de maneira mais limitada em comparação a quando  $K = 1$ , ou seja, somente as alterações bastante vantajosas para o modelo são realizadas (além das realocações das tarefas originalmente executadas nas estações desativadas, que devem necessariamente mudar). Os resultados obtidos para este caso são apresentados na seção 4.3.3, denominada “realocação limitada de tarefas”.

Deste modo, conforme os valores de  $K$  adotados tem-se os seguintes experimentos:

- $K = 0$  - Realocação livre de tarefas (seção 4.3.1);
- $K = 1$  - Realocação livre, mas minimizando alterações (seção 4.3.2);
- $K = 5$  - Realocação limitada de tarefas (seção 4.3.3);

- $K = 10$  - Realocação restrita de tarefas (seção 4.3.4).

#### 4.3.1 Modo degradado - Realocação Livre de Tarefas

O primeiro estudo realizado consistiu no rebalanceamento da linha de montagem aqui descrita, considerando a realocação das tarefas na linha quando 3 situações vierem a ocorrer:

- Estação de trabalho 1 (Posto 1) encontra-se em modo de falha;
- Estação de trabalho 3 (Posto 3) encontra-se em modo de falha;
- Estações de trabalho 1 e 3 encontram-se em modo de falha, simultaneamente.

Estas situações foram estudadas pois, de acordo com as informações da empresa fornecedora dos dados, são estas as situações com maior probabilidade de ocorrência durante o processo produtivo, como apresentado e justificado na seção 4.2.

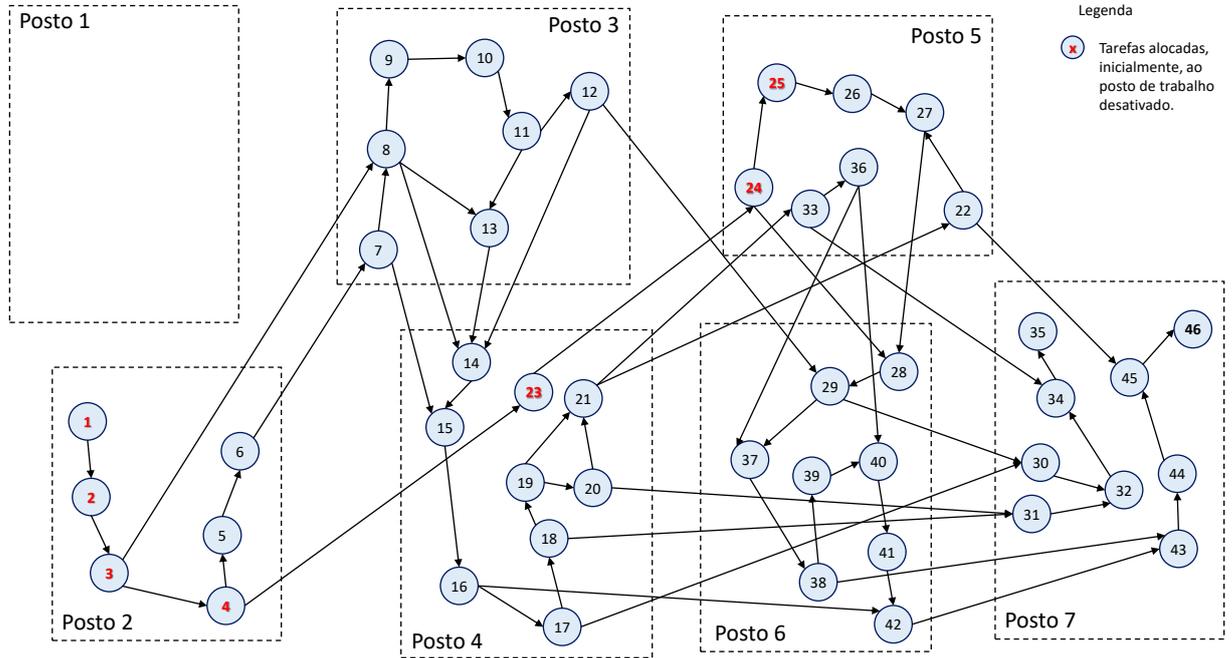
Para o primeiro caso, obteve-se como solução, considerando apenas a minimização do tempo de ciclo como função objetivo, a realocação das tarefas na linha de montagem como o apresentado na Figura 8, e os tempos das estações de trabalho apresentados na Figura 9. Comparando a solução para este caso, Figura 9, Posto 1 operando em modo degradado, com a operação atual, Figura 3 (pág. 40), da linha de montagem<sup>2</sup>, é perceptível que houve 21 alterações de alocação de tarefas nos postos de trabalho de modo a encontrar a solução “ótima” com o menor tempo de ciclo, cujo valor é de 31,92 u.t.

Esta solução com a desativação de um posto de trabalho, Posto 1, resultou em um aumento de 3,8 u.t. no tempo de ciclo, de 28,12 para 31,92 u.t. (cerca de 13,5% de aumento em *CT*). O balanceamento proposto envolveu a realocação de todas as tarefas que eram executadas no Posto 1, mas também na alteração da posição de outras tarefas executadas em outros postos ativos. Esta nova disposição de tarefas nas estações de trabalho respeita as relações de precedência da linha de montagem, além de manter a mesma operando em modo degradado balanceado de produção, ou seja, a linha continua operando mesmo com uma estação de trabalho a menos, e de modo balanceado.

Para o segundo caso, feitas considerações análogas às apresentadas para o caso anterior, obteve-se, como solução para o problema, considerando a falha na estação de trabalho 3 (Posto

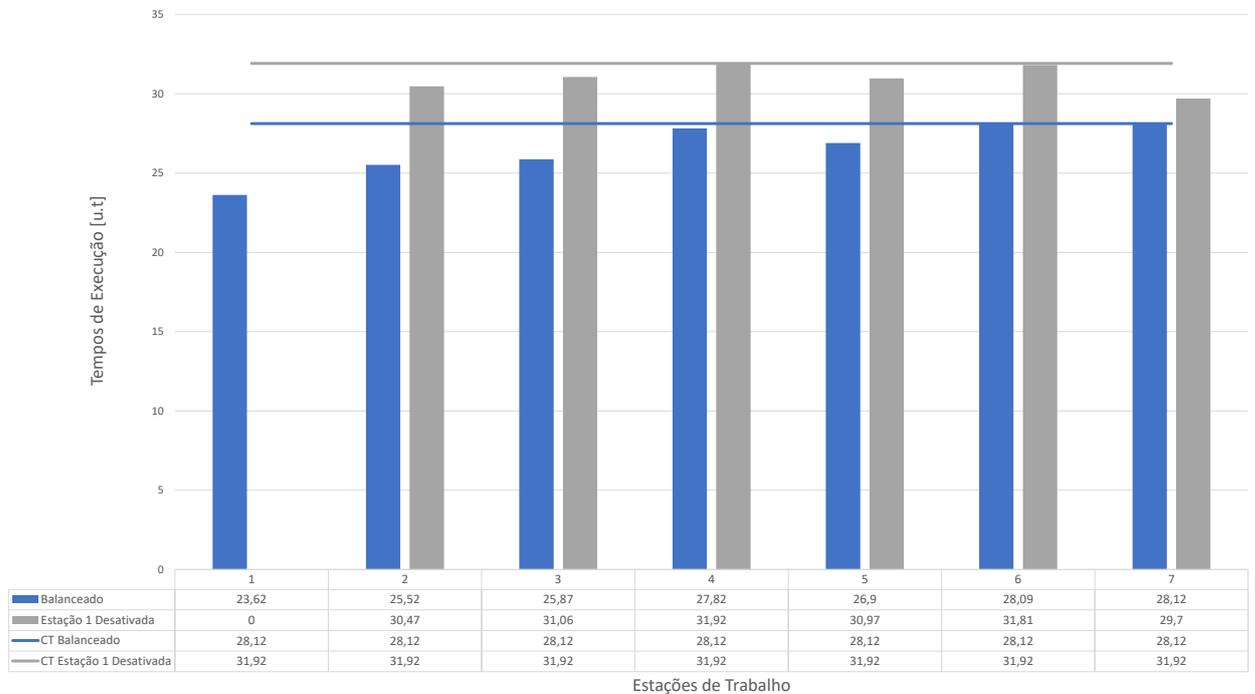
<sup>2</sup> A condição de operação atual da linha de montagem pode ser entendida, neste estudo, como a operação em modo balanceado.

**Figura 8 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1**



Fonte: Autoria própria.

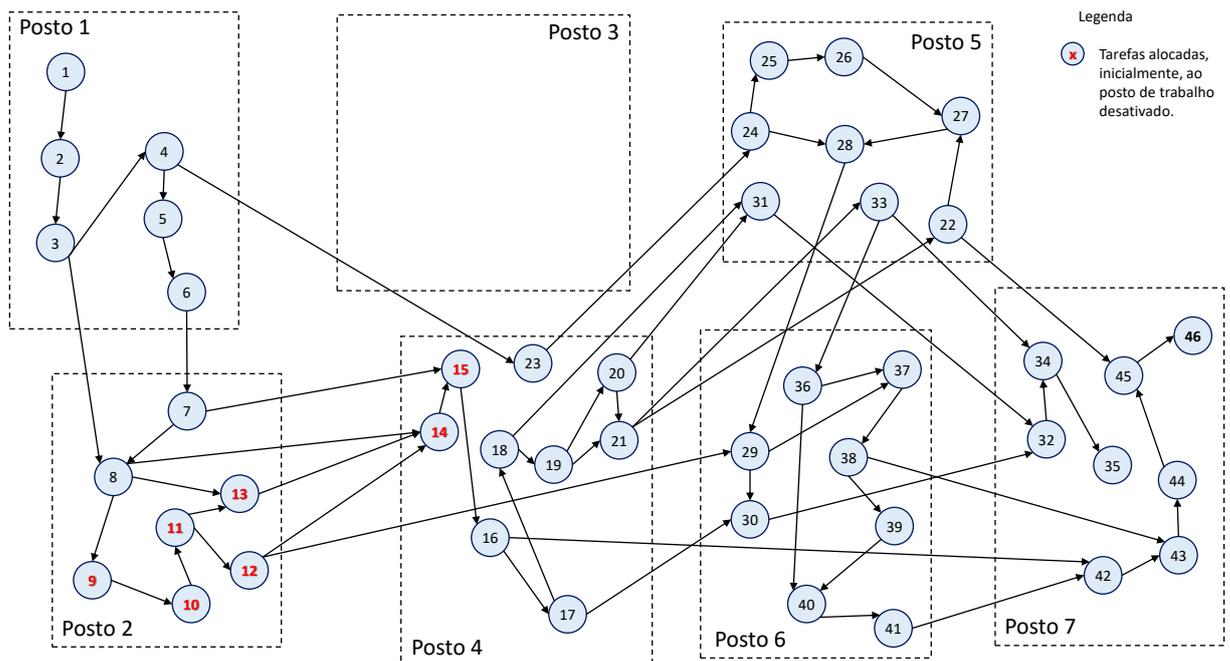
**Figura 9 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha**



Fonte: Autoria própria.

3), o diagrama de precedências e os tempos de execução nas estações de trabalho apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Neste segundo caso, foram sugeridas 20 realocações de tarefas pelo modelo matemático (no caso anterior, 21 realocações), incluindo todas as tarefas anteriormente executadas no Posto 3 e outras de postos ainda ativos. Obteve-se um tempo de ciclo de 31,92 u.t., assim como o obtido para o caso anterior.

**Figura 10 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3**

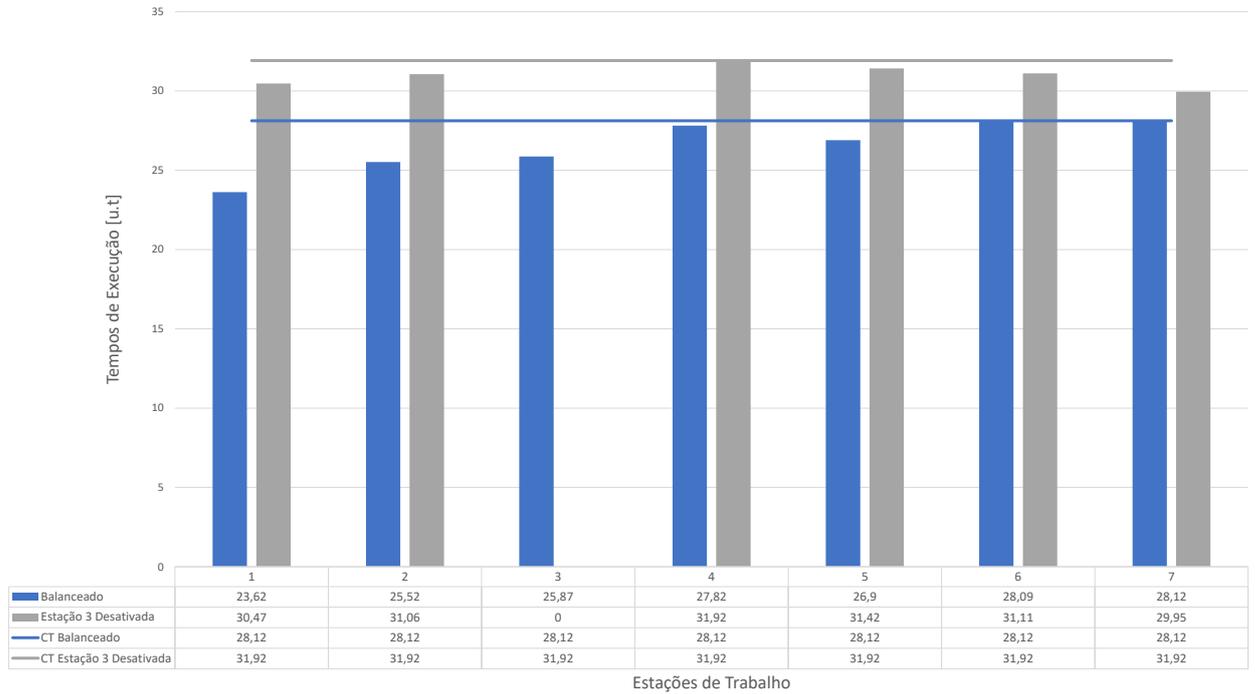


**Fonte: Autoria própria.**

Para o terceiro e último caso de estudo desta seção, utilizando considerações similares às abordadas para os casos anteriores, mas tratando as estações 1 e 3 operando em modo de falha simultaneamente, foram obtidos os resultados sintetizados no diagrama de precedências e nos tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho apresentados, respectivamente, nas Figuras 12 e 13.

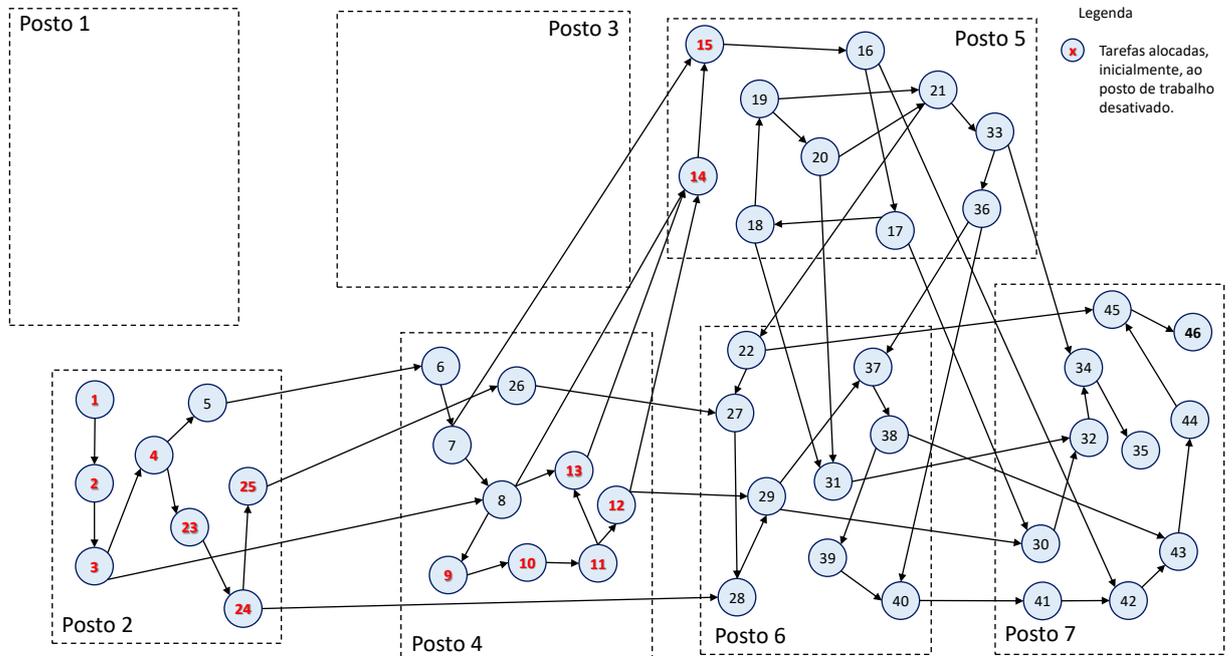
Comparado aos casos anteriores, este terceiro estudo apresentou um aumento mais significativo do tempo de ciclo da linha de montagem, 37,53 u.t. contra os 31,92 u.t. encontrados como soluções para os modos degradados de produção para as estações 1 e 3. Este aumento se deve ao número maior de tarefas que precisou ser realocada nas estações de trabalho, 34 tarefas, e ao menor número de estações aptas a receber e executar as tarefas realocadas, 5 estações, fatores que contribuem para o aumento de *CT*. Logo, existiu uma elevação de cerca de 33,5% de *CT* no

**Figura 11 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha**



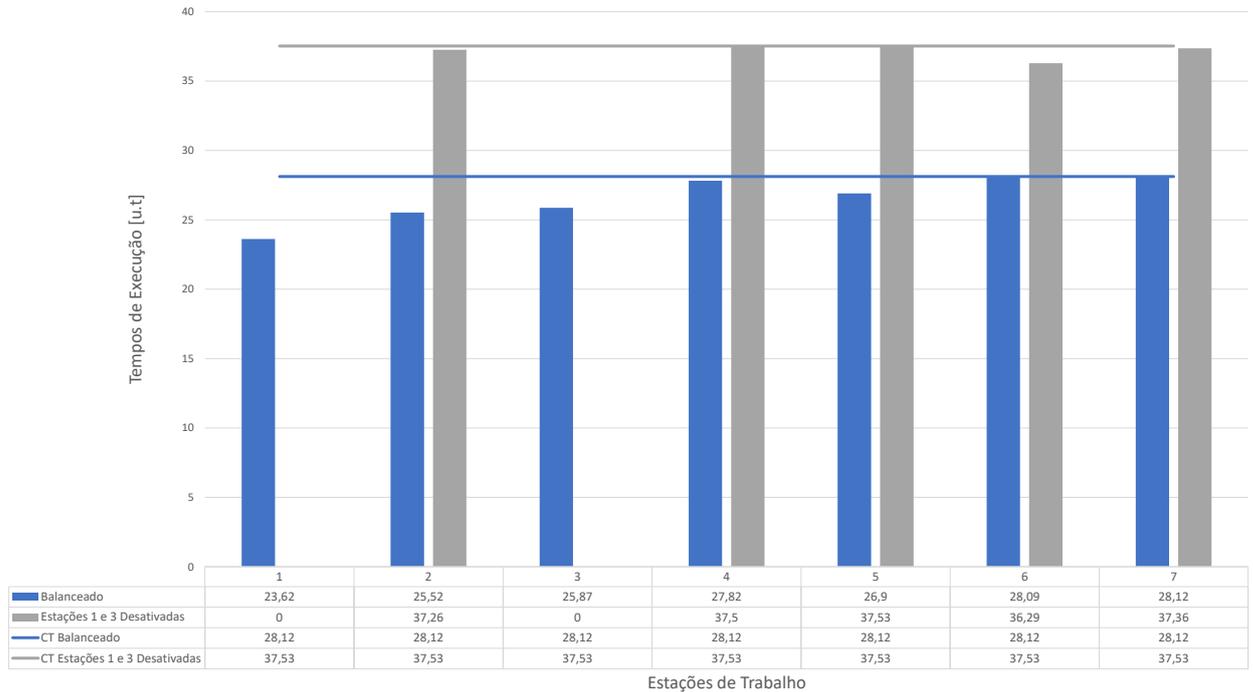
Fonte: Autoria própria.

**Figura 12 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 13 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, simultaneamente**



**Fonte: Autoria própria.**

terceiro caso em comparação a cerca de 13,5% nos dois primeiros casos, indicando um aumento não exatamente linear de  $CT$  com a diminuição unitária dos postos de trabalho disponíveis.

#### 4.3.2 Modo degradado - Realocação Livre de Tarefas com Redução de Alterações

O primeiro estudo realizado, apresentado na seção 4.3.1, considerou, nos 3 casos analisados, apenas a minimização do tempo de ciclo como função objetivo, permitindo que inúmeras alterações na disposição das tarefas fossem sugeridas pelo modelo matemático. Desta maneira, o modelo foi capaz de encontrar uma nova redistribuição das tarefas que resultou em uma linha de produção operando em modo degradado, mas balanceado. Fazendo uma análise de cunho operacional, objetivando a implementação das mudanças sugeridas, realizar várias alterações na linha de montagem pode se tornar inviável, tanto em relação à logística dos postos envolvidos, quanto financeiramente.

Tomando como base essa limitação, foi acrescentado à função objetivo um segundo termo, ponderado por  $K = 1$ , o qual visa minimizar o número de alterações na linha de montagem, em relação a uma solução inicial: a disposição balanceada da linha de montagem

operando com todas as estações de trabalho em funcionamento. De maneira equivalente aos estudos apresentados na seção 4.3.1, para o modelo com a nova função objetivo, os mesmos três estudos foram realizados:

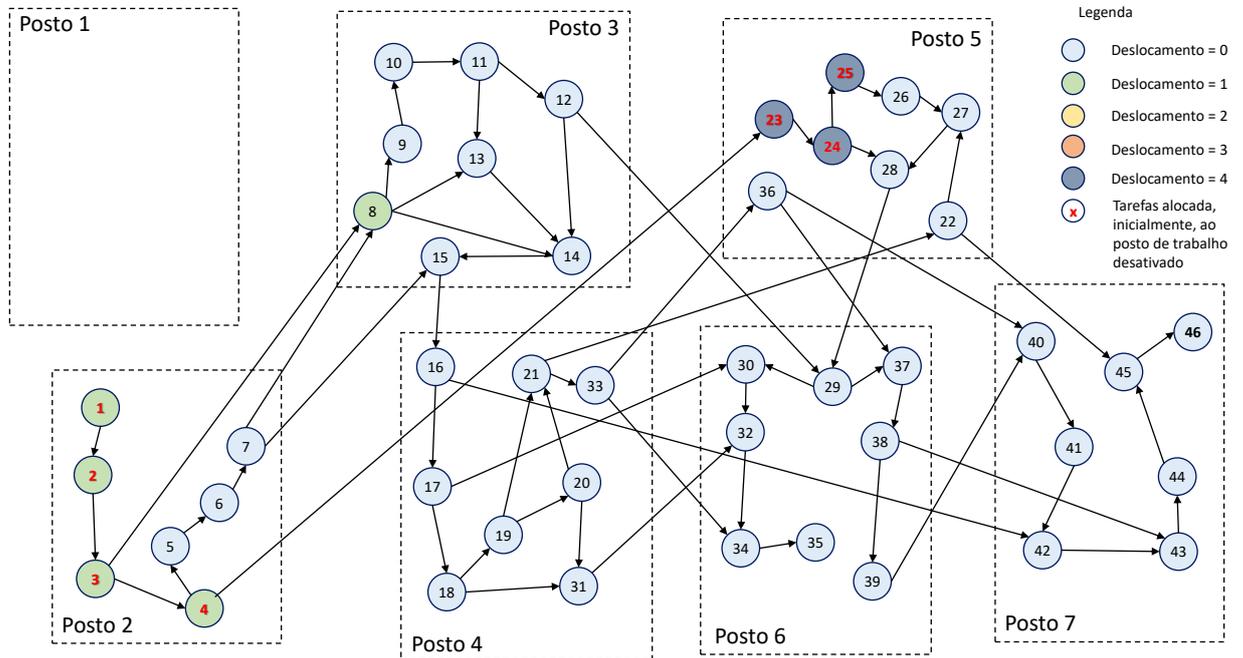
- Estação de trabalho 1 (Posto 1) encontra-se em modo de falha;
- Estação de trabalho 3 (Posto 3) encontra-se em modo de falha;
- Estações de trabalho 1 e 3 encontram-se em modo de falha, simultaneamente.

Na análise do primeiro caso foi possível obter o diagrama de precedências apresentado na Figura 14 e os tempos de execução das estações ilustrados na Figura 15. Comparando o tempo de ciclo obtido para este caso em estudo ( $CT = 34,65$  u.t.) com os tempos de ciclo para a disposição atual da linha de montagem ( $CT = 28,12$  u.t.) e para o modo degradado do Posto 1 apresentado na seção 4.3.1 ( $CT = 31,92$  u.t.), é notório o aumento do mesmo. Este incremento é oriundo da realocação das tarefas nas estações de trabalho, as quais, neste caso, ponderam a função objetivo, justificando o aumento de 6,53 u.t. em relação à solução inicial (cerca de 23,2% de elevação em  $CT$ ). Esta solução, por mais que resulte em um tempo de ciclo relativamente maior que os estudos de caso análogos da seção 4.3.1, requer um menor número de alterações na linha (apenas 8 alterações são sugeridas ao invés das 21 evidenciadas na seção 4.3.1) e fornece uma solução na qual o sistema produtivo opera de modo otimizado.

Nas Figuras 14, 16 e 18 ressalta-se, ainda, que foi incluída a informação do “Deslocamento” (em número de estações de trabalho) que cada tarefa sofreu para o balanceamento em modo degradado. Por exemplo, tomando como base a Figura 14, a tarefa 1 foi deslocada da estação 1 para a 2 (Deslocamento = 1); já a tarefa 23 foi deslocada da estação 1 (vide Figura 6) para a 5 (Deslocamento = 4). Informações análogas são apresentadas em figuras correlatas deste ponto em diante no documento.

Para o segundo caso em estudo para esta função objetivo, mantidas as considerações apresentadas para o caso anterior, obteve-se, como solução para o problema, considerando a falha na estação de trabalho 3 (Posto 3), o diagrama de precedências e os tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho apresentados nas Figuras 16 e 17, respectivamente. Neste segundo caso, foram sugeridas 9 realocações de tarefas pelo modelo matemático, incluindo todas as tarefas anteriormente executadas no Posto 3, obtendo-se um tempo de ciclo de 34,07 u.t., aumento justificado pelo mesmo argumento apresentado para o caso anterior desta seção 4.3.2.

**Figura 14 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

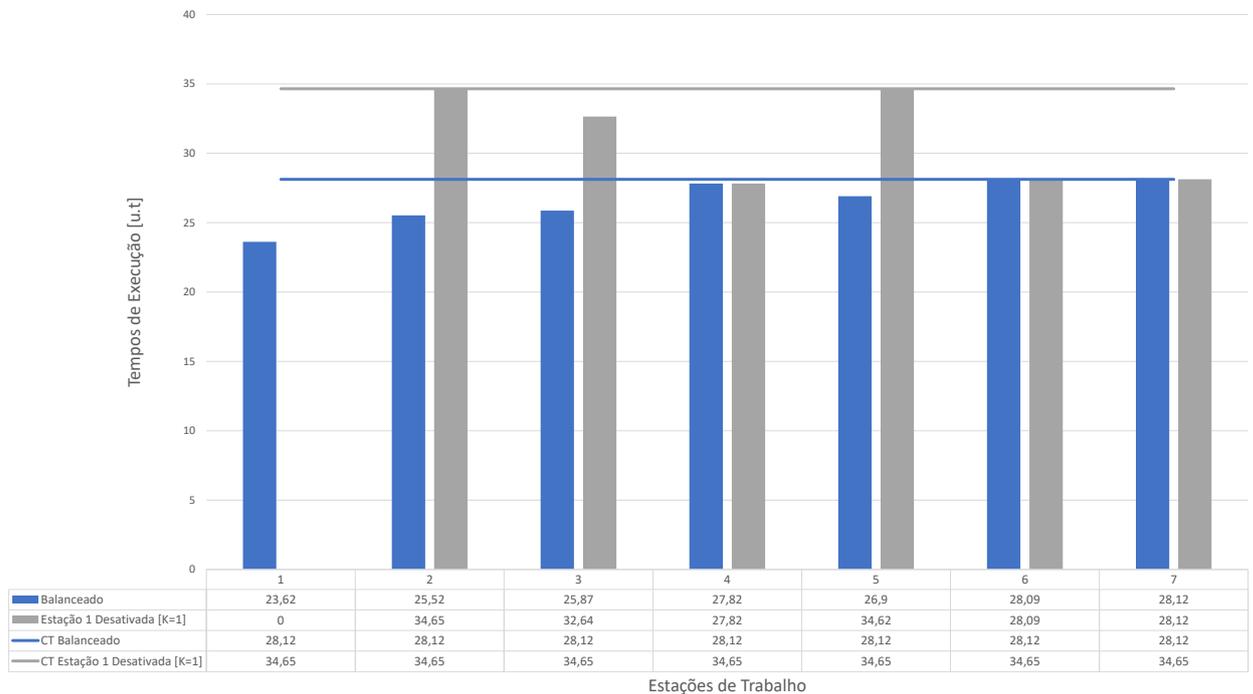


**Fonte: Autoria própria.**

Para o terceiro caso analisado nesta seção, mantendo considerações com relação à função objetivo e restrições do modelo matemático, um tempo de ciclo de 41,42 u.t foi obtido, como apresentado na Figura 19. Este aumento se deve ao maior número de tarefas que precisaram ser realocadas nas estações de trabalho, 19 atividades, e ao menor número de estações aptas a receber e executar as tarefas realocadas, fatores que, aliados à punição aplicada à função objetivo, contribuem para o aumento do tempo de ciclo em cerca de 47,3% em relação à condição inicial. A realocação das tarefas nos postos de trabalho, para este caso, pode ser vislumbrado na Figura 18.

Ainda aprofundando nesta consideração de redução das alterações com relação à solução inicial, dois novos estudos foram concebidos para todos os três casos considerados, estudos os quais serão apresentados nas seções 4.3.3 e 4.3.4. Os estudos referem-se à ponderação mais intensa da função objetivo de modo a limitar ainda mais o número de realocações de tarefas e restringir as alterações apenas às tarefas que estão nas estações de trabalho em falha (seção 4.3.4) e a uma consideração em que somente algumas (poucas) tarefas podem ser alteradas, além das que são estritamente necessárias (seção 4.3.3).

**Figura 15 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



**Fonte: Autoria própria.**

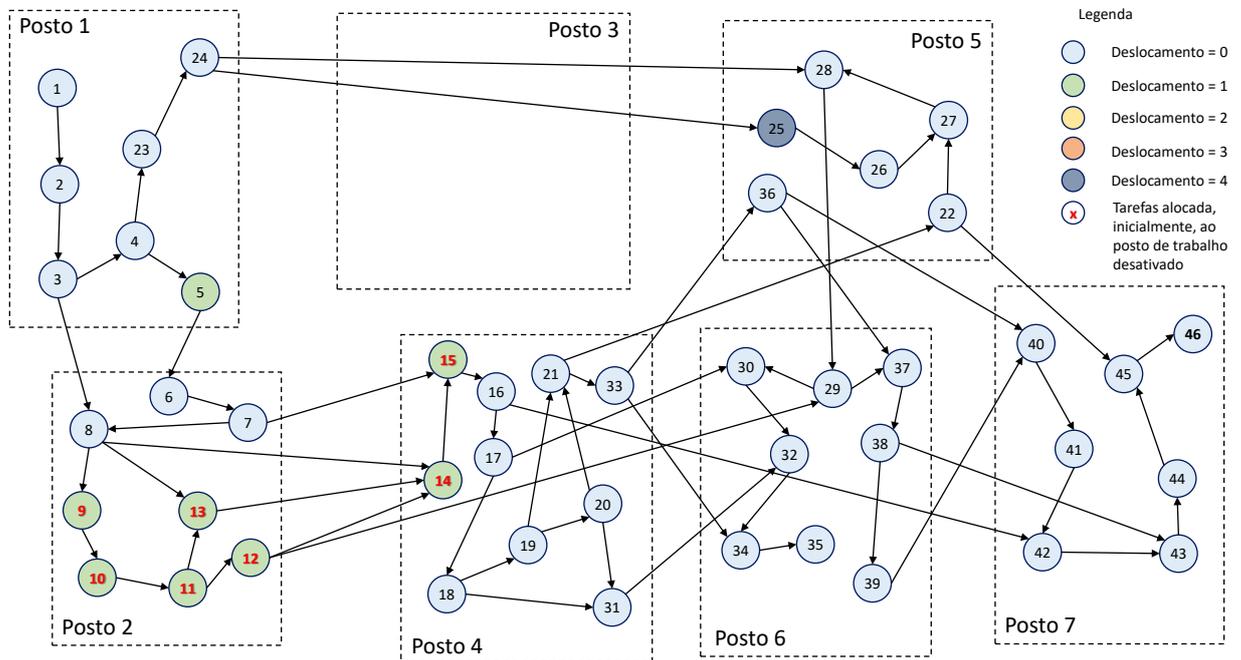
#### 4.3.3 Modo degradado - Realocação Limitada de Tarefas

A realocação limitada das tarefas nas estações de trabalho foi obtida aplicando fatores ponderativos aos termos da função objetivo. Para este caso, foi adotado um fator ponderativo da ordem de 5 unidades para o termo relacionado ao número de alterações ( $K = 5$ ) e de 1 unidade para o termo relacionado ao tempo de ciclo. Ou seja, a cada incremento de uma unidade no tempo de ciclo, a função objetivo tem aumento de uma unidade, ao passo que para cada aumento de uma unidade no número de alterações de tarefas na linha de montagem há um incremento de 5 unidades na função objetivo.

A imposição de fatores ponderadores aos termos da função objetivo limitam, neste caso, as alterações na disposição e ordenação das tarefas de modo que somente as mudanças estritamente necessárias para minimização do tempo de ciclo são realizadas e sugeridas como solução pelo modelo implementado.

Assim como nas seções anteriores, seções 4.3.1 e 4.3.2, foram realizados os mesmos 3 estudos de caso para obtenção de soluções para os modos degradados de produção, mas com a ponderação apresentada acima.

**Figura 16 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



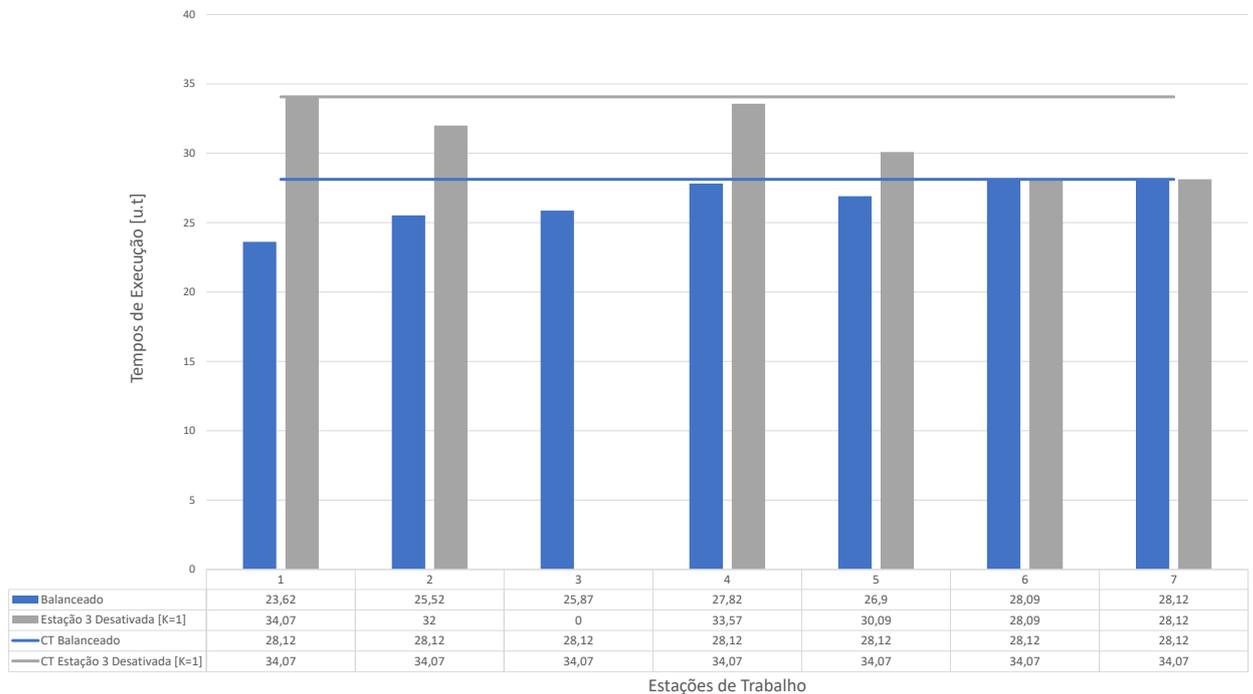
Fonte: Autoria própria.

Para o primeiro caso, modo degradado de produção para o Posto 1, os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 20 e 21, as quais representam, respectivamente, o diagrama de precedências para a nova disposição das tarefas e o tempo de ciclo da linha de montagem. Como solução, encontrou-se um tempo de ciclo de 34,65 u.t., 6,53 u.t. maior do que o  $CT$  para a linha atual balanceada. Esta nova condição proposta requer 8 realocações de tarefas das quais 7 estavam alocadas no Posto 1 e uma em alguma outra das 7 estações, realocação esta aqui denominada de “desnecessária”.

Partindo para o segundo caso, estação 3 operando em modo degradado, foram obtidos o diagrama de precedências e o tempo de ciclo apresentados nas Figuras 22 e 23. Comparando ao estado atual da linha de montagem, é possível perceber um aumento do tempo de ciclo de 28,12 u.t. para 40,35 u.t. Isto se deve ao fato da realocação de 7 tarefas da estação 3 nos demais postos de trabalho da linha de montagem.

Por fim, o terceiro caso, falha das estações 1 e 3 simultaneamente. Assim como nos resultados obtidos para os dois casos anteriores, ocorreu um aumento do tempo de ciclo de 28,12 u.t. para 48,82 u.t. e na realocação de 14 tarefas (7 de cada um dos postos de trabalho) nas demais estações operantes. O diagrama de precedências, bem como o tempo de ciclo da

**Figura 17 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



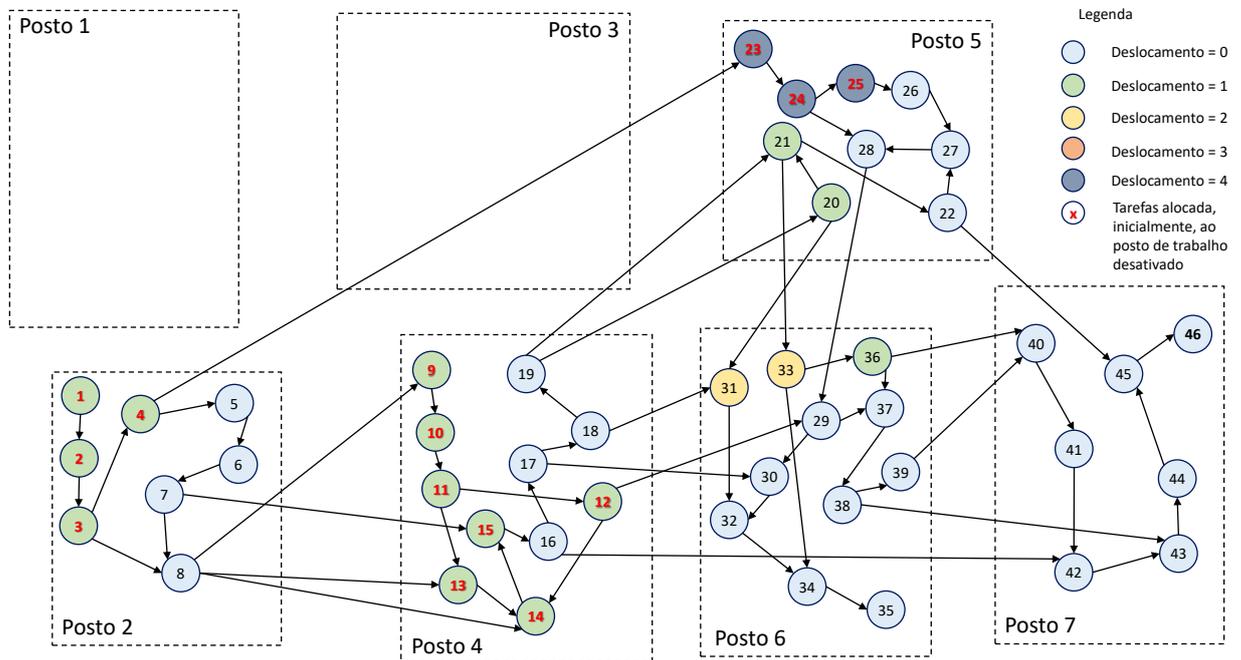
**Fonte: Autoria própria.**

disposição com a solução proposta, são apresentados, respectivamente, nas Figuras 24 e 25.

#### 4.3.4 Modo degradado - Realocação Restrita de Tarefas

O terceiro e último estudo desta seção é similar ao da subseção 4.3.3, divergindo apenas no fator utilizado para ponderação da função objetivo, adotando-se agora  $K = 10$ . Este fator passou a ser o dobro do valor adotado na seção anterior. A existência deste fator ponderativo mais elevado tornou muito oneroso para o modelo matemático a alteração de tarefas nos postos de trabalho, restringindo-o a, em termos práticos, apenas efetuar as realocações das tarefas pertencentes aos postos de trabalho que estão em falha. Este fato tende a aumentar o tempo de ciclo da linha de montagem, resultando, à primeira vista, em soluções não satisfatórias. Porém, analisando do ponto de vista de restabelecimento da linha para os casos de falha das estações mencionadas, modo degradado, esta solução se torna interessante pois permite a continuidade das operações fabris e da produção, mesmo que com um tempo de ciclo superior aos encontrados para os estudos anteriores, mas com um custo menor de alteração e readequação da linha de montagem.

**Figura 18 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente, considerado a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



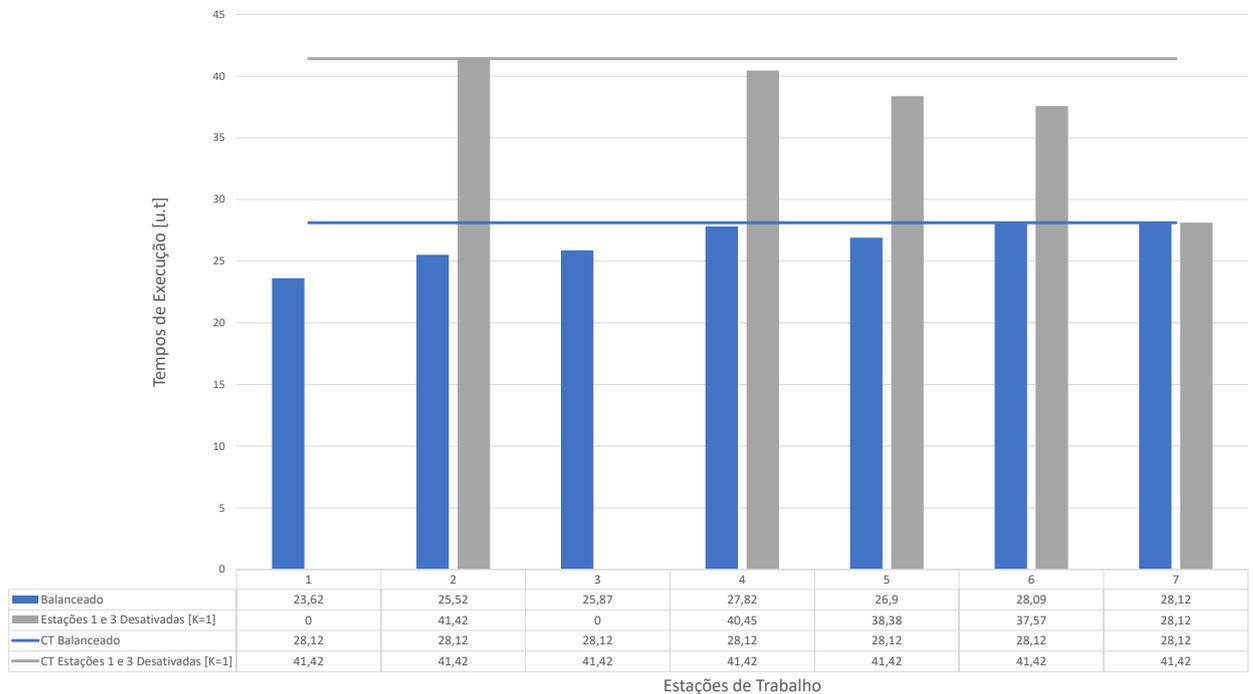
Fonte: Autoria própria.

De maneira a permitir a comparação de resultados, os mesmos 3 casos estudados nas seções anteriores serão utilizados para a confecção desta. Primeiramente, analisando o modo degradado para o Posto 1, foi encontrado como solução proposta pelo modelo matemático a realocação das tarefas como apresentado na Figura 26. Ainda baseando-se nesta solução, foi encontrado um tempo de ciclo de 49,14 u.t., 21,02 u.t. maior do que o  $CT$  no qual a linha de montagem opera no modo atual, como pode ser vislumbrado na Figura 27.

O segundo caso analisado consistiu na linha de montagem operando de modo degradado para o Posto 3. Neste caso, foram obtidos o diagrama de precedências e o tempo de ciclo apresentados nas Figuras 28 e 29. Assim como os resultados obtidos para o modo degradado da estação de trabalho 1, é perceptível um aumento do tempo de ciclo da ordem de 13,37 u.t., atingindo o valor de 41,49 u.t.

Por fim, no terceiro e último caso desta seção, modo degradado de produção para as estações 1 e 3, simultaneamente, obteve-se como solução proposta pelo modelo matemático a disposição das tarefas nas estações conforme apresentado na Figura 30. Além disso, o tempo de ciclo encontrado foi de 48,82 u.t, como mostra a Figura 31. Para este caso, obteve-se um valor 20,70 u.t. superior ao  $CT$  da linha operando em modo otimizado. A seção 4.4 a seguir comple-

**Figura 19 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a redução no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



**Fonte: Autoria própria.**

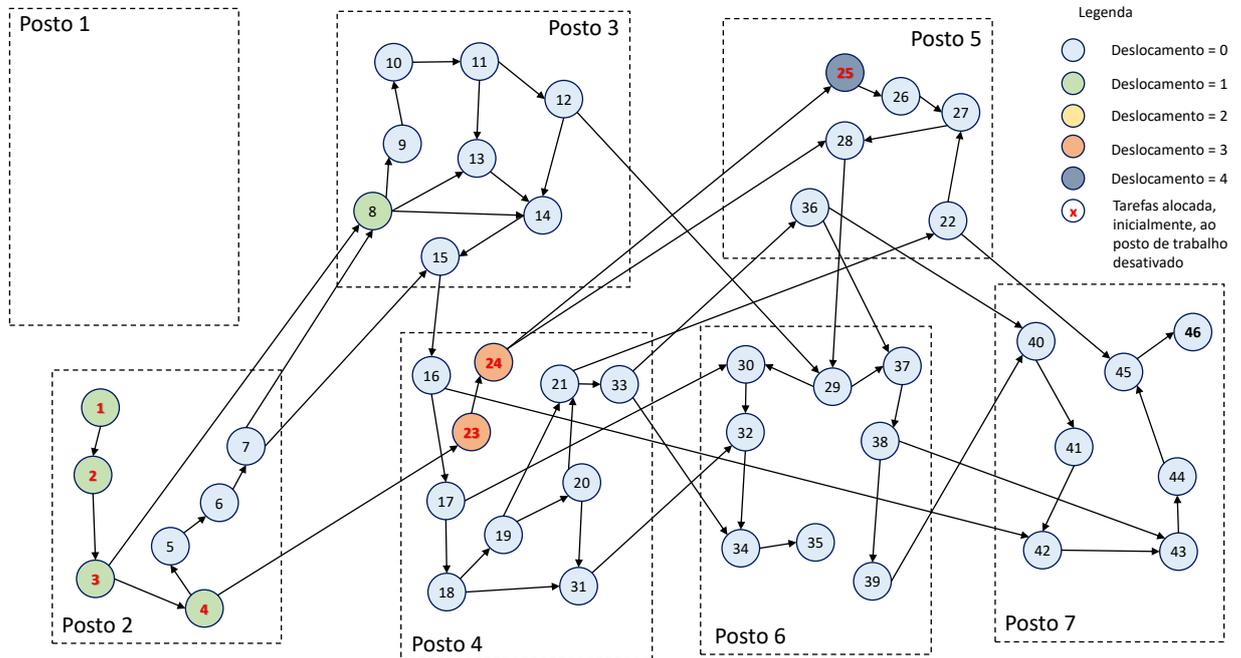
menta os estudos conduzidos até o presente momento, na medida que avalia a possibilidade de encontrar um número mínimo de realocações, dada uma flexibilização do tempo de ciclo.

#### 4.4 MODO DEGRADADO - MINIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE REALOCAÇÕES DE TAREFAS EM FUNÇÃO DO AUMENTO DO TEMPO DE CICLO PERMITIDO

O presente estudo envolveu a execução do modelo matemático em sua segunda etapa (fase 2), a qual não mais visa minimizar o tempo de ciclo mas sim minimizar a quantidade de realocações de tarefas na linha de montagem para um dado tempo de ciclo máximo ( $CT_{max}$ ). Para o tempo de ciclo máximo, é considerado um aumento percentual do tempo de ciclo ótimo para a linha operando em modo degradado (obtido, por exemplo, com  $K = 0$  na fase 1). O tempo de ciclo ótimo pode ser identificado nas Figuras 32, 33 e 34, na coluna denominada de 0%. Foram executados estudos para os 3 casos analisados: estação 1 operando em modo degradado; estação 3 operando em modo degradado; e estações 1 e 3 operando em modo degradado simultaneamente, os mesmos realizados para a fase 1 de execução do modelo matemático.

Os aumentos percentuais permitidos no tempo de ciclo foram avaliados a partir da

**Figura 20 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

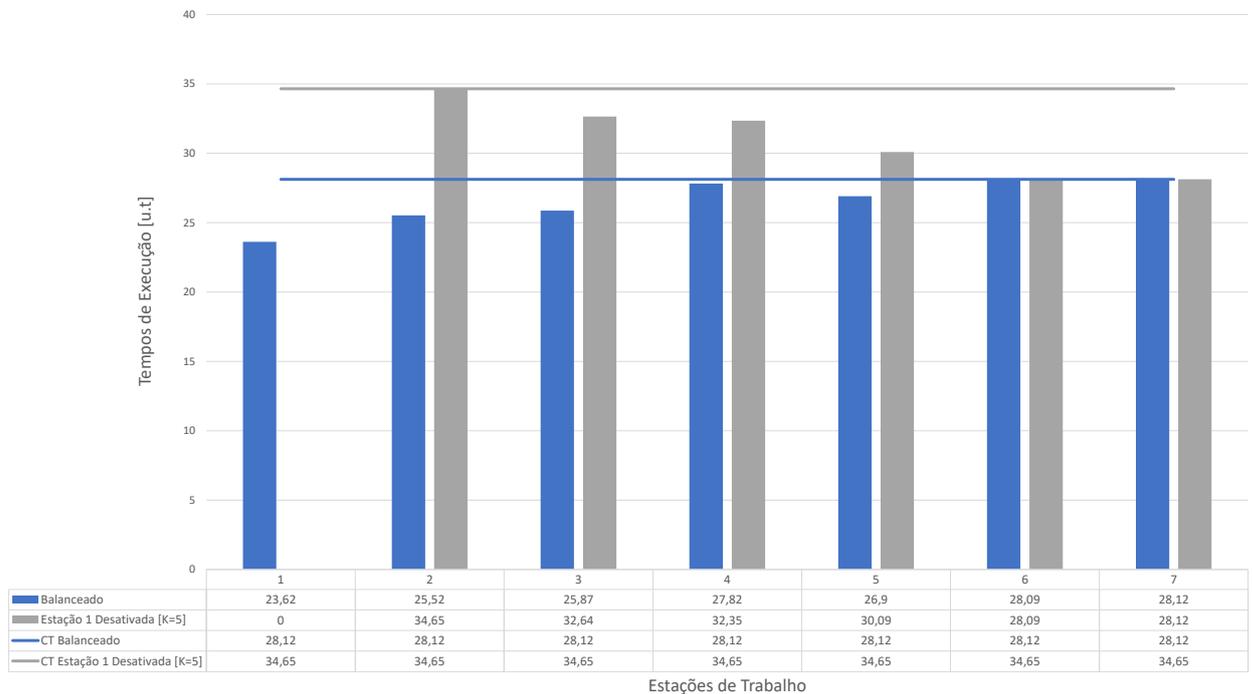


**Fonte: Autoria própria.**

observação da redução na quantidade de realocações de tarefas na linha de montagem, ou seja, permitia-se um aumento no tempo de ciclo (*e.g.*, 1%, 3%, ..., 35%) e avaliava-se se o referido aumento propiciava reduções no número de realocações necessárias de tarefas. O valor máximo permitido para o tempo de ciclo foi estabelecido quando percebeu-se que a quantidade de realocações sugeridas pelo modelo se igualava ao montante mínimo de alterações necessários na linha de montagem, ou seja, a quantidade de tarefas que se encontravam originalmente alocadas nas estações 1, 3, 1 e 3 simultaneamente.

A primeira análise realizada considerou a linha de montagem com a estação 1 operando em modo degradado. Como apresentado na Figura 32, ao passo que o tempo de ciclo máximo permitido na linha de montagem se eleva, menor tende a ser a quantidade de realocações de tarefas necessárias na linha de montagem. Isso se deve ao fato de que quanto mais flexíveis as restrições impostas ao modelo matemático, melhores tendem a ser os resultados obtidos. No caso em questão, por exemplo, quando é permitido um aumento de 1% no tempo de ciclo, faz-se necessária a realocação de 15 tarefas na linha de montagem, enquanto que um aumento percentual de 10% requer a realocação de 8 tarefas e, para um aumento de 30%, é necessária a realocação de 7 tarefas.

**Figura 21 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

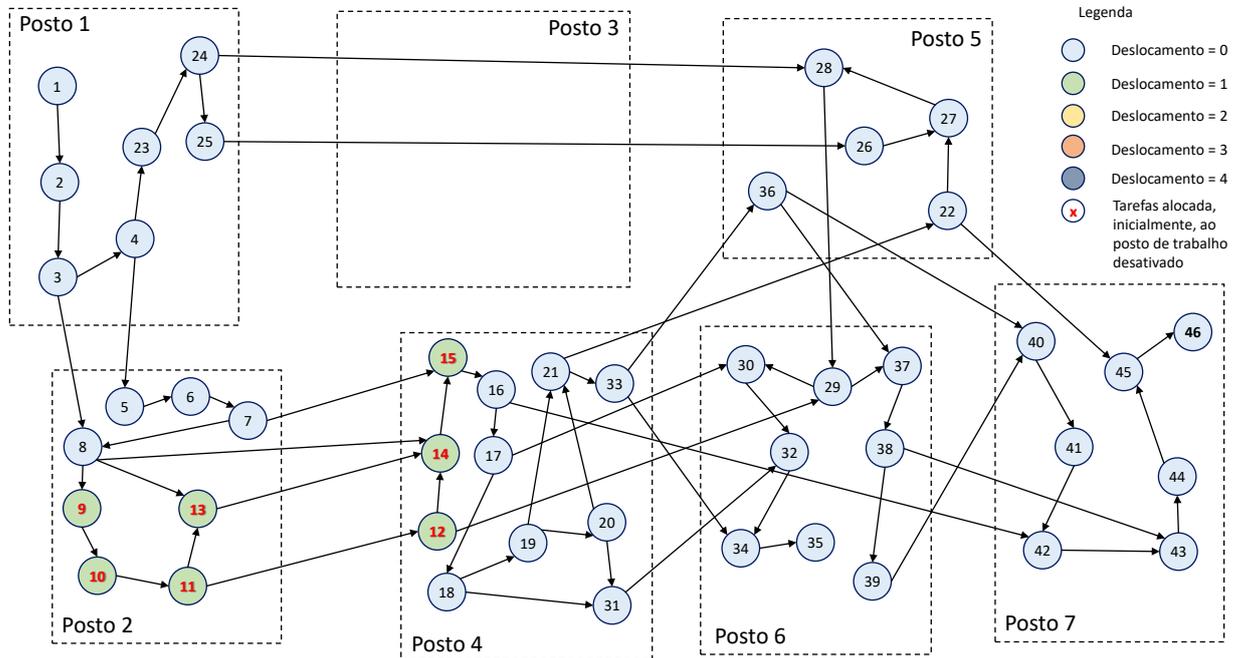


**Fonte: Autoria própria.**

Comparando os resultados apresentados na Figura 32 com os resultados apresentados nas subseções 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4, é possível perceber que a realocação livre das tarefas nas estações de trabalho com minimização do número de alterações de tarefas, considerando apenas a estação 1 operando em modo degradado, equivale, aproximadamente, ao aumento de 9% no tempo de ciclo ótimo. Como resultado, ambos obtiveram a realocação de 8 tarefas na linha de montagem. O segundo caso, realocação limitada das tarefas, pode ser comparado, também, ao aumento de 9% no tempo de ciclo. Com isso, assim como para o primeiro caso, a quantidade de alterações de tarefas na linha de montagem foi valorado em 8 alterações. Para o terceiro caso, realocação restrita das tarefas nas estações de trabalho, é possível a comparação com o aumento percentual de, aproximadamente, 30% no tempo de ciclo ótimo. Neste caso, o número de realocações de tarefas ficou em 7. Este valor é o mínimo permitido pelo modelo uma vez que se faz necessária a realocação de todas as tarefas alocadas, originalmente, na estação de trabalho em questão, ou seja, 7 tarefas.

Abordando a segunda análise realizada, considerando a estação 3 operando em modo degradado, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 33. Assim como na situação anterior (estação 1 operando em modo degradado), os resultados apontam que quanto mais

**Figura 22 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

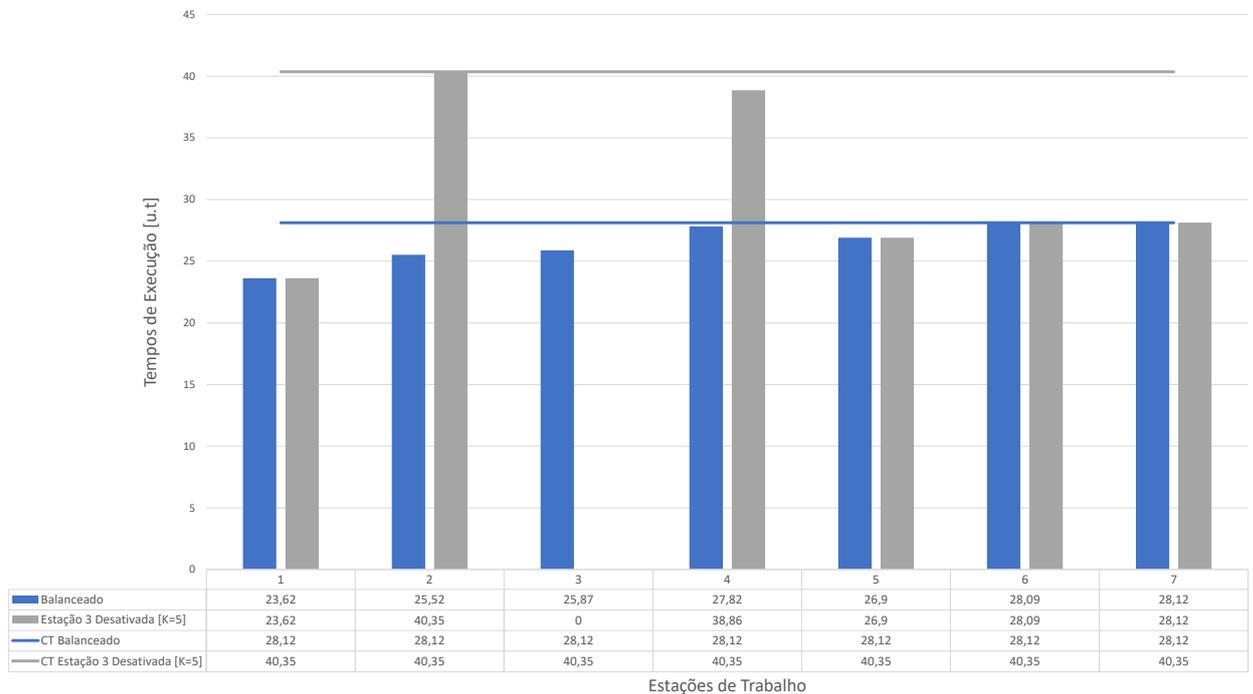


Fonte: Autoria própria.

flexível a restrição do tempo de ciclo, menor é o número de alterações necessárias na linha de montagem de modo a atender as restrições impostas. Com isso, quando é permitido um aumento de 1% no tempo de ciclo, em relação ao tempo de ciclo ótimo, faz-se necessária a realocação de 15 tarefas na linha; com um aumento de 10% no tempo de ciclo, 9 tarefas devem ser redistribuídas na linha de montagem e, para um aumento de 30%, é necessária a realocação de 7 tarefas na linha de montagem. Comparando os resultados ilustrados na Figura 33 com os resultados apresentados nas Figuras 17, 23 e 29, é possível perceber que o caso em que foi considerado a realocação livre das tarefas com a minimização do número de alterações de tarefas (Figura 17), se aproxima ao apresentado quando um aumento de 7% do tempo de ciclo é aplicado. Com isso, faz-se necessário a realocação de 9 tarefas na linha de montagem, para ambos os casos.

Permitindo um aumento de 30% no tempo de ciclo, os resultados podem ser aproximados ao caso de realocação limitada das tarefas nas estações de trabalho (Figura 23). Neste caso, para ambos os cenários, o montante de tarefas que precisam ser realocadas nas estações de trabalho é valorado em 7, contemplando a totalidade de tarefas previamente alocadas na estação 3. Esta comparação de resultados merece uma ressalva visto que comparando os tempos de ciclo, o caso de realocação limitada das tarefas nas estações de trabalho ( $CT = 40,35$  u.t) se

**Figura 23 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

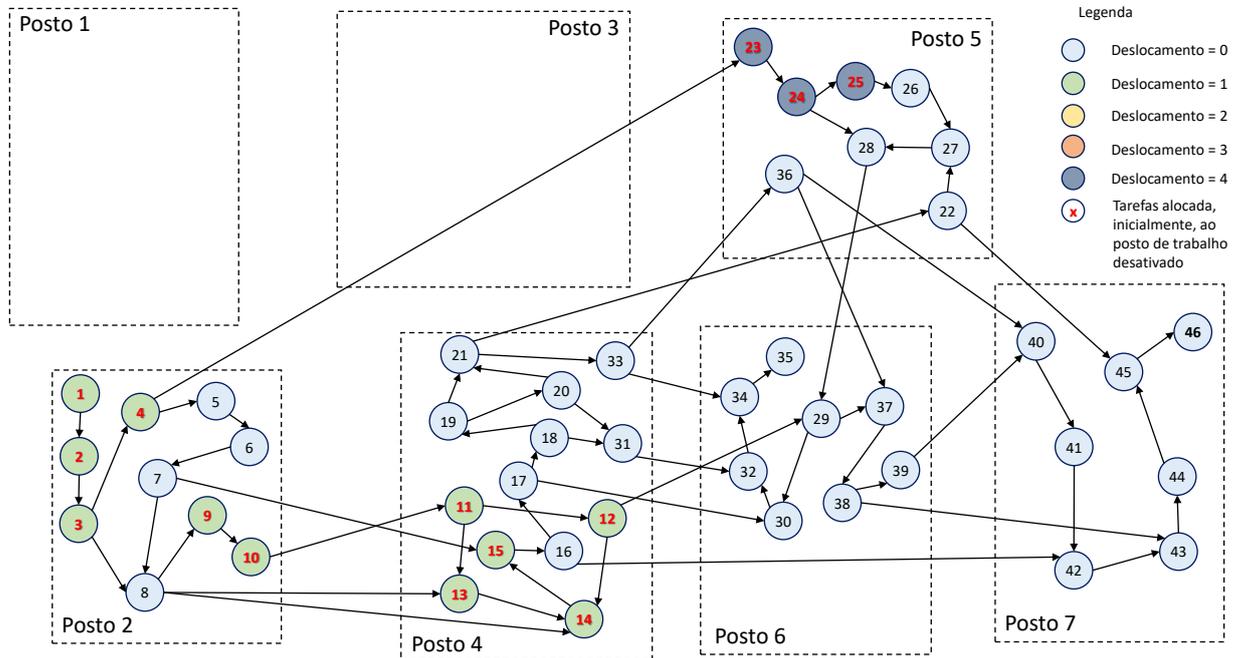


**Fonte: Autoria própria.**

aproxima mais do caso em que é permitido um aumento de 25% do tempo de ciclo ( $CT = 39,9$  u.t), do que quando o aumento do tempo de ciclo é de 30% ( $CT = 41,5$  u.t). Porém, os resultados em comparação são relativos ao número de alterações na linha de montagem, justificando as comparações apresentadas. Por fim, no caso de realocação restrita das tarefas nas estações de trabalho (Figura 29), é possível a comparação com um aumento percentual de 30% no tempo de ciclo ótimo. Neste caso, o número de realocações de tarefas ficou em 7. Assim como discutido anteriormente para a estação 1 operando em modo degradado, o número de tarefas a serem realocadas chegou ao seu valor mínimo, ou seja, ao número de tarefas que estavam, originalmente, alocadas na estação 3.

Por fim, o terceiro estudo realizado, considerando a linha de montagem operando com as estações de trabalho 1 e 3 atuando em modo degradado simultaneamente, culminou nos resultados apresentados na Figura 34. Assim como apresentado para os dois casos anteriores foi realizada uma comparação com os três tipos de realocação previamente apresentados. Para a primeira, é possível comparar um aumento percentual de 15% no tempo de ciclo ótimo com a realocação livre das tarefas nas estações de trabalho, e com a minimização da quantidade de alterações. Neste caso, foram necessárias a realocação de 19 tarefas. Para o segundo caso,

**Figura 24 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, simultaneamente, considerado a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



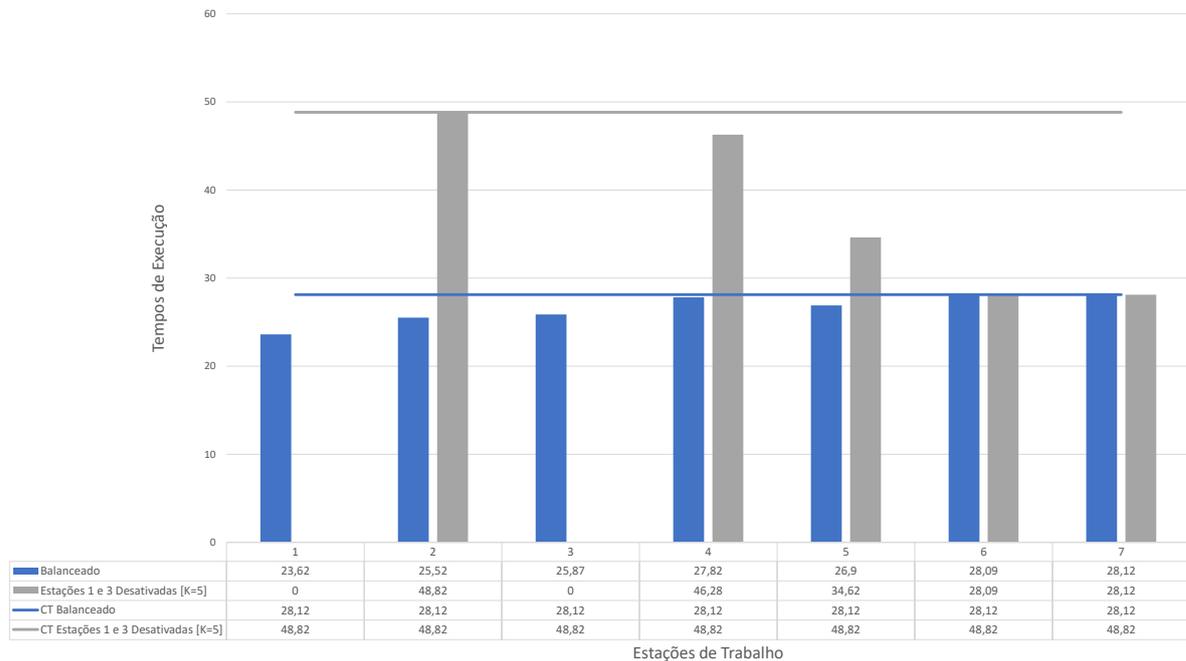
Fonte: Autoria própria.

a comparação a ser feita é do aumento percentual de 35% no tempo de ciclo ótimo, com a realocação limitada das tarefas. Como solução, foi sugerida a realocação de 14 tarefas. Por fim, o terceiro caso pode ser verificado pela comparação do aumento percentual de 35% no tempo de ciclo ótimo com a realocação restrita das tarefas nas estações de trabalho, resultando na realocação de 14 tarefas. Esse montante de tarefas representa, assim como para os casos anteriores, a totalidade de tarefas originalmente alocadas nas estações de trabalho que estão operando em modo degradado.

#### 4.5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A formulação matemática em 2 fases proposta permitiu o desenvolvimento de estudos visando a obtenção de soluções para o modo degradado de produção no cenário em análise. Foram realizados estudos que avaliaram o impacto da desativação das estações de trabalho 1, 3 e 1 e 3 simultaneamente. Foram considerados os fatores: minimização do tempo de ciclo e minimização da quantidade de realocações de tarefas na linha da montagem. Estes fatores foram atrelados às fases 1 e 2 do modelo matemático, respectivamente. Os resultados da fase 1 de

**Figura 25 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a limitação no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



**Fonte: Autoria própria.**

execução do modelo foram sumarizados na Tabela 5, sendo  $K$  o fator de ponderação atribuído ao segundo termo da função objetivo da fase 1, responsável pela redução do número de alterações na disposição das tarefas na linha de montagem,  $CT$ , o tempo de ciclo para a condição analisada, e  $N$  o número de alterações necessárias na linha de montagem.

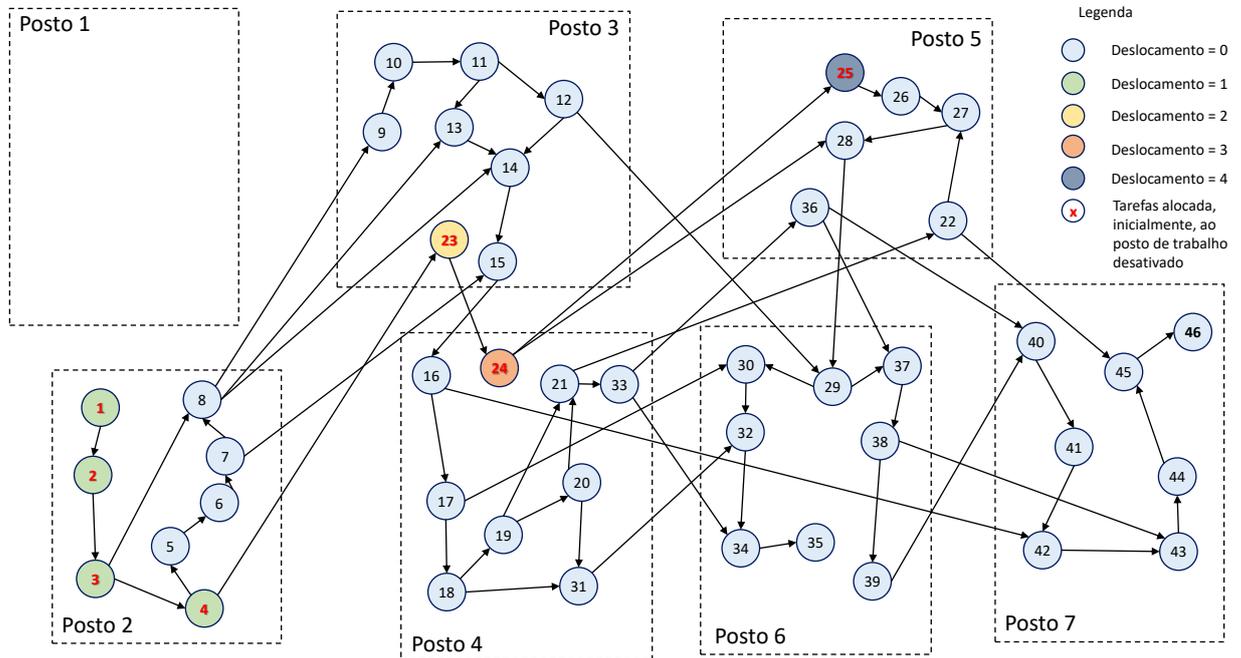
**Tabela 5 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo ( $CT$ ) e da quantidade de alterações requeridas ( $N$ )**

Caso\Fator de Ponderação	$K=0$		$K=1$		$K=5$		$K=10$	
	$CT$	$N$	$CT$	$N$	$CT$	$N$	$CT$	$N$
<b>Posto 1 fechado</b>	31,92	21	34,65	8	34,65	8	41,42	7
<b>Posto 3 fechado</b>	31,92	20	34,07	9	40,35	7	40,35	7
<b>Postos 1 e 3 fechados</b>	37,53	34	41,42	19	48,82	14	48,82	14

**Fonte: Autoria própria.**

Os valores apresentados na Tabela 5 representam os tempos de ciclo para as soluções propostas para cada um dos 3 modos degradados de produção, para os quatro estudos previamente realizados e explicitados nas seções 4.3.1 a 4.3.4. As colunas intituladas de  $K = 0$  representam os resultados para a realocação livre das tarefas nas estações de trabalho, sem a punição da função objetivo para as realocações sugeridas pelo modelo. Esta condição apresentou a melhor solução em termos de tempo de ciclo, uma vez que o modelo é menos “engessado” e possui

**Figura 26 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 1, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



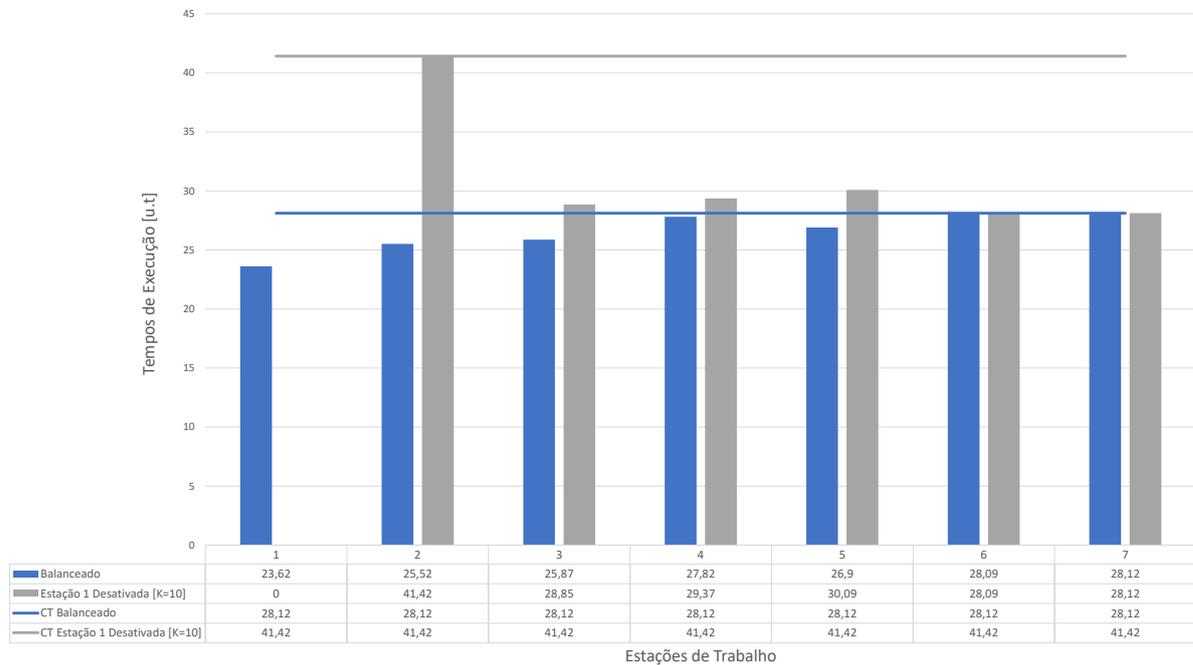
Fonte: Autoria própria.

liberdade para fazer tantas realocações de tarefa quanto forem necessárias, sem a consequente punição da função objetivo. Em termos de minimização do  $CT$  e (re)balanceamento da linha de montagem este resultado é o mais satisfatório, pois apresenta o menor aumento do tempo de ciclo quando comparado ao  $CT$  da linha balanceada, 28,12 u.t. Porém, analisando a implementação operacional, a solução é pouco viável (ou somente viável para grandes paradas de linha), pela quantidade de realocações de tarefas nas estações necessárias para atingir o  $CT$  indicado.

O segundo estudo considerou a ponderação dos dois termos da função objetivo pelo mesmo peso,  $K = 1$ . Neste caso as soluções encontradas se mostraram mais próximas de um contexto que poderia ser implementado. Contudo, a solução ainda não é a mais satisfatória em relação à facilidade de implementação operacional em função do número de alterações que demanda, se tornando, de modo análogo ao primeiro caso, uma solução onerosa para ser implementada operacionalmente.

Os resultados obtidos para o terceiro estudo realizado se mostraram mais promissores em relação à facilidade de implementação operacional, mas com maiores valores de  $CT$  em comparação ao caso com  $K = 0$ . Com  $K = 5$ , para cada realocação de tarefas realizada pelo modelo, a função objetivo é penalizada com o acréscimo de 5 unidades em seu valor, ao passo que

**Figura 27 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 1 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**

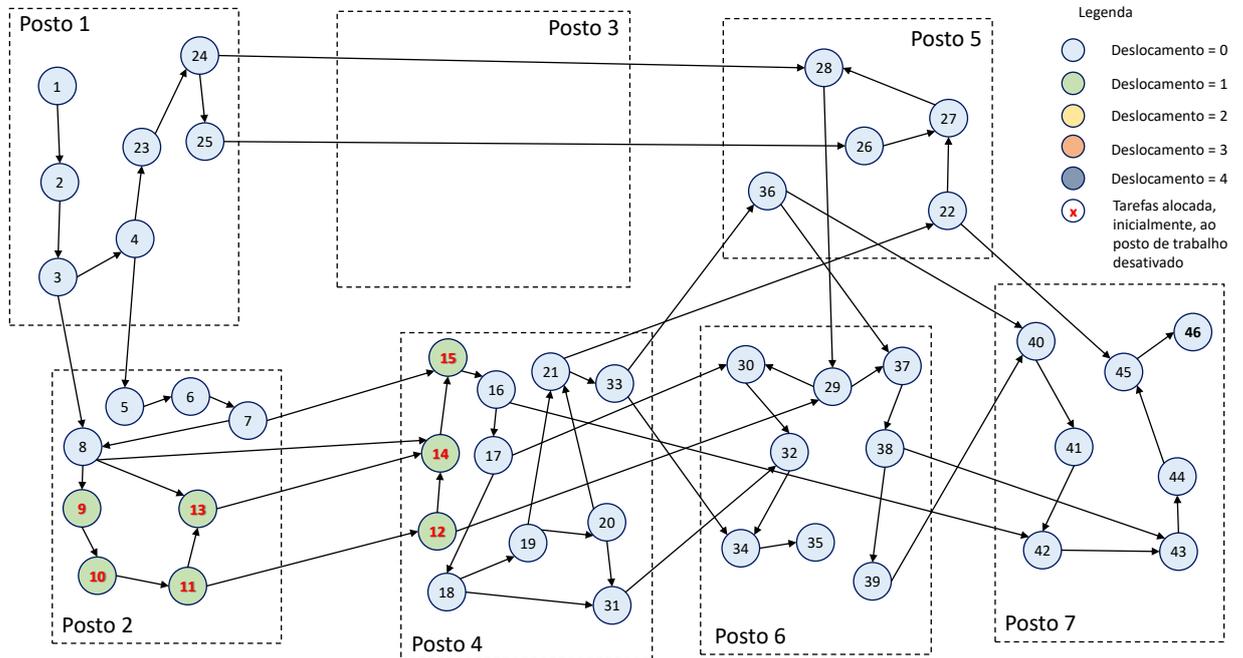


**Fonte: Autoria própria.**

para cada aumento de uma unidade no tempo de ciclo, a função objetivo é penalizada com uma unidade. Esta ponderação maior foi utilizada para limitar o número de alterações realizadas pelo modelo matemático, resultando, como apresentado na seção 4.3.3, em um aumento do tempo de ciclo e redução no número de alterações demandadas para obtenção do primeiro. Esta solução se mostrou promissora para implementação, visto que demandou a realocação de poucas tarefas além daquelas realizadas nas estações operando em modo degradado, estas que são obrigatórias.

Por fim, no quarto e último caso analisado considerou-se, na prática, somente alterações das tarefas executadas nos postos de trabalho que operam de modo degradado. Aplicou-se um fator de ponderação de  $K = 10$  para o segundo termo da função objetivo. Esta ponderação foi suficiente para atender o proposto. Analisando os tempos de ciclo obtidos pelo modelo matemático, os valores de  $CT$  foram maiores que o existente para o balanceamento de linha atual e que os resultados encontrados para os estudos anteriores, com exceção da condição de limitação da função objetivo, seção 4.3.3, a qual apresentou, para dois dos casos analisados (Posto 3 fechado e Postos 1 e 3 fechados simultaneamente), os mesmos resultados que a condição de restrição das alterações, seção 4.3.4. Do ponto de vista de implementação operacional, a solução obtida com  $K = 10$  requer um número mínimo de realocações de tarefas na linha de

**Figura 28 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha da estação de trabalho 3, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



Fonte: Autoria própria.

montagem, com conseqüente mínima realocação de ferramental e equipamentos, o que resulta menores custos e adaptações do sistema produtivo.

A análise dos resultados obtidos para a fase 2 é sumarizada nas Tabelas 6 e 7. Observa-se que quanto maior o tempo de ciclo da linha de montagem, ou o tempo de ciclo permitido para a linha de montagem, menor o número de realocações de tarefas requeridas pelo modelo matemático de modo a obter a resposta otimizada.

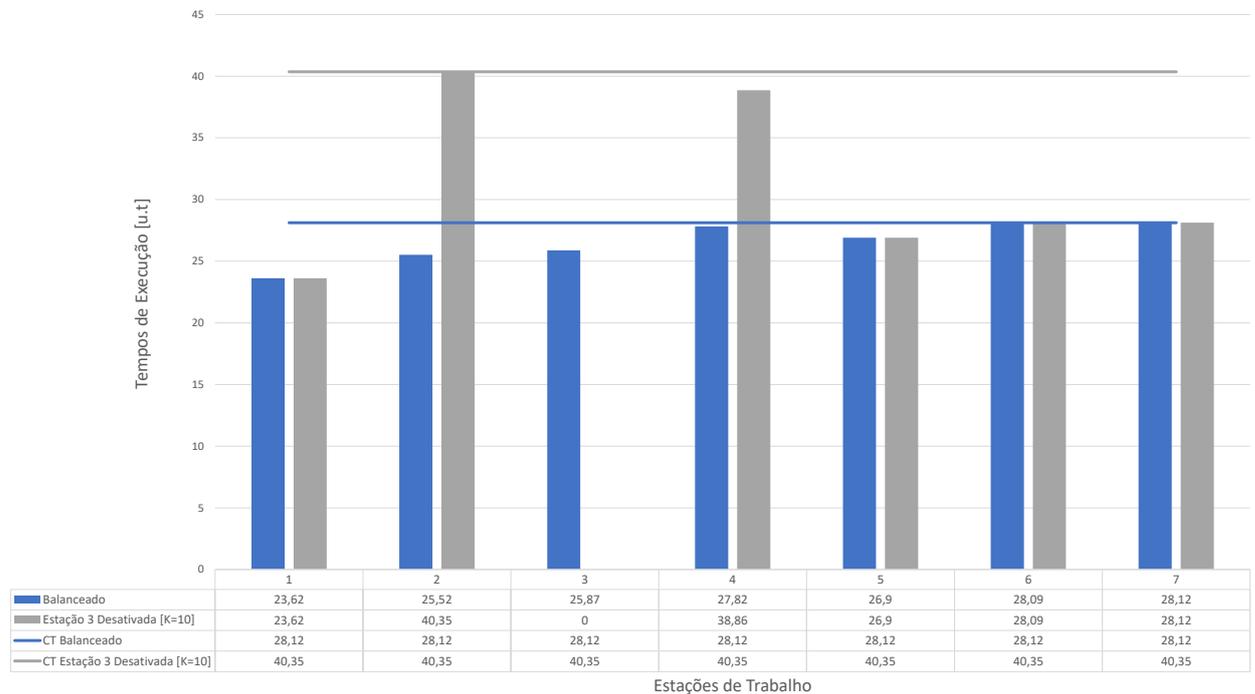
**Tabela 6 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo (CT) e da quantidade de alterações requeridas (N) para a fase 2 do estudo. Considerando aumentos percentuais de até 10% no Tempo de Ciclo**

Caso\Aumento Percentual	1%		3%		5%		7%		9%		10%	
	CT	N	CT	N	CT	N	CT	N	CT	N	CT	N
<b>Posto 1 Fechado</b>	32,24	15	32,88	13	33,52	12	34,16	11	34,8	8	35,11	8
<b>Posto 3 Fechado</b>	32,24	15	32,88	11	33,52	11	34,16	9	34,8	9	35,11	9
<b>Postos 1 e 3 Fechados</b>	37,9	27	38,65	26	39,4	24	40,15	24	40,9	23	41,28	21

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado nas Tabelas 6 e 7, a medida que um aumento do tempo de ciclo é evidenciado, menores as quantidades de realocações de tarefas necessárias na linha de montagem. Isso ocorre, assim como para o caso da fase 1 de execução, devido à maior

**Figura 29 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com o Posto 3 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



Fonte: Autoria própria.

**Tabela 7 – Comparação dos resultados para o modo degradado de produção, por meio do Tempo de Ciclo (CT) e da quantidade de alterações requeridas (N) para a fase 2 do estudo. Considerando aumentos percentuais do Tempo de Ciclo de 10 a 35%.**

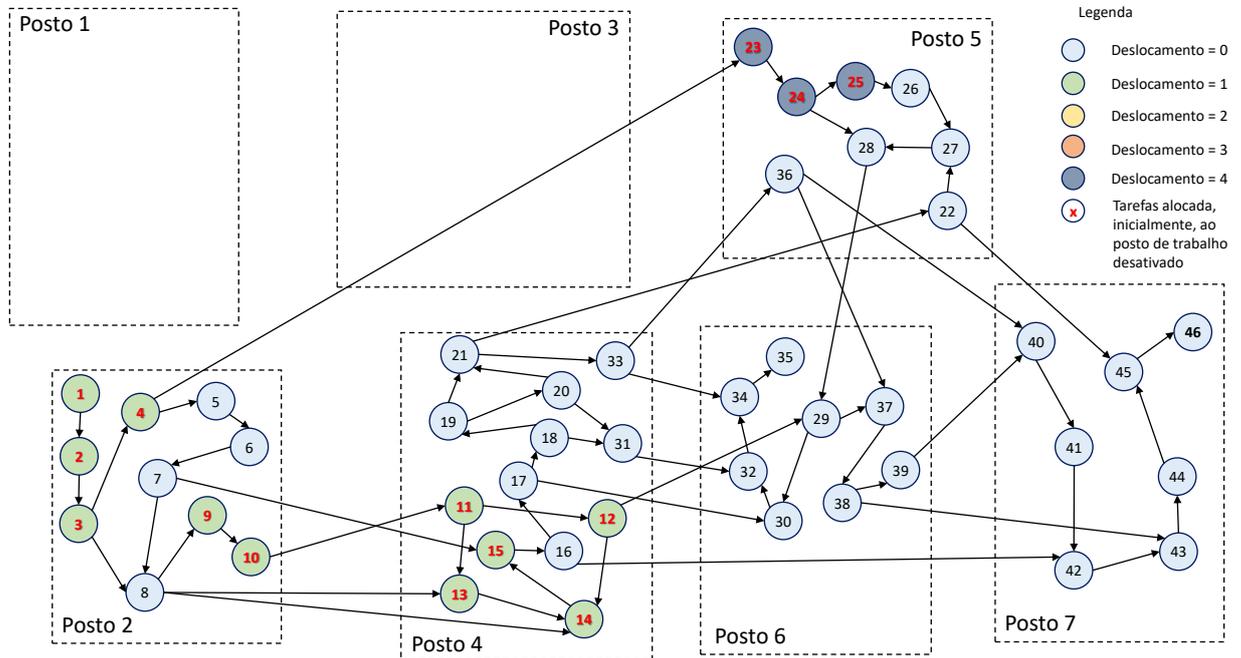
Caso\Aumento Percentual	10%		15%		20%		25%		30%		35%	
	CT	N										
<b>Posto 1 Fechado</b>	35,11	8	36,71	8	38,31	8	39,9	8	41,5	7	43,1	7
<b>Posto 3 Fechado</b>	35,11	9	36,71	9	38,31	8	39,9	8	41,5	7	43,1	7
<b>Postos 1 e 3 Fechados</b>	41,28	21	43,16	19	45,03	16	46,91	15	48,78	15	50,66	14

Fonte: Autoria própria.

flexibilidade do modelo em encontrar as soluções diante das restrições impostas. Com isso, evidencia-se que a utilização de aumentos percentuais relativamente pequenos (até 10%) no tempo de ciclo implica soluções com um número de alterações requeridas relativamente elevado. Por outro lado, elevar o *CT* em 10% significa reduzir a produção em 10%.

De modo a exemplificar numericamente o contexto apresentado, considere-se a seguinte condição: supondo que a empresa analisada possui a linha de montagem operando com a estação 1 em modo degradado de produção e é capaz de produzir 1 produto por minuto; a linha opera em um único turno, ininterrupto, de 8 horas, por dia, produzindo 480 produtos por dia. Supondo que a fábrica optou por aumentar o tempo de ciclo de produção da linha de montagem em questão em 10%, a mesma não é mais capaz de produzir 1 equipamento por minuto. Esta taxa, agora,

**Figura 30 – Diagrama de precedências para a condição balanceada da linha de montagem, considerando a falha das estações de trabalho 1 e 3, considerado a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



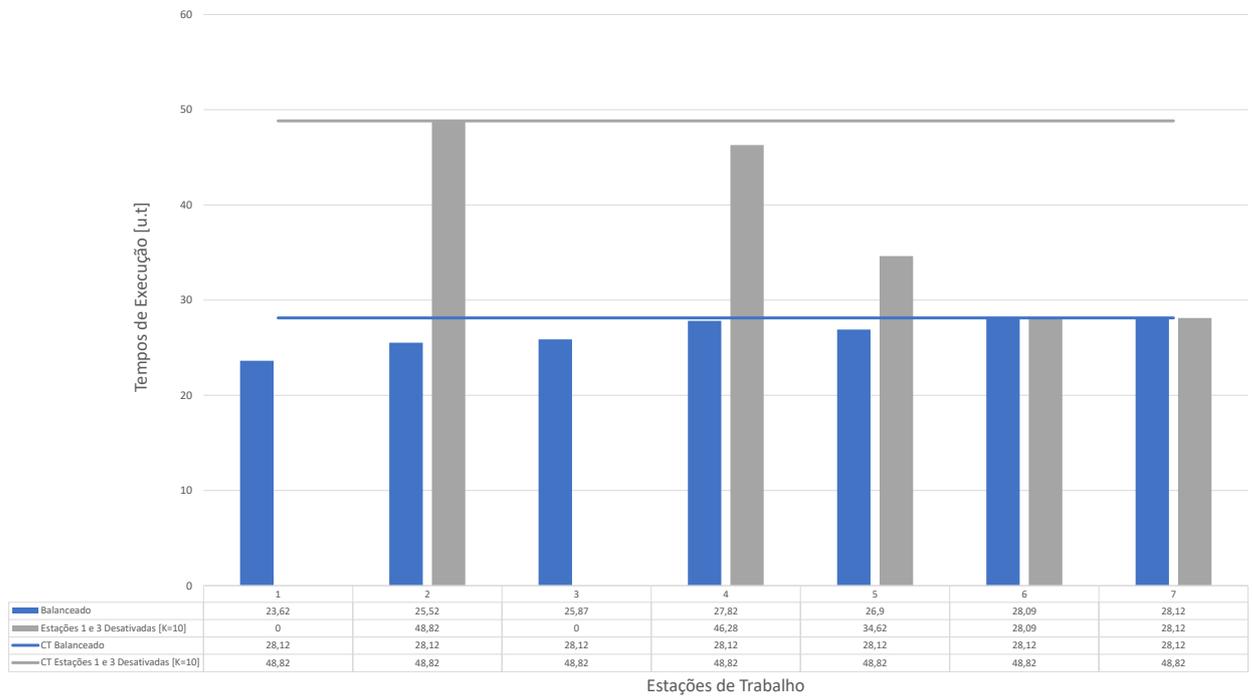
Fonte: Autoria própria.

seria de 0,9 produtos por minuto. Ou seja, ao final de um único dia de trabalho, com as mesmas condições apresentadas anteriormente, esta linha produzirá 432 equipamentos, 10% a menos do que o produzido com a linha operando em condição “ótima” para o modo degradado de produção da estação 1.

Em suma, pode-se perceber que quanto menor o valor de  $CT$  para o (re)balanceamento de linha proposto pelo modelo matemático, maior a tendência de um maior número de mudanças de tarefas entre postos de trabalho. Este fato tende a dificultar a implementação operacional da solução proposta no ambiente fabril. Por outro lado, soluções menos satisfatórias em relação ao valor de  $CT$  representam um (re)balanceamento mais viável de ser implementado, em função do número reduzido de modificações requeridas de tarefas.

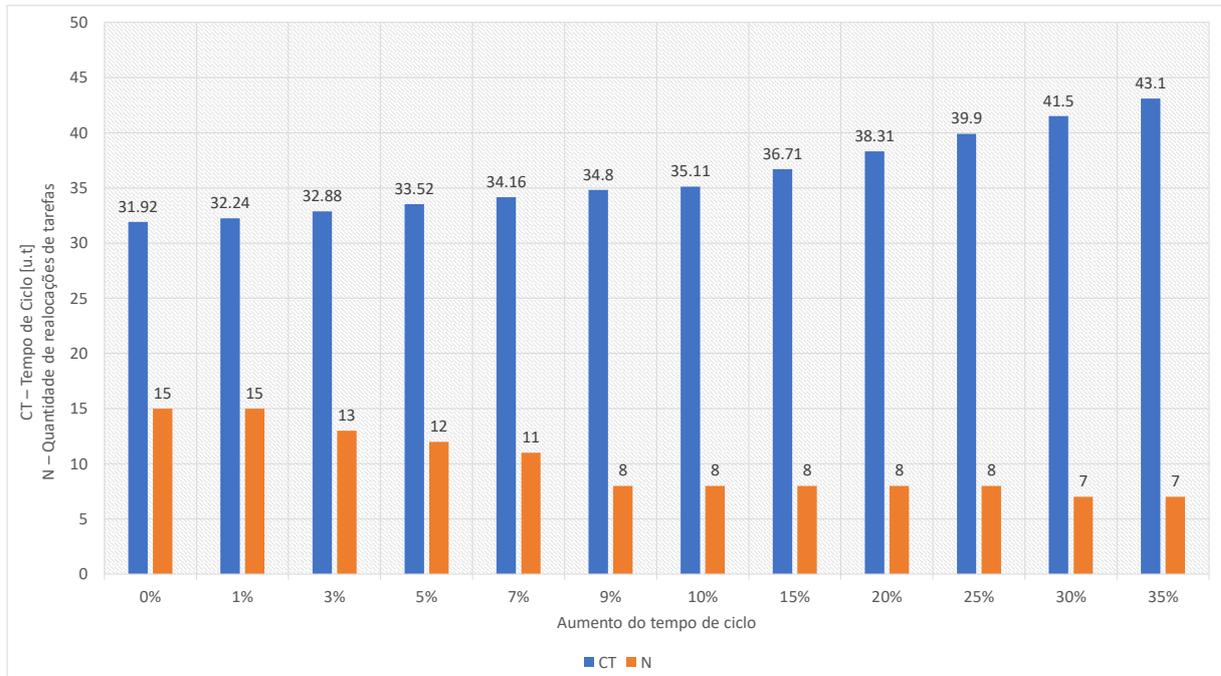
Conforme detalhado na seção 2.2.1, um indicador a ser observado no contexto de balanceamento de linhas é o índice de suavidade: quanto menor este valor, mais homogênea tende a ser a distribuição da carga de trabalho entre as estações. Por exemplo, o índice de suavidade presente na linha de montagem operando na condição atual (balanceada) é de 5,8; valor bastante baixo em termos práticos. Avaliando os índices de suavidade obtidos para os estudos realizados, pode-se verificar o quão satisfatório os rebalanceamentos realizados se

**Figura 31 – Tempos de execução das tarefas nas estações de trabalho. Linha de produção balanceada x Linha de produção operando com os Postos 1 e 3 em modo de falha, considerando a restrição no número de alterações das tarefas nas estações de trabalho**



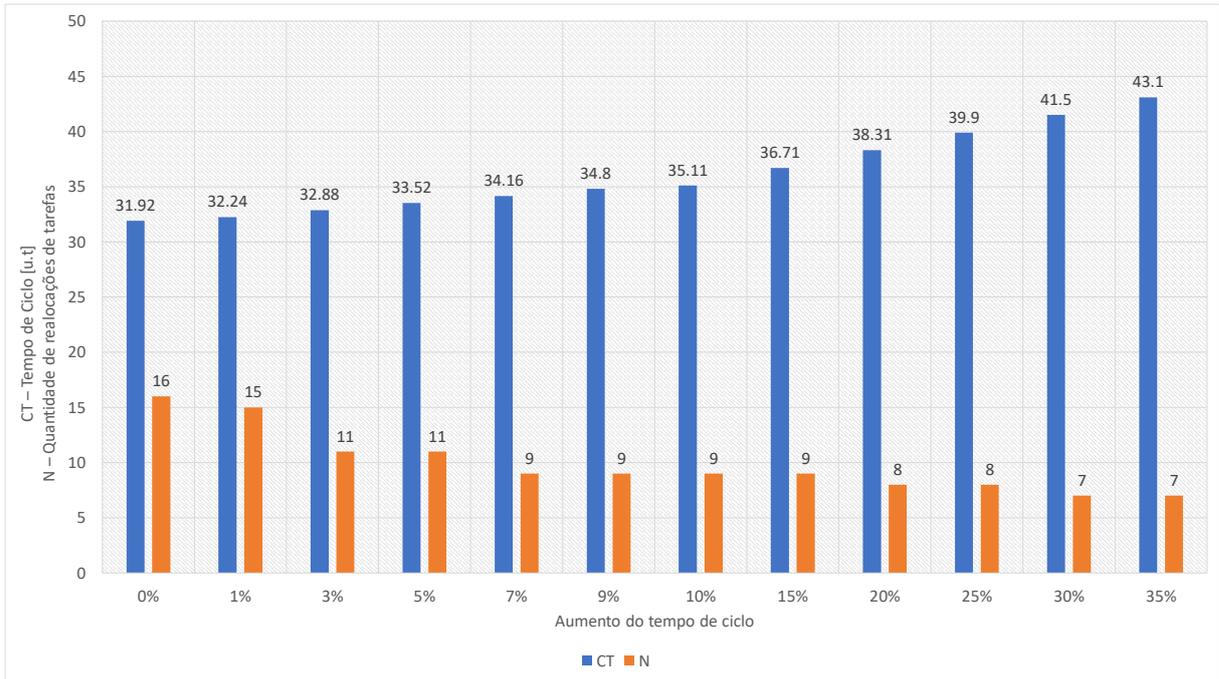
Fonte: Autoria própria.

**Figura 32 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para a estação 1 operando em modo degradado (N indica número de mudanças de tarefas).**



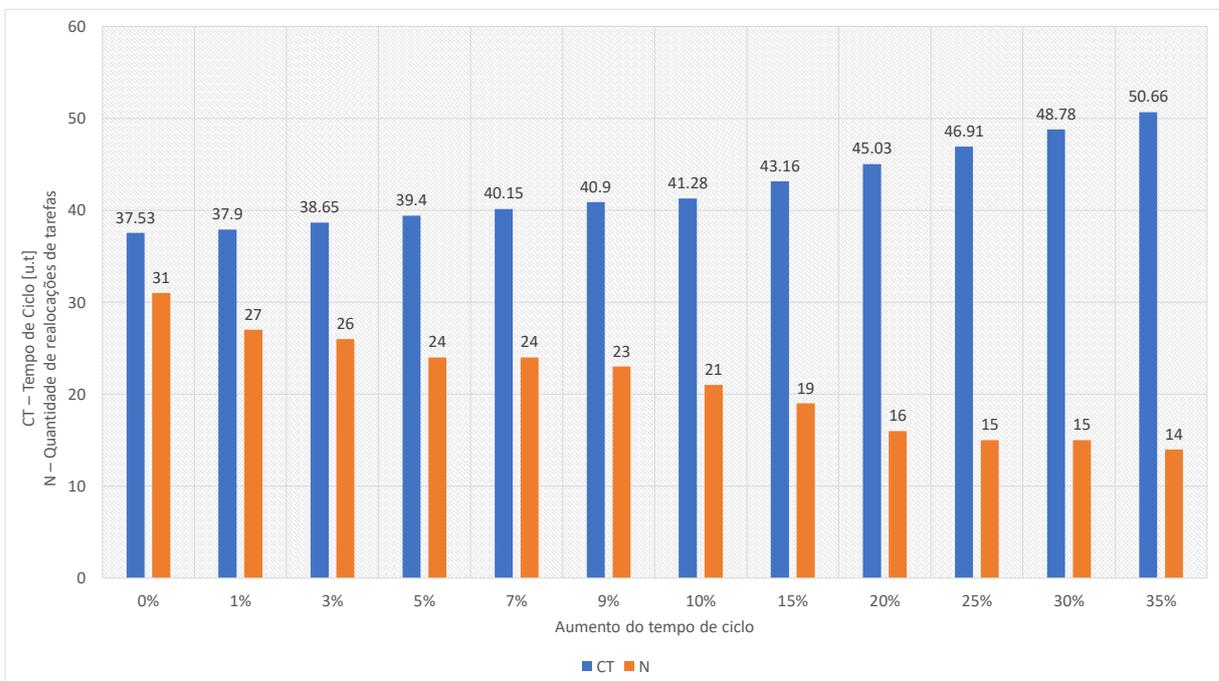
Fonte: Autoria própria.

**Figura 33 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para a estação 3 operando em modo degradado.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 34 – Minimização do número de realocações de tarefas na linha de montagem para as estações 1 e 3 operando em modo degradado, simultaneamente.**



Fonte: Autoria própria.

mostraram em relação a este indicador, conforme quantificado na Tabela 8.

**Tabela 8 – Índices de Suavidade para os rebalanceamentos propostos**

Caso\Fator de Ponderação	$K=0$	$K=1$	$K=5$	$K=10$
Posto 1 Fechado	32,06	36,57	36,28	50,02
Posto 3 Fechado	32,04	35,39	48,89	48,89
Postos 1 e 3 Fechados	53,09	60,27	76,38	76,38

**Fonte: Autoria própria.**

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, e tendo por base também os resultados da Tabela 5, percebe-se que os rebalanceamentos propostos atendem as características de minimização do tempo de ciclo ( $CT$ ), porém, não apresentam uma homogeneidade da distribuição dos tempos entre as diferentes estações de trabalho, sugerindo a existência de estações sobrecarregadas e estações ociosas na linha de montagem, mesmo com a adoção de um procedimento otimizado para o balanceamento. Este fato pode também ser visualmente constatado, por exemplo, por meio das Figuras 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29 e 31.

Em condições de falhas das estações, a tendência operacional é buscar soluções de relativa rápida adaptação e implementação, de modo que a linha continue em funcionamento. Soluções com baixos índices de suavidade tendem a ser de difícil obtenção ante a este contexto de contingência. Contudo, conhecer de antemão o rebalanceamento adequado (ou o melhor possível) em casos específicos de falha é de suma importância para se prover planos de ação para a operação em modo degradado. A abordagem de solução proposta, centrada na decomposição em 2 fases de modelos em Programação Linear Inteira Mista (Figura 5), permite, num primeiro passo, evidenciar o mínimo tempo de ciclo possível ante um contexto de balanceamento em modo degradado e, no passo seguinte, estabelecer uma solução de rebalanceamento que minimize o número de mudanças na linha, tendo por base a tolerância que se admite (*e.g.*, 1%, 3%, 5%) em relação ao mínimo tempo de ciclo possível.

O Capítulo 5 a seguir apresenta as principais considerações do trabalho desenvolvido e perspectivas de desenvolvimentos.

## 5 CONCLUSÕES

O presente capítulo apresenta as considerações finais das discussões apresentadas nesta dissertação, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros para prossecução do projeto de pesquisa aqui idealizado.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação baseou-se na possibilidade e necessidade da realização de um (re)balanceamento de uma linha de produção na qual duas das sete estações de trabalho apresentam históricos frequentes de falha. A otimização do balanceamento quando ocorrem as referidas falhas, ou seja, quando a linha opera em modo degradado, é fato importante no contexto fabril analisado.

De modo complementar, as pesquisas bibliográficas conduzidas na Fundamentação Teórica (Capítulo 2), em especial sobre a temática de rebalanceamento de linhas (seção 2.7), indicam um número relativamente pequeno de trabalhos na referida temática e um número ainda mais restrito que considera questões de operação em modo degradado. De fato, com a elaboração do Capítulo 2 obteve-se um maior entendimento e base para desenvolvimento do modelo matemático e entendimento dos possíveis resultados a serem obtidos. Estes itens foram fundamentais no auxílio da elaboração do Capítulo 3, o qual refere-se à Metodologia proposta para o desenvolvimento da dissertação.

Tendo por base as motivações prática e teórica citadas, oportunizou-se o desenvolvimento de um modelo de rebalanceamento de linhas de montagem para operação em modo degradado, o qual é composto por duas fases de execução. Este modelo baseou-se na aplicação de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), técnica definida na seção 2.6.2. Objetivou-se o rebalanceamento da linha de montagem analisada por meio da redistribuição das tarefas dos postos em falha entre os postos de trabalho ativos, considerando, como objetivo principal na fase 1 de execução do modelo, a minimização do tempo de ciclo. De modo complementar, foram conduzidos estudos que objetivaram evitar a movimentação das tarefas que já estavam originalmente alocadas aos postos ativos na linha, antes da ocorrência da falha. Em um entendimento simplificado, procurou-se evitar as movimentações de tarefas entre postos, ainda que este objetivo tenha impacto no tempo de ciclo ( $CT$ ). Para a segunda fase de execução do modelo,

objetivou-se, primeiramente, a minimização do número de realocações de tarefas nas estações de trabalho dado um tempo de ciclo fixo. Este foi determinado de acordo com aumentos percentuais do tempo de ciclo “ótimo” da linha operando em modo degradado (obtido na fase 1), para cada um dos três casos analisados.

A necessidade de rebalanceamento da linha de montagem foi averiguada pela ocorrência de paradas gerais da linha quando as estações entravam em modo de falha, conforme informações da empresa. Para execução do projeto foram considerados os 4 modelos de produtos que ocupam a totalidade do segmento A de produtos desta linha de montagem (vide seção 1.2), bem como as 46 tarefas, dispostas em sete postos de trabalho, pelos quais os 4 modelos devem passar no decorrer do sistema produtivo. Além disso, foram analisados os índices de falha das sete estações de trabalho e selecionadas estações 1 e 3 para a realização de 3 estudos de caso do modo degradado de produção:

- Estação 1 em modo degradado;
- Estação 3 em modo degradado;
- Estações 1 e 3 em modo degradado, simultaneamente;

Partindo destes 3 casos, quatro estudos envolvendo a função objetivo foram idealizados de modo a obter soluções para o rebalanceamento da linha operando em modo degradado, os quais foram apresentados da seção 4.3.1 à 4.3.4, para a fase 1 de execução do modelo matemático. Para a execução da fase 2, mudou-se a função objetivo para a minimização da quantidade de realocações de tarefas no sistema produtivo avaliado, bem como as restrições, as quais incluem, nesta fase, um tempo de ciclo máximo permitido na linha de montagem. A partir dos dados fornecidos pela empresa, da análise das relações de precedência, das restrições e características da linha em questão, desenvolveu-se um modelo matemático em PLIM, o qual foi implementado em um ambiente de modelagem e solução computacional - IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*, o qual forneceu os resultados apresentados e discutidos no Capítulo 4.

Os resultados apresentados no Capítulo 4 indicaram que quanto menor o valor de  $CT$  para o rebalanceamento de linha proposto pelo modelo matemático, maior a tendência de um maior número de mudanças de tarefas entre postos. Este fato tende a dificultar a implementação operacional da solução proposta no ambiente fabril. Por outro lado, soluções menos satisfatórias em relação ao valor de  $CT$  apresentaram um rebalanceamento mais viável de ser implementado,

função do número relativamente reduzido de modificações de tarefas. Ressalta-se que os desenvolvimentos realizados e resultados obtidos mostram-se alinhados ao objetivo geral e específicos pautados na Seção 1.3.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

De modo sumarizado, destaca-se que o fato de existir uma solução já estruturada para o caso de falhas é ponto fundamental para possibilitar um modo de operação equilibrado à linha, dentro das condições de disponibilidade das estações de trabalho, temática endereçada na presente dissertação.

Em relação a futuros desenvolvimentos, comenta-se que não foram avaliadas as condições de aplicabilidade das soluções apresentadas, estudo que seria relevante para a validação dos resultados. Além disso, alguns resultados obtidos mostraram soluções com distribuição relativamente desiguais de tempos de produção entre as estações de trabalho, mesmo que a função objetivo envolva a minimização do  $CT$ , como discutido ao final da seção 4.5, quando apresentados os índices de suavidade. Em posse desses dados e discussões, sugere-se, também, como continuidade deste estudo a elaboração de um modelo matemático que seja capaz de resolver o problema de distribuição desigual de tempos de produção nas estações de trabalho, ou seja, homogeneizar os tempos de produção das estações de trabalho por meio da redistribuição das tarefas nas estações de trabalho, mas mantendo a formulação aqui apresentada com a execução bifásica do modelo matemático, considerando a linha de montagem operando em modo degradado.

Outro estudo possível é a implementação de um modelo matemático capaz de trabalhar com diferentes modelos de veículos sem utilizar o conceito de modelo equivalente, ou seja, com mais de um produto com características e tempos de produção distintos sendo diretamente considerados nas equações matemáticas, também com a consideração de estações de trabalho operando em modo degradado. Embora esta dissertação considere 4 modelos de produtos, a formulação aqui apresentada considera um único modelo de produto equivalente, cujos tempos de produção são oriundos da média ponderada dos tempos de produção de cada um com o percentual de ocupação dos mesmos na linha de montagem.

Indo mais além, sugere-se a integração de ferramentas industriais de coleta automática de dados / inteligência artificial (alinhadas ao conceito de Indústria 4.0) com as funcionalidades do modelo matemático aqui apresentado e utilizado. Com isso, seria possível, por exemplo, fazer

com que o próprio “sistema integrado de balanceamento”, fosse capaz de avaliar a necessidade de realizar um (re)balanceamento de linha com base no histórico de dados dos tempos de produção das tarefas de cada um dos modelos de produtos que são executados na linha de montagem em questão. Com esses dados, o modelo poderia ser capaz de avaliar, de modo praticamente *on-line*, a condição de operação da linha de produção. Ao sinal de qualquer divergência em relação aos “padrões” produtivos, o próprio sistema integrado de balanceamento seria capaz de avaliar qual a estação que está entrando/operando em modo de falha e, por si só, sugerir o rebalanceamento que melhor se enquadra para solucionar a falha em questão. Esta solução se mostra, a princípio, bastante interessante do ponto de vista operacional e de produção, uma vez que reduziria significativamente os tempos “perdidos” para que os operadores percebam que a linha de produção está entrando/operando em modo de falha, avaliar qual(is) a(s) estação(ões) que falharam, procurar uma solução otimizada (caso exista) para o posto de trabalho que está em modo degradado, e implementar esta solução para manter o sistema produtivo no melhor funcionamento possível. O impacto da utilização dos conceitos supracitados nas tomadas de decisão com relação à manutenção do melhor funcionamento possível de sistemas produtivos como os aqui apresentados, é uma temática que merece ser estudada e avaliada.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ricardo Emmanuel Henriques de. **Balanceamento de Linhas de Produção**. 2015. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2015.

BALAS, Egon; HOFFMAN, Alan J.; MCCORMICK, S. Thomas. A Special Issue in Memory of George B. Dantzig. **Discrete Optimization**, v. 5, n. 2, p. 145–150, 2008. ISSN 1572-5286. In Memory of George B. Dantzig. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572528607000813>.

BARBOZA, Angela Olandoski. **Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista**. 2005. Tese (Doutorado) — UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2005.

BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. 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>.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte. A versatile algorithm for assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 184, p. 39–56, 01 2007.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, p. 674 – 693, dez. 2007.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin. 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>.

BUKCHIN, Y.; RABINOWITCH, I. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. **European Journal of Operational Research**, 2006.

CAVALLI, Leonardo Torques; KIZAKI, Alex Eiji; LÜDERS, Ricardo; MAGATÃO, Leandro. Modelagem matemática aplicada ao rebalanceamento de linhas de montagem com estações de trabalho paradas ou em falha. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, Dezembro 2019.

COROMINAS, Albert; PASTOR, Rafael; PLANS, Joan. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. **Omega**, v. 36, p. 1126–1132, 12 2008.

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.

DOLGUI, Alexandre; GAFAROV, Evgeny. Some new ideas for assembly line balancing research. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 2255 – 2259, 2017. ISSN 2405-8963. 20th IFAC World Congress. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317303361>.

DOLGUI, A.; PROTH, J. M. Outsourcing: definitions and analysis. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 23-24, p. 6769–6777, 2013.

DONNINI, Nelson; MAGATÃO, Leandro; RODRIGUES, Luiz Carlos de Abreu. Balanceamento de uma linha de montagem de bancos de automóveis com buffer intermediário usando programação linear inteira mista. **SBPPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2010.

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.

ESSAFI, Mohamed; DELORME, Xavier; DOLGUI, Alexandre; GUSCHINSKAYA, Olga. A MIP approach for balancing transfer line with complex industrial constraints. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, n. 3, p. 393 – 400, 2010. ISSN 0360-8352. Supply, Production and Distribution Systems. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835209001120>.

FERNANDES, Flávio César F.; DALALIO, Andréia Gisele. Balanceamento e rebalanceamento de linhas de montagem operadas por grupos de trabalho autogerenciados. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 3, p. 378–398, dez. 2000.

FERNANDES, Flávio César Faria; FILHO, Moacir Godinho; CUTIGI, Ricardo Augusto; GUIGUET, Aline Malerbo. O uso da programação inteira 0 - 1 para o balanceamento de linhas de montagem: modelagem, estudos de caso e avaliação. **Produção**, v. 18, n. 2, p. 210–221, maio 2008.

FERNANDES, Jéssica Pillon Torralba. Abordagem lexicográfica na otimização da operação de usinas hidrelétricas. 130 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 2015.

GAITHER, Norman; FRAZIER, Greg. **Administração da Produção e Operações**. [S.l.]: Cengage Learning, 2002.

GAMBERINI, R.; GEBENNINI, E.; GRASSI, A.; REGATTIERI, A. A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem. **International**

**Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 47, n. 8, p. 2141–2164, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207540802176046>.

GERHARDT, Melissa Petry; FOGLIATTO, Flávio Sanson; CORTIMIGLIA, Marcelo Nogueira. Metodologia para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelo em ambientes de customização em massa. Tese (Doutorado) - Curso de Gestão da Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2007.

GOLDBARG, Marco C; LUNA, Henrique P L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. [S.l.]: Elsevier, 2005.

GOMES, Carlos Francisco Simões. Aplicação da programação por metas e método lexicográfico ao método stem – nova proposta de algoritmo de formulação linear multiobjetivo. **SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 1099 – 1110, nov. 2004.

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.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEAL, E. G.; GRESPAN, L. A.; MAGATÃO, Leandro. **Balanceamento de uma Linha de Montagem de Motores Diesel por Programação Matemática**. 1a edição. ed. [S.l.]: PLUS / Simplíssimo, 2019. In: Silvestre Labiak Junior; Euclides Alexandre Bernardelli; Osvaldo Verussa Junior; Rodrigo Lupinacci Villanova. (Org.). Soluções em Engenharia Mecânica.

LEE-MORTIMER, Andrew. A lean route to manufacturing survival. **Assembly Automation**, v. 26, p. 265–272, 10 2006.

LI, Yuchen; LI, Zixiang; GAMA, Francisco Saldanha da. New approaches for rebalancing an assembly line with disruptions. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Taylor & Francis, p. 1–18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1925967>.

LOPES, T. C.; PASTRE, G. V.; MICHELS, A. S.; MAGATÃO, Leandro. Flexible multi-manned assembly line balancing problem: Model, heuristic procedure, and lower bounds for line length minimization. **Omega - The International Journal of Management Science**, v. 95, p. 102063–102072, 2020. ISSN 03050483.

LOPES, Thiago Cantos; SIKORA, Celso Gustavo Stall; MICHELS, Adalberto Sato; MAGATÃO, Leandro. An iterative decomposition for asynchronous mixed-model assembly lines: combining balancing, sequencing, and buffer allocation. **International Journal of Production Research**, 2019.

LOPES, Thiago Cantos; SIKORA, C. G. S.; MOLINA, Rafael Gobbi; SCHIBELBAIN, Daniel; RODRIGUES, L. C. A.; MAGATÃO, Leandro. Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. **European Journal of Operational Research**, p. 1033–1048, 2017.

MAGATÃO, Leandro. **Mixed Integer Linear Programming and Constraint Logic Programming: Towards a Unified Modeling Framework**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências), 166 f. — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2005.

MAKSSOUD, Fatme; BATAÏA, Olga; DOLGUI, Alexandre; MPOFU, Khumbulani; OLABANJI, Olayinka. Re-balancing problem for assembly lines: New mathematical model and exact solution method. **Assembly Automation**, v. 35, p. 16–21, 02 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, 11 2010.

MICHELS, A. S.; LOPES, T. C.; MAGATÃO, Leandro. An exact method with decomposition techniques and combinatorial benders' cuts for the type-2 multi-manned assembly line balancing problem. **Submitted to the Operations Research Perspectives**, v. 7, p. 100163, 2020. ISSN 2214-7160.

MICHELS, Adalberto Sato; LOPES, Thiago Cantos; SIKORA, Celso Gustavo Stall; MAGATÃO, Leandro. 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.; LOPES, T. C.; SIKORA, C. G. S.; MAGATÃO, Leandro. A Benders' decomposition algorithm with combinatorial cuts for the multi-manned assembly line balancing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 278, p. 796–808, 2019. ISSN 03772217.

MÜLLER, Christoph Schinner geb.; GRUNEWALD, Martin; SPENGLER, Thomas. Redundant configuration of automated flow lines based on “industry 4.0”-technologies. **Journal of Business Economics**, v. 87, 10 2017.

OLIVEIRA, Willy A.; SANTOS, Maristela O. MIP-heurísticas para um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes em linhas paralelas e relacionadas. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, 2018.

PEINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da produção (Operações Industriais e de serviços)**. [S.l.]: Unicenp, 2007.

PUCCINI, Abelardo de Lima. **Introdução à Programação Linear**. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1977.

RITZMAN, Larry P; KRAJEWSKI, Lee. **Administração da Produção e Operações**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2004.

ROCHA, Marcela Martins. Origens do modo degradado de funcionamento em sistemas de produção offshore. Rio de Janeiro, 110 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE-UFRJ. 2014.

SAIF, Ullah; GUAN, Zailin; WANG, Baoxi; MIRZA, Jahanzeb; HUANG, Shiyang. A survey on assembly lines and its types. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 9, p. 95–105, jun. 2014.

SAMOUEI, Parvaneh; ASHAYERI, Jalal. Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations. **Applied Mathematical Modelling**, v. 72, p. 259–275, 2019.

SANCİ, Ece; AZIZOĞLU, Meral. Rebalancing the assembly lines: exact solution approaches. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 55, n. 20, p. 5991–6010, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1319583>.

SIKORA, C. G. S. **Scheduling Projects in Operating Systems: an Application on Assembly Line Balancing**. 2017. Dissertação — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2859>.

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.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNTON, R. **Administração da Produção**. [S.l.]: Atlas s.a, 2009.

TAPPING, Dom; LUYSTER, Tom; SHUKER, Tom. **Value Stream Management: eight steps to planning, mapping, and sustaining lean improvements**. [S.l.]: Productivity Press, 2002.

THOMOPOULOS, N. T. Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. **Management Science**, v. 14, p. 59–75, 1967.

WILLIAMS, H Paul. **Model building in mathematical programming**. [S.l.]: Wiley, 2013.

YIN, Foon Jian; AZIZ, Faieza Abdul. Line balancing technique improves productivity at chipset tester assembly manufacturing: A review. **Journal of Advanced Research in Manufacturing**, v. 5, p. 1–6, 2018.