

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CLÁUDIO LUIZ FARIA BAÊTA

**RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE UMA LINHA ROBÓTICA
DE MODELO MISTO COM IMPACTO REDUZIDO NO TEMPO DE
CICLO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

CLÁUDIO LUIZ FARIA BAÊTA

**RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE UMA LINHA ROBÓTICA
DE MODELO MISTO COM IMPACTO REDUZIDO NO TEMPO
DE CICLO**

**Dynamic Reconfiguration of a Mixed-Model Robotic Assembly Line
with Reduced Impact on Cycle Time**

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders
Coorientador: 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**



CLAUDIO LUIZ FARIA BAETA

**RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE UMA LINHA ROBÓTICA DE MODELO MISTO COM IMPACTO
REDUZIDO NO TEMPO DE CICLO**

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: 27 de Outubro de 2021

Prof Ricardo Luders, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Adalberto Sato Michels, Doutorado - Boticario

Prof Flavio Neves Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/12/2021.

À minha esposa,
Maria Teresa de Britto Fumes Baêta.
Ao meu filho, Gabriel Fumes Baêta.
Meu pai (*in memoriam*), minha mãe e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. Ricardo Lüders e ao meu coorientador professor Dr. Leandro Magatão, pela oportunidade e confiança depositadas, além da paciência, incentivo e colaboração. Este trabalho não teria sido possível sem a contribuição persistente destes mestres.

Ao colega Júlio Alberto Godofredo pela disposição em compartilhar seus conhecimentos e contribuir no desenvolvimento do modelo de simulação a eventos discretos.

À empresa Simio LLC (<https://www.simio.com/>) pela disponibilização da licença acadêmica gratuita à UTFPR, a qual permitiu o desenvolvimento do modelo de simulação do Capítulo 3 e obtenção dos resultados do Capítulo 4.

Primeira Lei: Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra algum mal. Segunda Lei: Um robô deve obedecer as ordens que lhe sejam dadas por seres humanos, exceto nos casos em que tais ordens contrariem a Primeira Lei. Terceira Lei: Um robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira e Segunda Leis (ASIMOV, Isaac, 1950).

RESUMO

BAÊTA, Cláudio Luiz Faria. **Reconfiguração Dinâmica de uma Linha Robótica de Modelo Misto com Impacto Reduzido no Tempo de Ciclo**. 2021. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Com a Indústria 4.0 e os conceitos de produção flexível sob demanda, linhas de montagem da indústria automotiva estão sujeitas a alterações constantes de demanda e modelos de veículos (linha de modelo misto). A partir de um modelo da literatura para o projeto otimizado de linhas de montagem robóticas de modelo misto, este trabalho implementa um modelo de simulação da linha considerada sob diversas condições de operação. Estações ociosas são identificadas e parte dos robôs desabilitada. Os resultados mostram que é possível reconfigurar a linha à medida que os diferentes modelos de veículos são produzidos, desabilitando robôs de determinadas estações. Além disso, o tempo de ciclo não é alterado, ou é alterado levemente, ao desabilitar os robôs. Consideram-se ainda cenários de maior impacto no tempo de ciclo com a produção de um “*mix*” de modelos e diferentes sequências de veículos. Estes resultados podem ser usados para manutenção programada ou redução de uso dos robôs.

Palavras-chave: Linha de montagem robótica. Sistema de manufatura reconfigurável. Simulação de eventos discretos. Manutenção programada. Economia de recursos.

ABSTRACT

BAÊTA, Cláudio Luiz Faria. **Dynamic Reconfiguration of a Mixed-Model Robotic Assembly Line with Reduced Impact on Cycle Time**. 2021. 62 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical and Computer Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

The Industry 4.0 and flexible on-demand production concepts have introduced assembly lines in the automotive industry subject to constant changes in demand and vehicle models (mixed-model line). Based on a literature model for the optimized design of mixed-model robotic assembly lines, this work implements a simulation model of the line considered under different operating conditions. Idle stations are identified and part of the robots is disabled. The results show that it is possible to reconfigure the line as different vehicle models are produced, disabling robots from certain stations. Furthermore, the cycle time is not altered or changed slightly when disabling robots. Scenarios with relevant impact on the cycle time with the production of a “mix” of vehicle models and different vehicle sequences are also considered. These results can be used for scheduled robots maintenance or less utilization of robots.

Keywords: Robotic assembly line. Reconfigurable manufacturing systems. Discrete event simulation. Scheduled maintenance. Resource saving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Linha robótica | 30 |
| Figura 2 – Janela do Simio mostrando a tabela de dados para cada modelo de veículo (<i>Model</i>), com as tarefas (<i>Task</i>) associadas às estações (<i>Station</i>), equipamentos (<i>Equipament</i>) e número de cópias de cada tarefa (<i>Number</i>). | 35 |
| Figura 3 – Bloco <i>server</i> do Simio que simula uma estação de trabalho. | 36 |
| Figura 4 – Janela do Simio com a linha de montagem simulada. | 38 |
| Figura 5 – Tabela do Simio para configurar o número de robôs habilitados em cada estação S2, S4, S6, S10 e S12, para cada modelo de veículo (<i>Model</i>). | 39 |
| Figura 6 – Tempo de Ciclo (CT) (unidades de tempo) para diferentes sequências e combinações de robôs desabilitados nas estações S12, S10 e S6. | 54 |
| Figura 7 – Índice de suavidade (IS) (unidades de tempo) para diferentes sequências e combinações de robôs desabilitados nas estações S12, S10 e S6. | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Número de cópias e tempo de duração (u.t.) de cada cópia da tarefa, para cada modelo de veículo M1, M2 e M3. Tarefas de geometria estão em negrito, tarefas de parafusamento em itálico e o restante são tarefas de acabamento. | 32 |
| Tabela 2 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, (4) robô de movimentação e parafusamento, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M1. | 33 |
| Tabela 3 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M2. | 33 |
| Tabela 4 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, (4) robô de movimentação e parafusamento, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M3. | 34 |
| Tabela 5 – Estados de operação de uma estação de trabalho. | 35 |
| Tabela 6 – Exemplo de dados das tarefas dos robôs do tipo 1 para montar cada modelo em uma estação. | 37 |
| Tabela 7 – Tabela resumo. | 41 |
| Tabela 8 – Taxa de utilização (%) das estações. | 42 |
| Tabela 9 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo. | 42 |
| Tabela 10 – Tabela resumo. | 44 |
| Tabela 11 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M1. | 44 |
| Tabela 12 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M2. | 45 |
| Tabela 13 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M3. | 45 |
| Tabela 14 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para um <i>mix</i> de produção (M1-M2-M3), desabilitando 1 robô da S12 para M1 e 1 robô da S10 para M2. | 46 |
| Tabela 15 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes <i>sequências de produção</i> ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, sem desabilitar os robôs. | 47 |
| Tabela 16 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes <i>sequências de produção</i> ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô da S12 para todos os modelos. | 48 |
| Tabela 17 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes <i>sequências de produção</i> ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô da S10 para todos os modelos. | 49 |

| | |
|--|----|
| Tabela 18 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes <i>sequências de produção</i> (<i>aM1-bM2-cM3</i>) - <i>a, b e c</i> é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô tanto da S12 quanto da S10 para todos os modelos. | 50 |
| Tabela 19 – Tabela resumo das alternativas de sequenciamento de M1, M2 e M3 quando 1 robô é desabilitado para manutenção em cada uma das estações S12 e S10. | 50 |
| Tabela 20 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes <i>sequências de produção</i> (<i>aM1-bM2-cM3</i>) - <i>a, b e c</i> é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô de cada uma das estações S12, S10 e S6 para todos os modelos. | 51 |
| Tabela 21 – Taxa de utilização (%) das estações para a sequência (3M1-3M2-0M3). | 52 |
| Tabela 22 – Índice de suavidade (u.t.) da linha para diferentes sequências. | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO | 13 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 14 |
| 1.3 | CONTRIBUIÇÕES E LIMITAÇÕES | 15 |
| 1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL | 17 |
| 2.2 | BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM | 18 |
| 2.3 | PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MODELO MISTO (MALBP) | 19 |
| 2.4 | SIMULAÇÃO | 25 |
| 2.5 | SUMÁRIO DO CAPÍTULO | 28 |
| 3 | METODOLOGIA | 29 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA | 29 |
| 3.2 | MODELO DE SIMULAÇÃO | 31 |
| 3.2.1 | Dados de entrada | 32 |
| 3.2.2 | Construção do modelo | 34 |
| 3.2.3 | Verificação e validação | 39 |
| 3.3 | SUMÁRIO DO CAPÍTULO | 39 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 4.1 | IDENTIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES OCIOSAS | 41 |
| 4.2 | DESEMPENHO DA LINHA SEM <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO | 43 |
| 4.3 | DESEMPENHO DA LINHA PARA DIFERENTES <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO | 45 |
| 4.4 | MANUTENÇÃO | 46 |
| 4.5 | DESABILITANDO ROBÔS DE 3 ESTAÇÕES | 50 |
| 4.6 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 51 |
| 4.7 | SUMÁRIO DO CAPÍTULO | 55 |
| 5 | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS | 56 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS | 58 |
| | REFERÊNCIAS | 59 |

1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, comumente denominada Indústria 4.0, está baseada no conceito de *smart factory* e em ambientes industriais altamente conectados em rede, sendo impulsionada pela transformação digital do setor de manufatura (MÜLLER *et al.*, 2017). Essa indústria enfrenta desafios da produção atual que envolvem produtos customizados de demanda variável. Portanto, a Indústria 4.0 exige flexibilidade e capacidade de adaptação que dificilmente são satisfeitas por soluções tradicionais centralizadas. As fábricas da Indústria 4.0 têm como princípios de projeto: interoperabilidade, virtualização, descentralização, comunicação e controle distribuído, capacidade em tempo real, orientação a serviço, manutenção fácil e rápida, baixo custo e modularidade (RAPTIS *et al.*, 2019). Com a Indústria 4.0 e os conceitos de produção flexível sob demanda, as linhas de produção estão sujeitas a alterações constantes de demanda e tipo de produto a ser produzido. Este é o caso das linhas de montagem da indústria automotiva. Atualmente, estas linhas são responsáveis pela produção de diferentes modelos de veículos em uma mesma linha de montagem (linha de modelo misto) e estão constantemente sujeitas a alterações de demanda e complexidade dos modelos a serem produzidos. Além disso, muitas destas linhas possuem estações robóticas de montagem, que são o foco desta dissertação.

Um problema relevante de otimização em linhas de montagem é conhecido pela sigla RALD (*Robotic Assembly Line Design problem*). Nesta classe de problemas, o objetivo é normalmente pautado no projeto da linha de montagem com um número mínimo de estações satisfazendo um tempo de ciclo dado. Em (MICHELS *et al.*, 2018), um modelo de otimização MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) é proposto para minimizar o número de estações e balancear a carga de trabalho de estações robóticas, especificando os tipos e quantidades de robôs necessários em cada estação de acordo com as tarefas a serem executadas para cada modelo. Dado que a linha de montagem considerada é de modelo misto, uma solução otimizada do RALD é obtida para cada modelo de veículo a ser produzido. Entretanto, é possível mostrar que a linha obtida para o modelo mais complexo, em termos de operações de montagem, é capaz de montar também modelos mais simples, sem conflitos entre operações ou recursos. Assim, o projeto da linha para o modelo de veículo mais complexo é adotado nesta dissertação, embora claramente com folgas, pois o projeto não é otimizado para os modelos mais simples.

Neste contexto, um modelo de simulação é proposto para simular o comportamento da linha considerada, segundo o projeto de (MICHELS *et al.*, 2018). Tem por objetivo não apenas

avaliar as estações subutilizadas, mas propor uma estratégia para desabilitar robôs sem que o tempo de ciclo da linha seja alterado. Assim, é possível desabilitar robôs subutilizados para determinados modelos de veículos a serem produzidos. Isso é obtido dinamicamente por uma lógica do modelo de simulação que desabilita (e reabilita novamente) robôs à medida que os diferentes modelos de veículos atravessam a linha de montagem.

Os resultados de simulação permitem avaliar o número limite de robôs em cada estação de trabalho que não impactam no tempo de ciclo projetado para a linha. Além disso, a simulação permite avaliar pequenas alterações neste tempo de ciclo ao desabilitar um número maior de robôs, obtendo ganhos de produção em alguns casos ou criando condições mais adequadas para manutenções programadas.

1.1 MOTIVAÇÃO

A quarta revolução industrial, comumente denominada Indústria 4.0, está baseada nos conceitos de produção flexível sob demanda, as linhas de produção estão sujeitas a alterações constantes de demanda e tipo de produto a ser produzido. Neste contexto, o segmento automobilístico é muito amplo e possui um vasto campo na área de pesquisa e desenvolvimento, podendo ser dividido em quatro principais setores na manufatura: estamparia, carroceria, pintura e montagem final (MICHALOS *et al.*, 2010). Na carroceria é realizada a produção em série de grandes quantidades de peças que formam a estrutura metálica do veículo. Este setor é caracterizado pela complexidade operacional e pelo amplo emprego da automação. A produção de grandes quantidades é normalmente obtida fazendo uso de um número expressivo de robôs, ferramentas, e processos personalizados para unir as estruturas metálicas de um único veículo. Como resultado, este setor deve possuir capacidade de reconfiguração para ser utilizado em partes da carroceria de um veículo específico (FRITZSCHE *et al.*, 2020).

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar o desempenho operacional, principalmente em linhas de modelo misto, é a simulação de eventos discretos aplicada à manufatura. Em (TIACCI, 2012; TIACCI, 2015), discute-se a utilização de ferramentas de simulação discreta que possibilitam a experimentação de cenários diversos de produção. Avaliações mais completas e consistentes dos riscos e benefícios das ações tomadas no dia a dia operacional da indústria podem ser implementadas, tornando o planejamento estratégico mais seguro, com ênfase em problemas relacionados a modelos mistos de linha de montagem. O trabalho apresentado por (LOPES *et al.*, 2020) corrobora com a importância do uso de estratégias de simulação para a

obtenção de soluções que maximizem indicadores de balanceamento de linhas de modelo misto.

O desafio desta dissertação é desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos para cenários de produção flexível em uma linha de montagem robótica de modelo misto otimizada para o setor da carroceria de veículos (MICHELS *et al.*, 2018). Assim, todo o ciclo de desenvolvimento de um modelo de simulação deste tipo é realizado, com a coleta e tratamento dos dados de entrada, construção do modelo e parametrização das estações de trabalho. São considerados os tempos das tarefas, das movimentações entre estações e o tempo morto (improdutivo) para cada modelo de veículo. Além disso, a reconfiguração da linha é possível à medida que os diferentes modelos de veículos são produzidos, desabilitando robôs quando necessário.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é utilizar os conceitos de produção flexível sob demanda para uma linha de montagem robótica multioperada de modelo misto. Os impactos no desempenho da linha são avaliados ao desabilitar robôs, de acordo com o modelo de veículo a ser produzido.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos capaz de simular a linha robótica multioperada e de modelo misto obtida em Michels *et al.* (2018);
2. Incluir no modelo de simulação flexibilidade para permitir que robôs sejam desabilitados dinamicamente (durante a operação) em determinadas estações, de acordo com o modelo de veículo a ser produzido;
3. Identificar estações ociosas e propor uma estratégia para desabilitar robôs para redução de uso dos robôs ou para manutenção (programada ou não);
4. Analisar os resultados da simulação para cenários que considerem a produção exclusiva de cada modelo de veículo, assim como para diferentes *mix* e sequências de produção, considerando ou não robôs desabilitados;
5. Avaliar o impacto da reconfiguração dinâmica da linha ao desabilitar robôs a partir de indicadores de desempenho, tais como tempo de ciclo e índice de suavidade.

1.3 CONTRIBUIÇÕES E LIMITAÇÕES

A principal contribuição deste estudo está na proposta de reconfiguração dinâmica da linha de montagem ao desabilitar robôs em tempo de operação. Isso favorece tanto a redução de uso dos robôs como também permite identificar cenários favoráveis para manutenção programada de robôs, principalmente em linhas de modelo misto.

O presente trabalho toma por base os desenvolvimentos apresentados em (MICHELS *et al.*, 2018). Deste modo, todas as decisões referentes ao estabelecimento do *layout* da linha analisada e, também, as decisões referentes ao balanceamento de linha são dadas *a priori*. Não é escopo do desenvolvimento proposto, portanto, determinar condições ótimas para o *layout* produtivo ou o balanceamento da linha. A alocação de tarefas a estações de trabalho é um parâmetro de entrada para a abordagem de solução proposta. O contexto prático analisado possui, contudo, estações de trabalho multioperadas com mais de um robô por estação, fato que será posteriormente detalhado na seção 3.1 e ilustrado na Figura 1 (página 30). São realizadas análises da influência da habilitação/desabilitação de robôs em estações de trabalho multioperadas. Assim, a definição das tarefas que devem ser realizadas na referida estação, com ou sem habilitação de robôs, é dada *a priori*.

Deste modo, a partir da simulação de eventos discretos, o presente trabalho contribui para encontrar o limite de números de robôs desabilitados em cada estação de trabalho que não impacta (ou tenha impacto reduzido) no tempo de ciclo projetado pela linha. Em particular, três modelos distintos M1, M2 e M3 de veículos são produzidos na linha em análise, sendo M3 o modelo de maior complexidade operacional.

Parte dos resultados foram aceitos para publicação em (BAÊTA *et al.*, 2021):

- BAÊTA, Cláudio L. F.; MAGATÃO, Leandro; LÜDERS, Ricardo. Reconfiguração dinâmica de uma linha robótica de modelo misto com impacto reduzido no tempo de ciclo. *In: Anais do LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Campinas: Galoá, 2021. (a ser publicado).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 é de revisão bibliográfica. Aspectos principais da indústria 4.0 e sua relação com produção flexível são abordados. O problema de balanceamento de linhas de montagem

e, em particular, de linhas de modelo misto é apresentado, incluindo o problema de projeto de linhas de montagem robóticas, foco principal desta dissertação. Trabalhos relacionados ao uso da simulação de eventos discretos para avaliação do desempenho de linhas de montagem são também apresentados. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada no trabalho. O problema do projeto de linhas robóticas de solda é caracterizado, o qual servirá de base para o desenvolvimento do modelo de simulação proposto, detalhando a estratégia de habilitar e desabilitar robôs. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados de simulação para diferentes cenários de operação da linha robótica. A partir da identificação de estações ociosas na produção dos diferentes modelos de veículos, reconfigurações no número de robôs são avaliadas para diferentes *mix* e sequências de produção. O Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho e perspectivas para futuros desenvolvimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta conceitos relativos à fundamentação teórica sobre a qual a dissertação está pautada. A seção 2.1 traz conceitos de manufatura flexível, os quais estão alinhados às contribuições da dissertação. A seção 2.2 comenta sobre balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem, em particular linhas em que modelos distintos de produtos compartilham o sistema produtivo (linhas de modelo misto) e, nas quais, as necessidades de reconfiguração são destaque. Na seção 2.3 enfatiza-se problemas das referidas linhas de montagem de modelo misto (*Mixed-Model Assembly Lines*), além de questões sobre linhas de montagem com estações multioperadas (*Multi-Operated Assembly Line Balancing Problem*). Em particular, o problema em análise possui diferentes operadores robóticos na mesma estação de trabalho e, portanto, se faz relevante revisar a temática, também atrelada às necessidades/oportunidades de reconfiguração do sistema produtivo. A seção 2.4 apresenta trabalhos desenvolvidos em técnica similar à utilizada na dissertação, a simulação a eventos discretos, aplicada a problemas correlatos.

2.1 QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

A quarta revolução industrial, comumente denominada Indústria 4.0, está baseada no conceito de *smart factory* e em ambientes industriais altamente conectados em rede, sendo impulsionada pela transformação digital do setor de manufatura (MÜLLER *et al.*, 2017).

Essa indústria enfrenta desafios da produção atual que envolvem produtos customizados de demanda variável. Portanto, a Indústria 4.0 exige flexibilidade e capacidade de adaptação que dificilmente são satisfeitas por soluções tradicionais centralizadas.

As fábricas da Indústria 4.0 têm como princípios de projeto: interoperabilidade, virtualização, descentralização, comunicação e controle distribuído, capacidade em tempo real, orientação a serviço, manutenção fácil e rápida, baixo custo e modularidade (RAPTIS *et al.*, 2019).

O conceito de reconfiguração de linhas de produção (*Reconfigurable Manufacturing Systems*) é mais recente, alavancado pela revolução da Indústria 4.0. Embora tenha uma inspiração em trabalhos anteriores sobre *self-balancing production lines* (BRATCU; DOLGUI, 2009), em geral refere-se à reconfiguração de *hardware* e *software* em linhas de produção completamente automatizadas. O conceito pode ser ainda aplicado ao ajuste da força de trabalho como fator

adicional de reconfiguração (DOLGUI *et al.*, 2019).

Na presente dissertação, aborda-se um problema de reconfiguração de uma linha robótica que pode apresentar mais de um robô (que realiza operações de soldagem) por estação de trabalho, fato detalhado *a posteriori* na seção 3.1. O contexto fabril em análise envolve uma linha de modelo misto, a qual pode se beneficiar da reconfiguração do uso dos robôs na medida em que há necessidade de se atuar em diferentes produtos que passam pela linha, os quais apresentam necessidades de soldagem diferentes. Neste contexto, o presente estudo pode ser visto como uma adaptação limitada do conceito de reconfiguração da “força de trabalho” para linhas robóticas, ao habilitar e desabilitar o funcionamento de robôs, quando necessário. Em contraponto, quando robôs são desabilitados, há ainda a necessidade de avaliar as questões relativas ao balanceamento da linha, com consequências diretas no tempo de ciclo e na produtividade. Assim, abordagens relacionadas ao balanceamento de linhas de montagem são discutidas na seção 2.2.

2.2 BALANCEAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Uma linha de montagem pode ser definida como um conjunto de estações de trabalho dispostas sequencialmente e interligadas por um sistema de transporte de materiais. Em cada estação de trabalho é executado um determinado número de tarefas (ou operações) pré-estabelecidas num processo de montagem, na qual é definido o tempo requerido para executar uma dada tarefa. Existem restrições de precedência que determinam as sequências que as tarefas podem ser executadas. As restrições de precedência são definidas por aspectos tecnológicos ou de concepção do produto. O Problema de Balanceamento de Linha de Montagem (ALBP - *Assembly Line Balancing Problem*) fundamenta-se em distribuir a carga de trabalho total para a fabricação de um único produto (*Simple ALBP*) ou diferentes produtos (*Mixed-Model ALBP*) entre as estações de trabalho ao longo da linha de montagem (BECKER; SCHOLL, 2006).

Outra característica importante que define diferentes versões do ALBP é a variabilidade do tempo das tarefas. Sempre que a variância esperada dos tempos das tarefas for suficientemente pequena, como por exemplo, tarefas ou estações automáticas altamente confiáveis, os tempos da tarefa são considerados determinísticos. Variações consideráveis, que são principalmente devido à instabilidade dos seres humanos em relação à cadência de trabalho, habilidade e motivação bem como a sensibilidade de falha de processos complexos, são considerados tempos de tarefas estocásticos (GOKCEN; EREL, 1998).

Para se executar uma tarefa atribuída, a estação deve ser equipada por operadores e

máquinas que possuam as habilidades e capacidades tecnológicas requeridas. O balanceamento de linha de montagem tradicionalmente foca em problemas simples (SALBP - *Simple Assembly Line Balancing Problem*), cujas hipóteses são muito restritivas, é um modelo que pode não representar a realidade industrial. Nos anos recentes muitas pesquisas tentam modelar o sistema para o mais próximo da realidade, generalizando os problemas de balanceamento de linha de montagem (ROSHANI; GIGLIO, 2015), e evoluindo para a formulação e resolução de problemas generalizados (GALBP - *General ALBP*) com diferentes características adicionais, como funções de custo, seleção de equipamentos, linhas paralelas, *layout* de linha em forma de U e produção de modelo misto de produtos - MALBP, *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* (BECKER; SCHOLL, 2006).

Durante o desenvolvimento da presente revisão bibliográfica foram identificados na literatura diversos trabalhos com o intuito de encontrar a solução (ótima) de problemas de balanceamento de linhas por meio de modelos matemáticos, heurísticas, meta-heurísticas e simulações computacionais. A seção 2.3 e a seção 2.4 a seguir trazem alguns elementos observados nos trabalhos revisados.

2.3 PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MODELO MISTO (MALBP)

De acordo com (BECKER; SCHOLL, 2006), são quatro os problemas definidos como SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*), divididos de acordo com a função e objetivo, como elencado a seguir:

- SALBP-1: dado um tempo de ciclo, deseja-se minimizar a soma dos tempos ociosos das estações diminuindo o número de estações utilizadas;
- SALBP-2: minimizar o tempo de ciclo;
- SALBP-E: quando pode ser minimizado ambos, o tempo de ciclo e número de estações;
- SALBP-F: analisa se o problema é factível, quando são informados o tempo de ciclo e número de estações.

A analogia a SALBPs pode vir a ser empregada para MALBPs (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problems*), configurando, portanto, as variantes a seguir elencadas¹: MALBP-1,

¹ No presente trabalho há maior ênfase em evidenciar trabalhos que comentam sobre o Tipo-1 de problema (SALBP-1, MALBP-1), por estarem em alinhamento ao contexto do caso prático abordado.

MALBP-2, MALBP-E e MALBP-F. Na produção de modelos mistos, os tempos de *setup* entre modelos podem ser reduzidos o suficiente para serem ignorados, de modo que as sequências de modelos similares possam ser montadas na mesma linha. Apesar dos esforços para tornar os sistemas de produção mais versáteis, geralmente requerem processos de produção homogêneos. Como consequência, normalmente é assumido que todos os modelos possuem variações do mesmo produto de base e diferem apenas em atributos de produtos personalizados, também conhecidos como opcionais (NILS *et al.*, 2008).

Conforme detalhado em Roshani e Giglio (2017), as linhas de montagem dedicadas à fabricação de produtos relativamente grandes, por exemplo, linhas automotivas, geralmente permitem que mais de um operador execute tarefas simultaneamente na mesma estação de trabalho. Tem-se, então, a configuração de um problema de linha de montagem multioperada (MALBP - *Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem*²).

As principais vantagens das linhas multioperadas sobre as que possuem um único trabalhador em cada estação são: a possibilidade de redução do comprimento da linha de montagem; a possibilidade teórica de elevar a quantidade produzida por tempo de produção; a diminuição do custo de ferramentas e dispositivos, equipamentos de manuseio e o tempo de *setup* (GIGLIO *et al.*, 2017). Algumas características, contudo, causam um aumento na complexidade operacional em relação à SAL (FATTAHI *et al.*, 2010), pois nas linhas de montagem multioperadas podem ocorrer um tempo ocioso na estação de trabalho por questões de sincronização (*scheduling*) das tarefas realizadas por diferentes operadores na mesma estação. Deste modo, o projeto e a operação de linhas de modelo-misto ganha complexidade em sua análise se estações multioperadas são permitidas.

De modo complementar, menciona-se que existem diferenças entre o Problema de Balanceamento de Linha de Montagem Multioperada (MALBP) e o Problema de Balanceamento de Linha de Montagem e Designação de Operadores (ALWABP - *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*). As principais divergências entre ambos são que no ALWABP existem alguns operadores qualificados que podem executar as tarefas de montagem com diferentes tempos de processamento, enquanto que no MALBP os trabalhadores têm, na configuração base, habilidades idênticas e executam qualquer tarefa com “velocidades” (destrezas) similares. Além disso, na linha multioperada, ao contrário do ALWABP, não há incompatibilidade entre tarefas e os operadores designados, ou seja, operadores que não poderiam executar uma determinada

² Notar que a sigla MALBP pode ser utilizada tanto para *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* quanto para *Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem*.

tarrafa por questões de habilidade, por exemplo. (GIGLIO *et al.*, 2017).

Vários métodos de solução exploram diferentes variantes do problema de balanceamento, mas nenhum modelo inclui todas as características que as linhas de montagem podem conter. Dentro deste contexto, se for considerado, por exemplo, que o operador pode executar tarefas em mais de uma estação, tendo, portanto, a liberdade de se mover entre as mesmas, surge uma variação do ALBP que trata do Problema de Balanceamento de Linha de Montagem com Operador Movendo (TWALBP - *Traveling Worker Assembly Line Balancing Problem*) (SIKORA *et al.*, 2017a). O estudo de balanceamento de linha é modelado em relação à tarefa designada para o operador e as estações, com uma formulação adaptada do TSP (Problema do Caixeiro Viajante) integrada, levando em conta os movimentos dos operadores entre as estações. Essa possibilidade oferece ao modelo maior liberdade para encontrar as soluções. Como consequência, os operadores tendem a ter maior ocupação com as tarefas realizadas nas múltiplas estações, surgindo a escolha entre os atributos relativos à carga de trabalho do operador e tempo de movimentação entre estações.

Existem vários estudos de balanceamento de linhas de montagem multioperadas, abordando aspectos que ampliam a gama de possibilidades de operação deste tipo de linha. Um dos estudos é referente ao problema de balanceamento de linha de montagem (ALBP) com estações muti-operadas em paralelo (PM-ALBP) (KELLEĞÖZ; TOKLU, 2015). Este tipo de linha pode apresentar vantagens sobre linhas que não dispõem de estações paralelas, dentre elas: a diminuição do comprimento de linha e do tempo de ciclo. O estudo de Kellegöz e Toklu (2015) trata de linhas de montagem para produtos de grande porte, como ônibus, caminhões e helicópteros. Os processos de fabricação desses meios de transporte têm várias etapas, a maioria com períodos longos de tempo de execução, os quais por vezes chega a superar o tempo de ciclo limite, ensejando o uso de estações paralelas. De modo análogo à definição de SALBP-1, PM-ALBP1 tem o objetivo de minimizar o número de operadores, dado um tempo de ciclo limite. A hipótese utilizada para encontrar a solução é que a estação, o operador e o tempo de partida de cada tarefa são definidos simultaneamente, tal que o número de operadores a serem utilizados na linha seja mínimo. Durante o desenvolvimento é apresentado um novo algoritmo heurístico construtivo, baseado em regras de prioridades para pequenas instâncias. Em relação à grandes instâncias é proposto uma heurística construtiva (COH) de melhoria do Algoritmo Genético básico, que é utilizado para encontrar as soluções de qualidade em um tempo computacional razoável.

O problema de balanceamento de linhas com estações paralelas também é abordado por

Jamil e Razali (2016). A finalidade observada foi a de maximizar a eficiência da linha, reduzindo tempos ociosos, aumentando-se flexibilidade e confiabilidade fornecida por estações de trabalho paralelas. Durante o desenvolvimento do trabalho foi imposta a eficiência da linha como uma restrição rígida, portanto limitando o número total de estações de trabalho, e considerando a minimização do número de estações de trabalho paralelas como seu propósito principal. Uma avaliação das melhorias introduzidas por estação paralela fornece alguns *insights* sobre os *trade-offs* envolvidos: tempos ociosos reduzidos às custas de equipamentos adicionais e custos trabalhistas necessários para executar mais tarefas em uma única estação de trabalho.

No trabalho desenvolvido por Kellegöz (2016), são novamente abordadas as estações multioperadas, fazendo-se uso de uma estratégia de solução que utiliza uma formulação em Programação Linear Inteira Mista (MILP), algoritmo de *simulated annealing* e análises de representações de diagramas de Gantt. Ressalta-se que os autores consideram que o custo de um operador é bem maior do que o custo extra de estações. Portanto, a minimização do número total de operadores, sejam estes operadores humanos ou robóticos, utilizados na linha é um importante ponto a ser considerado, refletindo as características aplicáveis na manufatura industrial.

Outras soluções são apresentadas tendo como referência a conexão com linhas de montagem instaladas no mundo real, como no trabalho de Fattahi *et al.* (2010). Os autores fazem uso de uma abordagem pautada no algoritmo de colônia de formigas (*ant colony*), o qual minimiza o total de operadores e de estações multi-operadas. No algoritmo proposto, cada *ant* tenta alocar as tarefas fornecidas para as estações multioperadas com o objetivo de construir uma solução de balanceamento para a linha de montagem. Posteriormente a solução é comparada com o modelo MIP para pequenos problemas. Para médios e grandes problemas, compara-se com heurística similar. Durante os experimentos computacionais, o algoritmo proposto atingiu o número ótimo de operadores a serem utilizados nas linhas de montagem estudadas.

Uma das características das estações multioperadas é que geralmente ocorrem em plantas que produzem produtos de alto volume (por exemplo, indústria automotiva), nas quais o tamanho do produto é razoavelmente grande para utilizar a configuração da linha de montagem com várias equipes e modelos diferentes de produtos são trabalhados na linha, configurando linhas de modelo-misto (ROSHANI *et al.*, 2013). Os critérios de performance considerados neste estudo são: maximizar a eficiência da linha, minimizar o comprimento da linha e o índice de suavidade. As soluções encontradas foram factíveis ao problema abordado, sendo a performance da abordagem de solução testada com um conjunto de problemas reunidos na literatura.

Ampliando as alternativas em relação à configuração base do MALBP, Giglio *et al.* (2017) abordam o balanceamento de linhas com operadores especializados (MALBP-SW). Os autores propõem um modelo matemático que origina respostas com melhora do custo operacional do sistema de produção, reduzindo o número de operadores e também o número de estações de trabalho. Parâmetros reais são coletados, definindo-se o tempo de ciclo e o número de operadores multiquificados que podem executar os subconjuntos das tarefas de montagem com base em suas habilidades.

Lopes *et al.* (2019) apresentam o conceito de Fronteiras Flexíveis de Operadores em problemas de balanceamento para linhas de montagem multioperadas (FMALB - *Flexible Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem*). Os autores evidenciam que, quando as linhas em análise são contínuas, existe uma redução sensível do comprimento das linhas com a incorporação do conceito proposto. O desenvolvimento foi pautado na proposta de um modelo em Programação Linear Inteira Mista, incorporando simultaneamente decisões de balanceamento e sequenciamento, respeitando as relações com o tempo de ciclo e precedência, permitindo que um determinado número máximo de operadores realizassem tarefas simultaneamente na peça e mantendo a restrição de que cada operador realizasse uma tarefa de cada vez. São propostos dois algoritmos para obtenção de *lower bounds* para avaliação da qualidade das soluções obtidas. Posteriormente, foi analisada a inter-relação entre o tempo de ciclo e o mínimo comprimento da linha.

De acordo com Kazemi e Sedighi (2013) existem também outros fatores que afetam diretamente a performance de linhas de montagem multioperadas, devido à alta competitividade no ambiente industrial atual. A redução do custo de produção e necessidade de incremento de utilização dos recursos disponíveis, são aspectos importantes para o gerenciamento da produção. O estudo apresentado tem o objetivo de minimizar o custo total de produção por unidade de produto e designar quais tarefas a serem executadas por qual operador. Vários exemplos são resolvidos efetivamente nos modelos e os algoritmos propostos e vários experimentos computacionais foram realizados com esses objetivos.

O trabalho de Michels *et al.* (2019) propõem soluções para o MALBP por meio de um algoritmo de decomposição baseado em cortes combinatoriais de Benders. Os autores apresentam restrições de quebra de simetria incorporadas a uma nova formulação em MILP para o problema analisado; estabelecem, assim, uma abordagem de solução monolítica que se mostra capaz de resolver instâncias de relativo pequeno porte. De modo complementar, a

formulação monolítica proposta serve de base para a proposta de um algoritmo de decomposição de Benders (BDA - *Benders' Decomposition Algorithm*), o qual é utilizado na resolução de instâncias médias e grandes. Em testes realizados em *benchmark* com 131 instâncias, o BDA evidenciou soluções superiores às reportadas na literatura em 44 casos e, também, realizou a resolução até a otimalidade em 117 dos 131 casos testados. O trabalho supriu uma lacuna da literatura propondo um método de solução eficiente para o MALBP.

Um contexto particular de MALBP ocorre quando as estações de trabalho são robotizadas (*Robotic Assembly Lines*). Via de regra, estações paralelas também estão presentes neste contexto de linhas robóticas multioperadas. O artigo de Rubinovitz e Bukchin (1993) é um trabalho de base no referido contexto. Os autores apresentam uma abordagem heurística para o projeto e o balanceamento de uma linha robótica. O algoritmo denominado pelos autores de RALB (*Robotic Assembly Line Balancing*) tem o escopo de minimizar o número de estações de trabalho e robôs utilizados, indicando o modelo de robô mais eficiente para cada estação, dentro de um conjunto viável de robôs para a execução das tarefas. Quando um novo produto é lançado, a abordagem RALB proposta é utilizada no projeto de uma nova linha. Na etapa de planejamento foram necessárias definições dos diferentes tipos e capacidades de robôs a serem utilizados, tempos de tarefas e diagrama de precedência. O desenvolvimento exigiu uma flexibilidade na sequência de montagem, a utilização dos diferentes tipos de robôs para as estações robóticas, tempos determinísticos diferentes por tarefa para cada robô, etc. A solução técnica utilizada foi pautada numa customização do algoritmo *Branch and Bound* fazendo uso adicional de algoritmos de busca de fronteiras (*Frontier Search*). Deste modo, a abordagem foi denominada de *Branch and Bound Frontier Search*, a qual foi capaz de resolver problemas relativamente complexos no contexto estudado.

No trabalho de Michels *et al.* (2018) é apresentado o problema denominado de RALD (*Robotic Assembly Line Design problem*). É um contexto de projeto de linhas de soldagem robotizadas, com possibilidade de estações multioperadas, estações paralelas e seleção de diferentes equipamentos para os robôs. Os autores propõem um modelo matemático em MILP, linearizando condições que conduziam à multiplicação de três variáveis de decisão. A função objetivo proposta visa minimizar os custos envolvidos e os experimentos foram realizados de modo a observar a influência dos diferentes parâmetros nas soluções obtidas. De modo complementar aos estudos voltados à avaliação da influência de parâmetros, os autores apresentam um estudo de caso prático que teve por base realizar o projeto de uma linha de montagem de modelo

misto. O processo de resolução foi realizado de modo separado para cada um dos modelos envolvidos e, posteriormente, a linha de montagem projetada para um dos modelos (o de maior complexidade) foi validada para uso dos demais modelos envolvidos. Os autores evidenciam que possíveis ociosidades podem ter sido geradas pelo processo resolutivo adotado mas, ainda assim, os resultados apresentados superam a solução no contexto fabril.

Em um mundo cada vez mais competitivo, os sistemas de manufatura devem se tornar cada vez mais flexíveis e reconfiguráveis para responder de forma rápida e eficiente às mudanças de demanda do mercado. Artigos que desenvolvem soluções sobre MALBP, com suas variáveis citadas nessa seção, inclusive as linhas de montagem robóticas multioperadas, problemas do tipo RALD (MICHELS *et al.*, 2018) e RALB (RUBINOVITZ; BUKCHIN, 1993), protagonizam soluções para essa demanda.

2.4 SIMULAÇÃO

O problema de balanceamento de linhas de montagem é um dos tópicos mais importantes abordados na literatura de sistemas de produção, devido à vantagem que proporciona. Embora existam muitos modelos matemáticos e meta-heurísticas para resolver estes problemas, a simulação ainda é uma das técnicas amplamente utilizadas para resolução de balanceamento da linha de montagem e projetos de sistemas de fabricação. Uma das técnicas mais utilizadas é a realização de simulações em linhas de montagem já existentes, reduzindo as incertezas e aproximando do sistema real, com o objetivo de avaliar o comportamento dinâmico do sistema segundo vários aspectos produtivos. A utilização de ferramentas de simulação discreta possibilita a experimentação de cenários diversos de produção e avaliações mais completas e consistentes sobre riscos e benefícios de ações a serem tomadas, tornando o planejamento estratégico mais seguro (TIACCI, 2015).

Neste contexto, uma simulação de eventos discretos orientada a objetos é apresentada em (MENDES *et al.*, 2005), na qual é analisado o balanceamento de linha de montagem de modelo misto para montagem de três versões similares de câmeras para computadores pessoais. O estudo tem o objetivo de estabelecer diferentes configurações de linhas, para níveis variados de demanda. Este tipo de linha, que permite a montagem simultânea de um conjunto de modelos similares de um produto, é chamado de linha de montagem de modelo misto, importante fator competitivo em mercados caracterizados por tendência crescente para maior variedade de produtos. No modelo de simulação de eventos discretos são introduzidos tempos estocásticos, quebras de máquinas e

retrabalhos. Divididos em duas etapas, a primeira consiste na análise de confiabilidade dos dados apresentados pela simulação. Esses são comparados em relação aos valores apresentados pela linha real, concluindo que não existe nenhum grande desvio nos resultados obtidos, constatando que a linha instalada é desbalanceada. Na segunda etapa, visando balancear a linha para atingir um índice de produção maior com mais eficiência, foram realizadas as simulações de diferentes modelos e com vários planejamentos de produção. Foram realizadas análises de estações gargalos, busca por melhorias de performance no sistema em relação ao número de câmeras montadas por período planejado, tempo de fluxo e aumento na utilização dos recursos disponíveis. Os resultados do estudo foram muito úteis para o gerenciamento da linha, maximizando o uso da linha de montagem para diferentes cenários de produção.

Através de um método heurístico de dois estágios utilizando *simulated annealing*, é apresentado por Vilarinho e Simaria (2002) um estudo de balanceamento de linha de montagem modelo misto com estações paralelas. A técnica desenvolvida tem o objetivo principal de minimizar o número de estações ao longo da linha, mantendo o tempo de ciclo da linha de montagem. Um objetivo secundário é otimizar o balanço das tarefas em relação às estações. Neste contexto é apresentado um procedimento com exemplos numéricos e os resultados dos experimentos computacionais. As conclusões alcançadas são de suma importância para um mercado atual, devido ao crescimento de demanda por produtos customizados, como consequência, exercendo pressão nas indústrias de manufatura para serem cada vez mais flexíveis. Em um trabalho complementar, a heurística proposta, combinada com o estudo de simulação, foi aplicada em um problema real de balanceamento de uma linha de montagem de câmeras de computadores pessoais (PC), com bons resultados obtidos (MENDES *et al.*, 2005). Mais uma vez é ressaltada a importância da concatenação entre o mundo acadêmico teórico e a aplicação prática, com ganhos para áreas que necessitam de mais desenvolvimento.

Posteriormente, a linha de montagem estudada por Mendes *et al.* (2005) foi analisada em outra ferramenta de simulação orientada a eventos e objetos, o Simulador de Linha de Montagem (ALS - *Assembly Line Simulator*), o qual foi desenvolvido em Java (TIACCI, 2012). O ALS é capaz de simular linhas de montagem de modelo misto, com tempos de tarefas estocásticos, estações simples e paralelas, planejamento de produção (sequência de produção), *buffers* entre estações, com valores de unidades de tempo das tarefas, sendo esta uma ferramenta aberta para uso, flexível e expansível. Possui também uma Interface Gráfica do Usuário (GUI), que permite a inserção de entrada de dados requeridos para parametrização das linhas após a

execução da simulação, onde vários dados são disponibilizados, inclusive o tempo de execução da simulação. O simulador permite rapidamente a avaliação dos objetivos operacionais de problemas relacionados a linhas de montagem de modelo misto (TIACCI, 2012). Um dos atributos de aplicabilidade da ferramenta é a capacidade de calcular o rendimento operacional de uma linha complexa, sendo necessário um número reduzido de parâmetros de entrada: duração do tempo das tarefas, a configuração da linha em relação ao número de estações (centrais) de trabalho, se está incluso *buffers* entre as estações centrais, número de estações de trabalho paralelas, tarefas designadas para cada estação de trabalho e a sequência dos modelos entrando na linha. De modo complementar, o trabalho de Tiacchi (2015) descreve uma abordagem inovadora para lidar com o Problema de Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto (MALBP) com tempos de tarefas estocásticos e estações de trabalho paralelas. A abordagem faz uso de uma estratégia de solução que tem sua base no acoplamento de um algoritmo genético com simulação a eventos discretos.

O trabalho desenvolvido por Buyuksaatçl *et al.* (2015) utiliza uma estratégia de simulação para o problema de balanceamento de uma linha de produção para montagem de TVs LCD de 22 polegadas. Deste modo, uma vez mais uma abordagem de simulação foi aplicada a um caso real de balanceamento de linha. Foram implementadas duas abordagens para o balanceamento dessa linha, analisando as taxas de utilização e eficiência obtidas por meio das simulações.

Na área automotiva, menciona-se o estudo de Jamil e Razali (2016), o qual utiliza técnicas de simulação para o balanceamento de linha de montagem de uma empresa fornecedora de componentes automotivos. Durante o desenvolvimento da modelagem houve um detalhamento do fluxo e tempo de processo da linha de montagem de modelo misto, sendo os dados obtidos diretamente na linha instalada e testados posteriormente no modelo de simulação. O resultado da execução do modelo de simulação apresentou a ineficiência da linha, evidenciando que as condições operacionais estavam distantes da condição de balanceamento ótimo. Uma das etapas da metodologia utilizada foi o tratamento dos dados estatísticos (valores de média, intervalo de confiança e variância dos dados coletados) antes da simulação. Durante a etapa de experimentação foram propostos e implementados no modelo de simulação dois *layouts* com objetivo de redução do acúmulo de peças, melhoria da taxa de produção e eficiência da linha. Também foram acrescentados *buffers* entre as estações e operadores com as suas movimentações, compartilhando atividades em diferentes estações, objetivando melhorar os índices de desempenho da linha. Os resultados e análises mostraram que o balanceamento de

linha de montagem de modelo misto causa impacto positivo na mesma, reduzindo a formação de gargalos e também aumentado a produção, trazendo impactos econômicos importantes com redução do custo por peça produzida.

Deste modo, os trabalhos mencionados na presente seção evidenciam que abordagens de simulação são utilizadas em contextos de balanceamento de linhas, propiciando a análise de diferentes condições práticas. Este fato está alinhado às necessidades de reconfiguração dos sistemas de manufatura, uma necessidade que é ainda mais acentuada pela tendência de linhas de modelo misto.

2.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresenta o referencial teórico da dissertação. A seção 2.1 versa sobre a quarta revolução industrial, trazendo as características principais para a reconfiguração das linhas de produção na Indústria 4.0, impulsionada pela transformação digital. Esta necessidade de reconfiguração das linhas está atrelada às necessidades de diversificação dos modelos de produtos a serem produzidos, criando a necessidade de linhas que realizem a produção de diferentes produtos. Realizar o correto equilíbrio da carga de trabalho das diferentes estações em uma linha de modelo misto é um problema de balanceamento de linhas, temática abordada na seção 2.2. Na sequência, os conceitos de linha de modelo misto são destacados (seção 2.3), evidenciando-se que estações de trabalho multioperadas são uma vertente de grande uso neste contexto, mas que acarretam dificuldades no projeto e operação. Segue-se, então, a apresentação de abordagens de simulação (seção 2.4) destinadas a aprimorar a operação de linhas de montagem, em particular linhas de modelo misto com estações multioperadas.

A presente dissertação toma por base os desenvolvimentos apresentados por Michels *et al.* (2018), em particular o estudo de caso voltado a uma linha robótica multioperada de modelo-misto e, por estratégias de simulação, avalia as possibilidades de reconfiguração da linha, em particular a desativação/habilitação de robôs conforme o modelo de produto. No Capítulo 3, a metodologia proposta para a referida avaliação é apresentada.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a avaliação do desempenho da linha de montagem robótica considerada nesta dissertação quando robôs são desabilitados em determinadas estações de trabalho. A Seção 3.1 caracteriza a linha robótica considerada, cujo projeto foi otimizado em (MICHELS *et al.*, 2018). O modelo de simulação desenvolvido para simular essa linha e seu comportamento ao desabilitar robôs é apresentado na Seção 3.2.

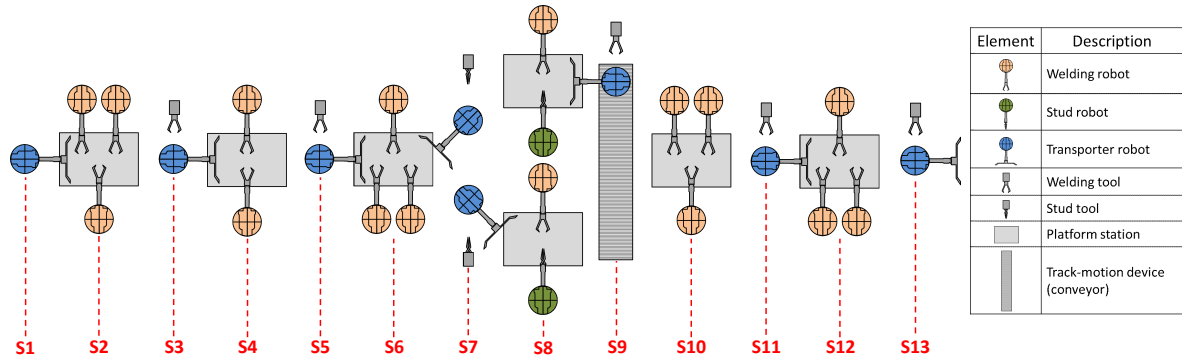
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A indústria de manufatura automotiva pode ser dividida em quatro setores principais: estamparia, carroceria, pintura e montagem final (MICHALOS *et al.*, 2010). Em especial, denomina-se setor de *carroceria* a área fabril responsável por unir as estruturas metálicas do veículo. Linhas de soldagem robóticas estão amplamente presentes neste setor e a solda ponto por resistência (GOULD, 2012) é a técnica comumente utilizada para tal propósito que confere integridade estrutural à carroceria metálica do veículo. O procedimento de solda da carroceria pode empregar vários robôs, equipados com diferentes ferramentas de solda (ou pinças de solda), dispostos em linha. O projeto de linhas robóticas de solda (RALD - *Robotic Assembly Line Design Problem*) pode gerar ganhos operacionais significativos, principalmente em linhas de modelo-misto, conforme discutido por (MICHELS *et al.*, 2018). Contudo, o balanceamento da carga de trabalho de cada robô envolvido (ou balanceamento da linha) é um problema combinatorial particularmente complexo, o qual envolve restrições clássicas de balanceamento de linhas, adicionadas a questões de deslocamento e interferência entre os braços robóticos, conforme detalhado por (LOPES *et al.*, 2017).

Esta dissertação considera o *layout* de uma linha de solda robótica de uma empresa automotiva descrito em (MICHELS *et al.*, 2018) e apresentado na Figura 1. A linha robótica é composta por 13 estações de trabalho (S1 a S13). Destacam-se os seguintes elementos: robôs que realizam solda ponto por resistência (*welding robot*), robôs que realizam operações de parafusamento (*stud robot*) e robôs que realizam o transporte de peças (*transporter robot*), identificados pelas cores laranja, verde e azul, respectivamente. Alguns robôs podem realizar mais de um tipo de operação (indicadas pelo símbolo da operação ao lado do robô na Figura 1). Alinhado a um conceito de manufatura flexível, conforme a necessidade das tarefas a serem

realizadas no modelo de veículo. Este é o caso da estação S3 que, além de transportar o veículo, tem capacidade para realizar operações de solda.

Figura 1 – Linha robótica



Fonte: (MICHELS *et al.*, 2018)

A estação S1 é a entrada da linha e o robô de transporte posiciona a carroceria do veículo na estação S2 de plataforma (*platform station*). Em S2, há três robôs que realizam operações de solda no veículo. Os referidos robôs atuam em regiões distintas da carroceria e, assim, podem realizar as tarefas a eles designadas de modo simultâneo. A quantidade de tarefas que cada robô deve realizar varia de acordo com o modelo de veículo. A estação S3 realiza o transporte e posicionamento do veículo em S4, mas também possui uma ferramenta de solda disponível para o robô. Assim, algumas tarefas de solda podem ser realizadas em S3 de modo a auxiliar o equilíbrio da carga de trabalho entre estações. Portanto, no contexto em análise, estações de transporte podem também realizar (algumas) tarefas de solda/parafusamento para um melhor equilíbrio da linha.

O racional para entendimento do fluxo nas estações S4 a S6 segue de modo análogo ao comentado acima. Porém, S7 e S8 são estações paralelas, ou seja, podem realizar operações em dois diferentes veículos simultaneamente, devido à divisão do fluxo da linha em dois ramos. Uma descrição detalhada das funcionalidades de estações paralelas em linhas de montagem pode ser encontrada em (LUSA, 2008). Neste caso, o paralelismo das estações permite realizar operações de duração superior ao tempo de ciclo da linha. Isso ocorre devido ao grau de paralelismo (*parallelism degree*) empregado (igual a dois neste caso), o qual disponibiliza mais tempo efetivo para a duração média das operações associadas à estação paralela. Em S9, tem-se uma estação de transporte na qual o robô é posicionado sobre um transportador (*conveyor* ou *track-motion device*). Deste modo, o robô transportador de S9 realiza o posicionamento em S10 de todas as peças que deixam S8. O fluxo até a saída da linha (S13) ocorre de modo análogo ao comentado

anteriormente.

O projeto da linha ilustrada na Figura 1 é otimizado por um modelo MILP (MICHELS *et al.*, 2018), que tem por objetivo minimizar o “custo total de compra/instalação” da linha, dado um tempo de ciclo CT de 1168 unidades de tempo (requisito do sistema produtivo). Analisando-se de modo simplificado, a diminuição do número de estações de trabalho tem impacto direto na diminuição dos custos e, portanto, é um elemento minimizado. O modelo matemático em MILP determina quais tarefas devem ser realizadas em cada estação. Portanto, a designação das tarefas a estações é um dado de entrada para o modelo de simulação proposto nesta dissertação. Este tempo de ciclo deve ser respeitado para os três modelos de veículos produzidos na linha.

Todos os parâmetros necessários ao projeto da linha e duração das tarefas para cada um dos modelos de veículos são disponibilizados em (MICHELS *et al.*, 2018). Conforme salientado anteriormente, a abordagem proposta pelos autores sugere o projeto (e o balanceamento) da linha robótica, mas somente para um modelo de veículo analisado por vez (*single model approach*). Os autores evidenciam, contudo, que o projeto de linha obtido para o modelo M3 atende também aos modelos M1 e M2 (*feasibility test*). O modelo de simulação apresentado na Seção 3.2 implementa a linha de montagem da Figura 1, cujas tarefas foram alocadas às estações pelo modelo MILP de otimização.

3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

Um modelo de simulação de eventos discretos pode ser visto como uma rede de servidores que modelam ações sobre entidades ou objetos, as quais requerem um determinado tempo para serem concluídas. As entidades que não podem ser atendidas por um servidor ocupado aguardam em uma fila ou no próprio servidor. Neste último caso, o servidor finaliza a ação, mas permanece bloqueado até que a entidade possa ser atendida por outro servidor. Este é o caso da linha robótica simulada, cujas estações de trabalho representam os servidores e não há espaço para filas (*buffers*) entre estações. Dessa forma, um veículo em produção numa estação move-se para a estação seguinte apenas se: i) a estação corrente finalizou as tarefas; ii) a estação seguinte está liberada. Caso contrário, a estação corrente fica bloqueada. A partir deste mecanismo geral de funcionamento, medidas de desempenho são obtidas da simulação, tais como tempo de processamento e taxa de utilização das estações, assim como o tempo de ciclo da linha. O modelo de simulação desta dissertação foi desenvolvido no pacote Simio (JOINES; ROBERTS, 2015).

3.2.1 Dados de entrada

Durante a construção do modelo de simulação, é necessário o levantamento de dados em relação ao número de cópias de cada tarefa¹ e ao tempo de duração das tarefas, para cada um dos modelos de veículos M1, M2 e M3, conforme a Tabela 1. Além disso, é necessária a distribuição das tarefas entre as estações para cada modelo, que é resultado do balanceamento da linha promovida pelo modelo de otimização de (MICHELS *et al.*, 2018). Estes dados caracterizam o tempo de processamento que cada estação irá despende para cada modelo.

Tabela 1 – Número de cópias e tempo de duração (u.t.) de cada cópia da tarefa, para cada modelo de veículo M1, M2 e M3. Tarefas de geometria estão em negrito, tarefas de parafusamento em itálico e o restante são tarefas de acabamento.

| Tarefa | Modelo M1 | | Modelo M2 | | Modelo M3 | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | # Cópias | Duração | # Cópias | Duração | # Cópias | Duração |
| 1 | 8 | 57 | 8 | 57 | 8 | 57 |
| 2 | 6 | 38 | 6 | 38 | 6 | 38 |
| 3 | 6 | 50 | 6 | 50 | 6 | 50 |
| 4 | 6 | 47 | 4 | 49 | 10 | 42 |
| 5 | 10 | 29 | 10 | 29 | 20 | 27 |
| 6 | 14 | 58 | 10 | 57 | 6 | 55 |
| 7 | 18 | 40 | 18 | 40 | 22 | 43 |
| 8 | 4 | 47 | 4 | 47 | 8 | 43 |
| 9 | 4 | 63 | 4 | 63 | 2 | 64 |
| 10 | 15 | 63 | 15 | 63 | 15 | 63 |
| 11 | 13 | 39 | 13 | 39 | 13 | 39 |
| 12 | 7 | 42 | 11 | 38 | 11 | 38 |
| 13 | 34 | 35 | 46 | 34 | 40 | 37 |
| <i>14</i> | <i>21</i> | <i>70</i> | <i>18</i> | <i>71</i> | <i>37</i> | <i>77</i> |
| 15 | 11 | 28 | 7 | 26 | 13 | 21 |
| 16 | 15 | 69 | 15 | 69 | 16 | 71 |
| 17 | 5 | 44 | 5 | 44 | 8 | 45 |
| 18 | 0 | - | 0 | - | 12 | 37 |
| 19 | 20 | 34 | 6 | 35 | 18 | 32 |
| 20 | 0 | - | 12 | 50 | 4 | 52 |
| 21 | 12 | 35 | 12 | 35 | 14 | 33 |
| 22 | 12 | 55 | 12 | 55 | 12 | 51 |
| 23 | 0 | - | 6 | 56 | 11 | 52 |

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 2, 3 e 4 contêm os dados de alocação das tarefas às estações de trabalho para a montagem dos modelos de veículos M1, M2 e M3, respectivamente. Além disso, são mostrados o tipo de equipamento utilizado - (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, (4) robô de movimentação e parafusamento, e a quantidade de cópias necessárias para a montagem de cada modelo no *layout* da linha robótica considerada.

¹ No trabalho de Michels *et al.* (2018), utilizou-se o conceito que tarefas similares eram agrupadas em uma tarefa única, com um dado número de cópias de uma mesma tarefa. As formulações matemáticas podem ter vantagens relacionadas a esta repetibilidade das tarefas de solda, conforme detalhado por (SIKORA *et al.*, 2017b).

Tabela 2 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, (4) robô de movimentação e parafusamento, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M1.

| Tarefa | Estação | Equipamento | # Cópias | Tarefa | Estação | Equipamento | # Cópias |
|--------|---------|-------------|----------|--------|---------|-------------|----------|
| 13 | 8 | 1 | 30 | 4 | 2 | 1 | 5 |
| 19 | 12 | 1 | 20 | 7 | 2 | 1 | 4 |
| 14 | 7 | 4 | 16 | 15 | 9 | 3 | 4 |
| 16 | 10 | 1 | 15 | 9 | 2 | 1 | 3 |
| 10 | 6 | 1 | 15 | 8 | 4 | 1 | 3 |
| 11 | 6 | 1 | 13 | 13 | 9 | 3 | 3 |
| 6 | 4 | 1 | 12 | 5 | 2 | 1 | 2 |
| 21 | 11 | 3 | 11 | 20 | 14 | 1 | 1 |
| 1 | 2 | 1 | 8 | 13 | 6 | 1 | 1 |
| 7 | 3 | 3 | 8 | 12 | 6 | 1 | 1 |
| 15 | 6 | 1 | 7 | 9 | 4 | 1 | 1 |
| 5 | 4 | 1 | 7 | 8 | 2 | 1 | 1 |
| 22 | 10 | 1 | 6 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 6 | 4 | 4 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 6 | 23 | 15 | 3 | 1 |
| 22 | 13 | 3 | 6 | 21 | 13 | 3 | 1 |
| 7 | 5 | 3 | 6 | 18 | 7 | 3 | 1 |
| 14 | 8 | 2 | 5 | 12 | 9 | 3 | 1 |
| 17 | 10 | 1 | 5 | 6 | 5 | 3 | 1 |
| 12 | 8 | 1 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 |

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M2.

| Tarefa | Estação | Equipamento | # Cópias | Tarefas | Estação | Equipamento | # Cópias |
|--------|---------|-------------|----------|---------|---------|-------------|----------|
| 13 | 8 | 1 | 46 | 3 | 2 | 1 | 6 |
| 14 | 8 | 2 | 18 | 2 | 2 | 1 | 6 |
| 7 | 4 | 1 | 16 | 23 | 13 | 3 | 6 |
| 16 | 10 | 1 | 15 | 15 | 9 | 3 | 6 |
| 10 | 6 | 1 | 15 | 17 | 10 | 1 | 5 |
| 11 | 6 | 1 | 13 | 9 | 2 | 1 | 4 |
| 22 | 12 | 1 | 12 | 8 | 4 | 1 | 4 |
| 20 | 12 | 1 | 12 | 4 | 4 | 1 | 4 |
| 21 | 11 | 3 | 11 | 12 | 9 | 3 | 4 |
| 5 | 5 | 3 | 10 | 6 | 4 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 8 | 7 | 5 | 3 | 2 |
| 1 | 2 | 1 | 8 | 18 | 10 | 1 | 1 |
| 12 | 6 | 1 | 7 | 15 | 8 | 1 | 1 |
| 19 | 12 | 1 | 6 | 21 | 13 | 3 | 1 |

Fonte: Autoria própria

A Figura 2 mostra como os dados das Tabelas 2, 3 e 4 são organizados no Simio. A coluna mais à esquerda contém o número do modelo do veículo (*Model*), seguida das colunas da tarefa (*Task*) associada a cada estação de trabalho (*Station*), do respectivo número do equipamento (*Equipment*) necessário para a execução da tarefa e do número de cópias (*Number*) de cada tarefa. Isso permite que os dados de entrada possam ser facilmente alterados ou mesmo lidos de uma planilha de dados externa. Portanto, tem-se um ambiente de simulação flexível para

Tabela 4 – Alocação das tarefas às estações de trabalho, equipamento (1) robô de solda, (2) robô de parafusamento, (3) robô de movimentação e solda, (4) robô de movimentação e parafusamento, e número de cópias de cada tarefa para o modelo M3.

| Tarefa | Estação | Equipamento | # Cópias | Tarefas | Estação | Equipamento | # Cópias |
|--------|---------|-------------|----------|---------|---------|-------------|----------|
| 13 | 8 | 1 | 40 | 15 | 6 | 1 | 5 |
| 14 | 8 | 2 | 22 | 22 | 13 | 3 | 5 |
| 19 | 12 | 1 | 18 | 5 | 5 | 3 | 5 |
| 7 | 4 | 1 | 17 | 20 | 12 | 1 | 4 |
| 16 | 10 | 1 | 16 | 12 | 6 | 1 | 4 |
| 10 | 6 | 1 | 15 | 6 | 2 | 1 | 4 |
| 14 | 7 | 4 | 15 | 21 | 13 | 3 | 3 |
| 11 | 6 | 1 | 13 | 18 | 9 | 3 | 3 |
| 23 | 12 | 1 | 11 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 4 | 1 | 9 | 8 | 4 | 1 | 2 |
| 21 | 11 | 3 | 9 | 7 | 2 | 1 | 2 |
| 17 | 10 | 1 | 8 | 18 | 11 | 3 | 2 |
| 1 | 2 | 1 | 8 | 6 | 3 | 3 | 2 |
| 15 | 9 | 3 | 8 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 22 | 12 | 1 | 7 | 21 | 12 | 1 | 1 |
| 12 | 8 | 1 | 7 | 21 | 10 | 1 | 1 |
| 18 | 10 | 1 | 6 | 18 | 6 | 1 | 1 |
| 8 | 2 | 1 | 6 | 9 | 4 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 6 | 4 | 4 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 6 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 6 | 9 | 3 | 3 | 1 |
| 4 | 5 | 3 | 6 | | | | |

Fonte: Autoria própria

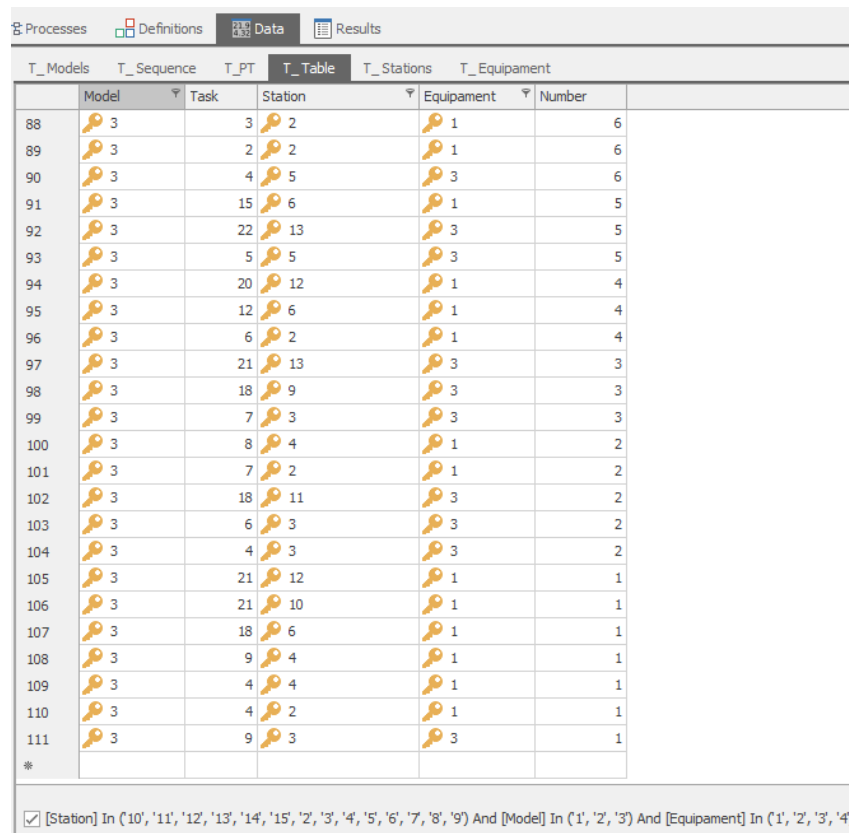
criar diferentes cenários, diferenciando não apenas o número de modelos de veículos a serem produzidos, mas também alterando os parâmetros que caracterizam o projeto de uma linha de montagem.

3.2.2 Construção do modelo

A simulação no Simio está baseada em objetos inteligentes. O sistema é visto como um conjunto de objetos com comportamentos próprios que interagem entre si. Na simulação a eventos discretos os componentes de um sistema, neste estudo como estações robóticas, são modelados como objetos e o estado destes variam de acordo com eventos específicos que ocorrem dentro de um espaço de tempo. A evolução do estado depende exclusivamente da ocorrência de eventos discretos e possivelmente assíncronos no tempo (FREITAS, 2008).

O modelo de simulação da linha robótica da Figura 1 foi desenvolvido no Simio com base no comportamento de uma estação de trabalho, representada pelo bloco *server* do Simio, mostrado na Figura 3 como um retângulo cinza claro com um triângulo preto ao centro. O bloco *server* do Simio implementa um modelo generalizado da estação de trabalho, a qual pode abrigar

Figura 2 – Janela do Simio mostrando a tabela de dados para cada modelo de veículo (*Model*), com as tarefas (*Task*) associadas às estações (*Station*), equipamentos (*Equipment*) e número de cópias de cada tarefa (*Number*).



| T_Models | T_Sequence | T_PT | T_Table | T_Stations | T_Equipment | Number |
|----------|------------|------|---------|------------|-------------|--------|
| 88 | 3 | 3 | 2 | 1 | 6 | |
| 89 | 3 | 2 | 2 | 1 | 6 | |
| 90 | 3 | 4 | 5 | 3 | 6 | |
| 91 | 3 | 15 | 6 | 1 | 5 | |
| 92 | 3 | 22 | 13 | 3 | 5 | |
| 93 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | |
| 94 | 3 | 20 | 12 | 1 | 4 | |
| 95 | 3 | 12 | 6 | 1 | 4 | |
| 96 | 3 | 6 | 2 | 1 | 4 | |
| 97 | 3 | 21 | 13 | 3 | 3 | |
| 98 | 3 | 18 | 9 | 3 | 3 | |
| 99 | 3 | 7 | 3 | 3 | 3 | |
| 100 | 3 | 8 | 4 | 1 | 2 | |
| 101 | 3 | 7 | 2 | 1 | 2 | |
| 102 | 3 | 18 | 11 | 3 | 2 | |
| 103 | 3 | 6 | 3 | 3 | 2 | |
| 104 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | |
| 105 | 3 | 21 | 12 | 1 | 1 | |
| 106 | 3 | 21 | 10 | 1 | 1 | |
| 107 | 3 | 18 | 6 | 1 | 1 | |
| 108 | 3 | 9 | 4 | 1 | 1 | |
| 109 | 3 | 4 | 4 | 1 | 1 | |
| 110 | 3 | 4 | 2 | 1 | 1 | |
| 111 | 3 | 9 | 3 | 3 | 1 | |
| * | | | | | | |

[Station] In ('10', '11', '12', '13', '14', '15', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9') And [Model] In ('1', '2', '3') And [Equipment] In ('1', '2', '3', '4')

Fonte: Autoria própria

diferentes tipos de robôs (embora apenas a estação S8 tenha dois tipos diferentes de robôs). Ao entrar na estação, o veículo a ser produzido requer um determinado tempo de processamento, durante o qual a estação permanece no estado *ocupado*. Os estados possíveis de uma estação são resumidos na Tabela 5. Note que o estado bloqueado ocorre na linha simulada, pois não há *buffers* entre as estações.

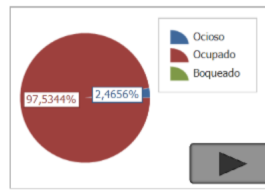
Tabela 5 – Estados de operação de uma estação de trabalho.

| Estado | Condição |
|------------------|---|
| <i>Ocupado</i> | Um veículo está sendo trabalhado na estação |
| <i>Ocioso</i> | Estação vazia |
| <i>Bloqueado</i> | O processamento de um veículo foi finalizado na estação, porém a estação seguinte está ocupada e não pode receber o veículo |

Fonte: Autoria própria

Na Figura 3, são mostrados ainda um gráfico de pizza da porcentagem de tempo que a estação permanece em cada estado, os tempos totais que a estação dedicou a cada modelo (T1, T2 e T3), o tempo de processamento de cada tipo de robô da estação (PT1, PT2, PT3 e PT4) e o tempo total de processamento (PT, *Processing Time*). A porcentagem de tempo no estado

Figura 3 – Bloco *server* do Simio que simula uma estação de trabalho.



T1 - 161,57
 T2 - 0 PT1 - 577
 T3 - 0 PT2 - 0
 PT3 - 0
 PT4 - 0

 PT - 1161

Fonte: Autoria própria

ocupado é a taxa de utilização da estação, ou seja, indica a eficiência na utilização da estação. Taxas próximas de 100% indicam que a estação está constantemente processando itens. Estações próximas de 100% de utilização (estação gargalo) determinam o tempo de ciclo da linha, ou seja, PT é o próprio tempo de ciclo da linha.

Os tempos totais T1, T2 e T3 dedicados a cada modelo são a base para o cálculo da economia feita ao desabilitar robôs. Este tempo corresponde ao tempo de produção do total de veículos produzidos dos modelos M1, M2 e M3, respectivamente, durante o tempo considerado de simulação. A simulação tem por objetivo mostrar que é possível dedicar o mesmo tempo de processamento para cada modelo com um número menor de robôs.

O tempo total de processamento PT de uma estação é calculado a partir dos tempos de processamento PT1, PT2, PT3 e PT4 de cada tipo de robô da estação, acrescido do *dead time* (tempo morto) improdutivo, considerado de 50% do tempo de ciclo CT para todas as estações, conforme o primeiro caso de (1).

$$PT = \begin{cases} \max\{PT1, PT2, PT3, PT4\} + 0,5 \cdot CT \\ 1,5 \cdot \max\{PT1, PT2, PT3, PT4\} + 0,5 \cdot CT & \text{com transporte} \\ \max\{PT1, PT2, PT3, PT4\} + 0,5 \cdot CT + 0,1 \cdot CT & \text{para o } track\text{-motion} \end{cases} \quad (1)$$

Caso a estação seja também transportadora, os tempos de processamento são penalizados em 50%, conforme o segundo caso de (1). Para o *track-motion*, é considerado um tempo adicional de 10% do tempo de ciclo, conforme o terceiro caso de (1). Os valores adotados acima são os mesmos de (MICHELS *et al.*, 2018), os quais foram obtidos pela observação do funcionamento de uma linha robótica comercial. Esses tempos são considerados determinísticos pois: i) operações robóticas ocorrem de forma programada, com baixíssima variabilidade de

tempo; ii) a variabilidade nos tempos de produção na linha considerada está ligada à variabilidade dos modelos a serem produzidos.

Os tempos de processamento de cada robô da estação são diferentes para cada modelo a ser produzido, sendo calculados a partir dos tempos e número de cópias das tarefas alocadas para cada tipo de robô, e do número de robôs deste tipo. Como exemplo ilustrativo, a Tabela 6 mostra os dados necessários para calcular o tempo de processamento de cada modelo em uma estação com três robôs do tipo 1.

Tabela 6 – Exemplo de dados das tarefas dos robôs do tipo 1 para montar cada modelo em uma estação.

| Modelo | Tarefa | Tempo | # Cópias |
|--------|--------|-------|----------|
| 1 | 1 | 57 | 8 |
| 1 | 3 | 50 | 6 |
| 1 | 2 | 38 | 6 |
| 2 | 6 | 57 | 8 |
| 3 | 1 | 57 | 1 |
| 3 | 8 | 43 | 6 |

Fonte: Autoria própria

Neste caso, os tempos de processamento $PT1(1)$, $PT1(2)$ e $PT1(3)$ de cada robô do tipo 1 para os modelos 1, 2 e 3 são dados por (2), (3) e (4), respectivamente.

$$PT1(1) = (57 \cdot 8 + 50 \cdot 6 + 38 \cdot 6)/3 = 328 \quad (2)$$

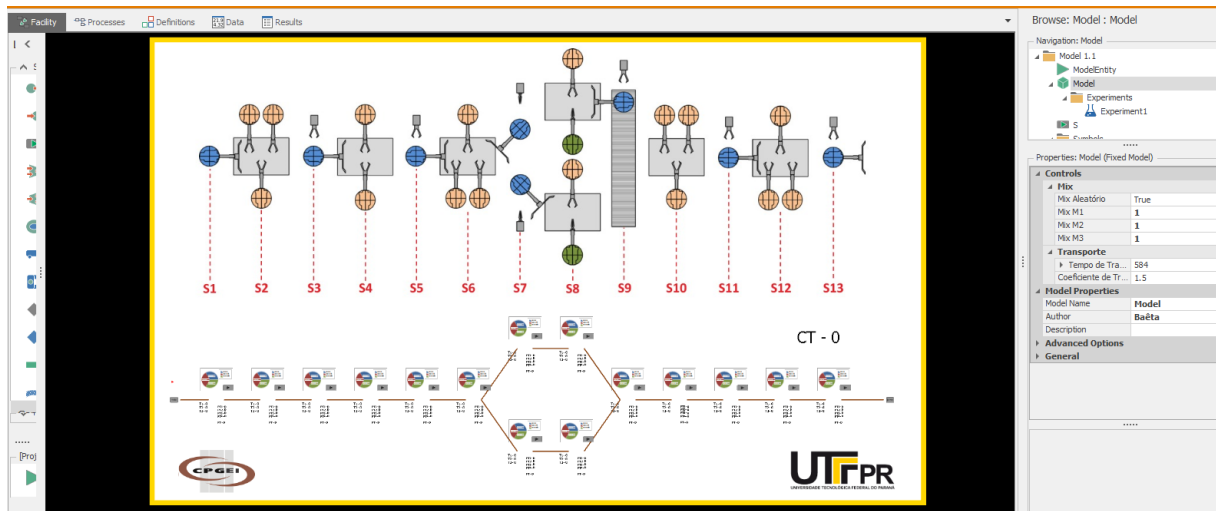
$$PT1(2) = (57 \cdot 8)/3 = 152 \quad (3)$$

$$PT1(3) = (57 \cdot 1 + 43 \cdot 6)/3 = 105 \quad (4)$$

Note que a carga de trabalho realizada em cada estação é fixa para cada modelo (depende apenas dos tempos e número de cópias das tarefas alocadas para a estação), tendo sido obtida pelo modelo de otimização de (MICHELS *et al.*, 2018). Porém, o tempo total de processamento da estação depende do número de robôs. A mesma premissa do modelo de otimização foi adotada no modelo de simulação, de que o trabalho de montagem realizado na estação é dividido igualmente entre os robôs da estação, que operam em paralelo.

A linha completa de montagem é composta pela interligação dos blocos *servers* da Figura 3, correspondendo a cada uma das 13 estações de trabalho, conforme a Figura 4. A alimentação da linha na estação S1 é feita assim que possível, ou seja, admite-se um *buffer* infinito na entrada da linha que permite alimentá-la ininterruptamente sem atraso. Como não há *buffers* entre as estações, o modelo de simulação implementa uma linha de passo discreto assíncrona.

Figura 4 – Janela do Simio com a linha de montagem simulada.

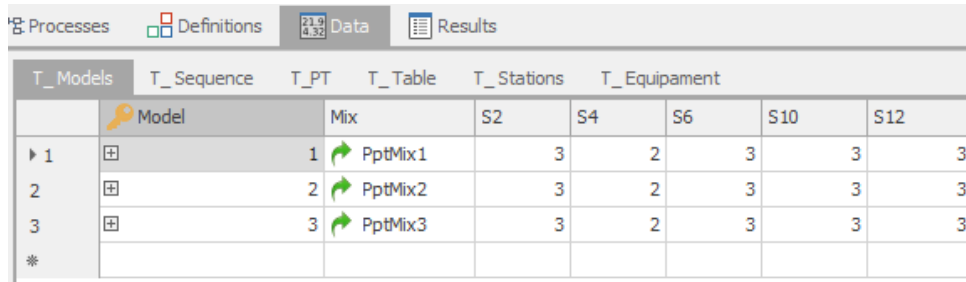


Fonte: Autoria própria

Na Figura 4, é possível visualizar as 13 estações S1 a S13, com uma estação paralela S8 e uma estação de transporte S9, na qual o robô é posicionado sobre um transportador (*conveyor* ou *track-motion device*). Tem-se 26 robôs no total, sendo 18 robôs de plataforma (*platform robots*) - 16 realizando tarefas de geometria e acabamento de soldagem e 2 realizando tarefas de parafusamento - e 8 robôs transportadores - 5 realizando tarefas de soldagem de acabamento, 2 realizando tarefas de parafusamento e um robô na entrada da linha para manuseio de peças. Na parte de baixo da Figura 4, tem-se os blocos *servers* com suas respectivas informações e o tempo de ciclo (CT) medido ao final da linha.

Observando o *layout* da Figura 1, as estações S2, S4, S6, S10 e S12 possuem mais de um robô do mesmo tipo. Todos são robôs de solda (*welding robot*), portanto, podem ser vistos como recursos redundantes, dependendo do modelo de veículo a ser produzido. A Figura 5 mostra a organização de uma tabela no Simio que permite configurar o número de robôs habilitados em cada estação S2, S4, S6, S10 e S12, para cada modelo de veículo (*Model*). Com esses dados disponíveis, um número diferente de robôs podem ser habilitados para a montagem de cada modelo diferente de veículo em cada uma das estações consideradas. Isso faz parte da dinâmica de testes a serem realizados na etapa de resultados, criando flexibilidade na linha de montagem durante as simulações.

Figura 5 – Tabela do Simio para configurar o número de robôs habilitados em cada estação S2, S4, S6, S10 e S12, para cada modelo de veículo (*Model*).



| T_Models | T_Sequence | T_PT | T_Table | T_Stations | T_Equipament | |
|----------|------------|------|---------|------------|--------------|-----|
| Model | Mix | S2 | S4 | S6 | S10 | S12 |
| 1 | PptMix1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | PptMix2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 3 | PptMix3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| * | | | | | | |

Fonte: Autoria própria

3.2.3 Verificação e validação

Na etapa de modelagem é importante construir um modelo conceitual, comparando o modelo do artigo (MICHELS *et al.*, 2018) com seu correspondente na simulação. A partir da aprovação do modelo conceitual, iniciam-se os testes de verificação e validação do modelo (BANKS *et al.*, 1984). A verificação está relacionada à implantação, refletindo corretamente os requisitos formulados e necessários ao modelo programado. Executam-se diferentes experimentos de simulação com o modelo desenvolvido e comparam-se os resultados obtidos da simulação com o comportamento da linha de montagem descrita em (MICHELS *et al.*, 2018). Nesta etapa, a simulação reproduziu satisfatoriamente aos resultados apresentados no artigo.

3.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Este capítulo descreve a linha de montagem robótica otimizada em (MICHELS *et al.*, 2018) para a produção do modelo de veículo M3 (mais complexo). Porém, a linha tem capacidade para produzir os modelos mais simples M1 e M2. Portanto, pode-se considerar que a referida linha está superdimensionada para a produção dos modelos M1 e M2. De fato, a partir de um modelo de simulação da linha desenvolvido nesta dissertação, foi possível constatar uma menor taxa de utilização em algumas estações quando ocorre a montagem dos modelos M1 e M2. O modelo de simulação desenvolvido no pacote Simio permite ainda alterar dinamicamente (de acordo com o modelo de veículo a ser produzido) o tempo de processamento dispendido em cada estação. Assim, uma característica importante da simulação é a capacidade de avaliar campanhas com diferentes *mix* de modelos e sequências de produção. Embora os tempos de processamento das tarefas executadas por robôs sejam determinísticos para cada modelo, as medidas de desempenho são valores médios para uma campanha que envolva a produção de

vários modelos. Para a produção de um único modelo, os resultados são determinísticos.

Além disso, o modelo de simulação permite desabilitar seletivamente robôs de determinadas estações, de acordo com o modelo a ser produzido. Assim, uma determinada estação pode utilizar todos os robôs para um determinado modelo, mas desabilitar parte dos robôs para a produção de outro modelo. No caso da manutenção, um robô é desabilitado para todos os modelos, limitado aos robôs com redundâncias. Isso caracteriza a reconfiguração dinâmica da linha que ocorre durante a produção. O Capítulo 4 a seguir apresenta os resultados obtidos da simulação, considerando cenários de produção flexível e analisando o desempenho da linha para diferentes *mix* e sequências de produção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do modelo de simulação proposto foram organizados do seguinte modo. A Seção 4.1 evidencia as estações com ociosidade, a depender do modelo que nela é processado. Os resultados obtidos fornecem indicadores quanto à possibilidade de desabilitar robôs em algumas estações, cujo experimento é conduzido na Seção 4.2. Na Seção 4.3, a linha é avaliada tendo por base a entrada de diferentes modelos de veículos, ou seja, considerando-se uma linha de modelo misto. Variações percentuais na quantidade dos diferentes modelos de veículos que entram na linha para um dado horizonte de tempo são avaliadas, de modo a fornecer indicadores de desempenho em diferentes condições operacionais. A Seção 4.4 analisa as sequências de produção diária, com ênfase na manutenção preventiva e nos impactos no tempo de ciclo. A Seção 4.5 apresenta o limite destas ações e os impactos provocados pelo (des)balanceamento na linha de modelo misto. A Seção 4.6 discute os resultados obtidos. Todas as simulações computacionais foram efetuadas em tempos inferiores a cinco segundos em um computador pessoal (64 bit Intel™ i7 CPU - 2.9 GHz, com 8 GB de RAM).

4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES OCIOSAS

Nesta seção, as estações ociosas são identificadas pela simulação da produção de 500 veículos de cada modelo separadamente (sem *mix* de produção). A simulação possui a mesma configuração, tipo e número de robôs da Figura 1. As estações S2, S4, S6, S10 e S12 são consideradas para desabilitar robôs, pois possuem mais de um robô do mesmo tipo. Neste caso, é investigado se um número menor de robôs pode realizar o mesmo trabalho sem comprometer significativamente o tempo de ciclo de projeto da linha, fixado em 1168 unidades de tempo, conforme (MICHELS *et al.*, 2018). A Tabela 7 sumariza os experimentos realizados.

Tabela 7 – Tabela resumo.

| Tabela | Descrição |
|----------|--|
| Tabela 8 | Taxa de utilização das estações para cada modelo M1, M2 e M3 |
| Tabela 9 | Tempo de processamento das estações para cada modelo M1, M2 e M3 |

Fonte: Autoria própria

As taxas de utilização da Tabela 8 mostram que, para a produção apenas do modelo M1, as estações S8 e S12 têm as mais baixas taxas de utilização de 78% e 68%, respectivamente. Note que a estação S1 é uma estação de transporte alimentadora da linha. Portanto, sua baixa

taxa de utilização é explicada pela restrição imposta pelo diagrama de precedência e tarefas de geometria da estação S2, ou seja, S1 passa quase metade do tempo bloqueada devido a S2. Neste caso, a estação S12 é escolhida para desabilitar robôs quando o modelo M1 é produzido, pois possui mais de um robô do mesmo tipo.

Tabela 8 – Taxa de utilização (%) das estações.

| Modelo | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 |
|--------|----|-----------|-----------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|----|------------|-----|------------|-----|
| M1 | 49 | 98 | 89 | 97 | 90 | 97 | 95 | 78 | 92 | 93 | 98 | 68 | 95 |
| M2 | 49 | 96 | 49 | 97 | 96 | 97 | 25 | 91 | 98 | 84 | 98 | 90 | 96 |
| M3 | 49 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 93 | 97 | 95 | 97 | 93 |

Fonte: Autoria própria

Quando apenas o modelo M2 é produzido, as estações S3, S7 e S10 estão subutilizadas com 49%, 25% e 84% de taxa de utilização, respectivamente. Note que, pela Figura 1, S3 possui somente um robô e, portanto, não pode ser desabilitado. A estação S7 possui dois robôs que não podem ser desabilitados sob pena de deixar de alimentar uma das estações paralelas de S8, a qual tem taxa de utilização de 91% na produção de M2. Assim, a estação S10, que possui três robôs idênticos, poderá ter robôs desabilitados para o modelo M2.

No caso do modelo M3, todas as estações possuem taxas de utilização balanceadas acima de 90% de acordo com a Tabela 8. Isso ocorre porque o projeto da linha da Figura 1 foi otimizado para produção do modelo M3, segundo (MICHELS *et al.*, 2018). Assim, não é possível reduzir robôs nas estações sem que o tempo de ciclo seja alterado e supere o valor de referência de 1168 unidades de tempo (u.t.), conforme será mostrado na Seção 4.2.

Na Tabela 9, são mostrados os tempos de processamento (PT - *Processing Time*) de cada estação, assim como o tempo de ciclo (CT - *Cycle Time*) medido ao final da linha para a produção de cada modelo M1, M2 e M3 separadamente. Note que os tempos CT iguais a 1162 e 1165 u.t. para os modelos M1 e M2, respectivamente, estão abaixo do tempo CT de projeto da linha de 1168 u.t. Isso significa que há folga na linha otimizada para o modelo M3, cujo tempo CT é de exatamente 1168 u.t.

Tabela 9 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo.

| Modelo | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|--------|-----|-----------|------------|-----------|------|-----------|------------|-------------|------|-------------|------|------------|------|-------------|
| M1 | 584 | 1161 | 1064 | 1159 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 811 | 1132 | 1162 |
| M2 | 584 | 1148 | 584 | 1153 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1074 | 1141 | 1165 |
| M3 | 584 | 1168 | 1165 | 1167 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1166 | 1115 | 1168 |

Fonte: Autoria própria

Os tempos de processamento permitem identificar as estações gargalo nas quais o tempo PT é próximo de CT. Estações com PT abaixo de CT possuem tempo de sobra para realizar

as mesmas operações com um número menor de robôs. Assim, as estações escolhidas para desabilitar robôs com base nos tempos de processamento são as mesmas da Tabela 8, ou seja, S12 para M1 e S10 para M2. Note que as estações S7 e S8 possuem duas unidades operando em paralelo. Portanto, os tempos de processamento mostrados na Tabela 9 para S7 e S8 devem ser divididos pela metade. Portanto, S7 e S8 não configuram estações gargalo nos indicadores da Tabela 9.

A partir da Tabela 9, calcula-se o índice de suavidade (IS) para cada condição de operação da linha, dado por (5),

$$IS = \sqrt{\sum_{j=1}^{13} (CT - S_j)^2} \quad (5)$$

sendo CT o tempo de ciclo da linha e S_j o tempo de processamento da estação j . No caso de modelos mistos, S_j assume a média dos tempos de processamento de cada modelo ponderada pela proporção produzida de cada modelo.

Quanto menor a variação dos tempos de processamento entre as estações, menor o índice de suavidade, indicando um melhor balanceamento (GERHARDT *et al.*, 2007). Os valores obtidos IS para os modelos M1, M2 e M3 foram 736,01 u.t., 1216,53 u.t., e 589,17 u.t., respectivamente. Portanto, o índice de suavidade indica que a linha para o modelo M3 é a melhor balanceada (ou seja, o tempo de ciclo das estações é mais homogêneo). Note que, para o modelo M3, as estações excedem 90% de taxa de utilização, indicando cargas de trabalho mais homogêneas por estação e melhorando o IS, exceto para a estação S1 que tem a função de alimentação da linha.

4.2 DESEMPENHO DA LINHA SEM *MIX* DE PRODUÇÃO

Esta seção avalia o efeito no tempo de ciclo da linha ao desabilitar robôs. Tem-se dois objetivos: i) definir o número limite de robôs que podem ser desabilitados sem causar impacto no tempo de ciclo; ii) definir uma penalidade aceitável para o tempo de ciclo da linha ao desabilitar robôs acima do limite estabelecido no item i). A Tabela 10 sumariza os experimentos realizados.

A Tabela 11 mostra os tempos de processamento das estações e o tempo de ciclo resultante ao desabilitar robôs nas estações S2, S4, S6, S10 e S12 para o modelo M1. As estações S2, S4 e S6 foram incluídas como forma de avaliar situações limites. A primeira linha da Tabela 11 é mostrada por conveniência, pois é igual à primeira linha da Tabela 9, considerando todos os robôs habilitados. As linhas 2 a 5 da Tabela 11 evidenciam que, ao desabilitar robôs

Tabela 10 – Tabela resumo.

| Tabela | Descrição |
|-----------|--|
| Tabela 11 | Desabilita robôs para M1 em cada uma das estações (S2,S4,S6,S10,S12) |
| Tabela 12 | Desabilita robôs para M2, segundo o mesmo procedimento da Tabela 11 |
| Tabela 13 | Desabilita robôs para M3, segundo o mesmo procedimento da Tabela 11 |

Fonte: Autoria própria

em cada uma das estações S2, S4, S6 e S10 separadamente, o tempo CT é elevado a valores superiores a 1168 unidades de tempo (referência). Quando 1 robô da estação S12 é desabilitado (última linha das Tabela 11), o tempo PT da estação S12 é alterado de 811 para 924 unidades de tempo. Entretanto, o tempo CT de 1162 unidades não é alterado. Isso justifica a escolha de S12 para desabilitar robôs na produção de M1, corroborando com a indicação de estações ociosas da Seção 4.1.

Tabela 11 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M1.

| No. robôs | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------|-------------|
| (3,2,3,3,3) | 584 | 1161 | 1064 | 1159 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 811 | 1132 | 1162 |
| (2,2,3,3,3) | 584 | 1450 | 1064 | 1159 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 811 | 1132 | 1450 |
| (3,1,3,3,3) | 584 | 1161 | 1064 | 1734 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 811 | 1132 | 1734 |
| (3,2,2,3,3) | 584 | 1161 | 1064 | 1159 | 1075 | 1447 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 811 | 1132 | 1447 |
| (3,2,3,2,3) | 584 | 1161 | 1064 | 1159 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1377 | 1162 | 811 | 1132 | 1377 |
| (3,2,3,3,2) | 584 | 1161 | 1064 | 1159 | 1075 | 1159 | 2264 | 1844 | 1089 | 1112 | 1162 | 924 | 1132 | 1162 |

Fonte: Autoria própria

Análise similar é realizada para avaliação do desempenho da linha com a entrada de M2. Os resultados são sumarizados na Tabela 12. A linha 1 da Tabela 12 é igual à linha 2 da Tabela 9, considerando todos os robôs habilitados. Ao desabilitar robôs nas estações S2, S4, S6 e S12, os valores finais de CT ultrapassam consideravelmente o tempo de ciclo estabelecido em 1168 u.t., conforme evidenciado nas linhas 2, 3, 4 e 6 da Tabela 12. Contudo, ao desabilitar um robô em S10, apesar da elevação de CT para 1212 unidades de tempo, ou seja, cerca de 3,8% acima do valor referência, ainda assim é o menor CT observado na Tabela 12 com a redução de 1 robô na produção de M2. Isso confirma a escolha da estação S10 para desabilitar 1 robô no caso de M2, de acordo com o resultado da Seção 4.1.

Os resultados da Tabela 13 sumarizam a análise quando é realizada a avaliação do desempenho da linha com a entrada de M3. A linha 1 da Tabela 13 é igual à linha 3 da Tabela 9, considerando todos os robôs habilitados. Ao desabilitar robôs nas estações S2, S4, S6, S10 e S12, os valores finais de CT ultrapassam consideravelmente o tempo de ciclo de referência estabelecido em 1168 u.t., conforme pode ser evidenciado nas linhas 2 a 6 da Tabela 13. Deste modo, alinhado ao estabelecido na Seção 4.1, não é possível reduzir o uso de robôs nas estações

Tabela 12 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M2.

| No. robôs | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|--------------------|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|------|-------------|------|------|------|-------------|
| (3,2,3,3,3) | 584 | 1148 | 584 | 1153 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1074 | 1141 | 1165 |
| (2,2,3,3,3) | 584 | 1430 | 584 | 1153 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1074 | 1141 | 1433 |
| (3,1,3,3,3) | 584 | 1148 | 584 | 1722 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1074 | 1141 | 1724 |
| (3,2,2,3,3) | 584 | 1148 | 584 | 1153 | 1139 | 1443 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1074 | 1141 | 1447 |
| (3,2,3,2,3) | 584 | 1148 | 584 | 1153 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1212 | 1162 | 1074 | 1141 | 1212 |
| (3,2,3,3,2) | 584 | 1148 | 584 | 1153 | 1139 | 1157 | 584 | 2174 | 1163 | 1002 | 1162 | 1319 | 1141 | 1321 |

Fonte: Autoria própria

quando ocorre a passagem de M3, sem um aumento considerável no valor de CT. De fato, o projeto da linha foi concebido para a passagem de M3. Assim, a atual configuração de *layout* não possui ociosidades significativas quando M3 é produzido, conforme evidenciado também na Tabela 8.

Tabela 13 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar robôs em (S2, S4, S6, S10, S12) para M3.

| No. robôs | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (3,2,3,3,3) | 584 | 1168 | 1165 | 1167 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1166 | 1115 | 1168 |
| (2,2,3,3,3) | 584 | 1460 | 1165 | 1167 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1166 | 1115 | 1460 |
| (3,1,3,3,3) | 584 | 1168 | 1165 | 1750 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1166 | 1115 | 1750 |
| (3,2,2,3,3) | 584 | 1168 | 1165 | 1167 | 1165 | 1457 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1166 | 1115 | 1457 |
| (3,2,3,2,3) | 584 | 1168 | 1165 | 1167 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1460 | 1141 | 1166 | 1115 | 1460 |
| (3,2,3,3,2) | 584 | 1168 | 1165 | 1167 | 1165 | 1166 | 2317 | 2330 | 1119 | 1168 | 1141 | 1457 | 1115 | 1457 |

Fonte: Autoria própria

4.3 DESEMPENHO DA LINHA PARA DIFERENTES MIX DE PRODUÇÃO

A Tabela 14 mostra os resultados do tempo médio de processamento das estações (PT) e tempo médio de ciclo (CT) da linha para diferentes *mix* de produção. Por exemplo, a linha um da Tabela 14 indica que a probabilidade de entrada de, respectivamente, M1, M2 e M3 na linha é de 80%, 0% e 20%. Deste modo, na média, estima-se que o total de peças produzidas esteja alinhado ao respectivo *mix* produtivo. Em testes preliminares efetuados com as configurações de *mix* da Tabela 14 e com a linha com todos os robôs ativos (ou seja, sem desabilitar robôs nas estações S2, S4, S6, S10 e S12), evidenciou-se que o tempo de referência de 1168 unidades é respeitado; assim, independentemente do *mix* produtivo avaliado, o CT obtido era, no pior caso, 1168 unidades de tempo. Já no experimento sumarizado na Tabela 14 verificou-se a possibilidade de desabilitar robôs quando da passagem de M1 em S12 e M2 em S10. Estas decisões foram balizadas nos experimentos realizados nas Seções 4.1 e 4.2. Ressalta-se que foram realizadas simulações relativas à produção de mais de 6000 itens para cada *mix* avaliado,

não sendo observadas variações significativas nos valores médios de PT e CT para diferentes execuções com o mesmo *mix* produtivo.

A Tabela 14 evidencia as influências em CT devido às variações de *mix* e da reconfiguração dinâmica do uso dos robôs nas estações S10 e S12 para modelos específicos de veículos. Tendo por base o valor de referência de 1168 unidades de tempo, destaca-se que todos os valores de CT obtidos ultrapassaram, no pior caso (1207 na última linha da Tabela 14), cerca de 3,3% da referência. Nota-se que a produção de M2 afeta significativamente o resultado de CT. Quando M2 não é produzido (linhas 1 e 2 da Tabela 14), os valores de CT ficam abaixo do valor de referência e não há alteração significativa entre produzir 80% de M1 e 20% de M3, ou vice-versa. À medida que M2 é produzido (linhas 3, 4, 5 e 6 da Tabela 14), os valores de CT violam o valor de referência e ampliam-se as diferenças entre produzir mais M1 ou M3, com valores menores de CT quando se produz mais M1 em detrimento de M3. Porém, quando a produção de M2 é de 80% (linhas 7 e 8 da Tabela 14), não apenas os maiores valores de CT são obtidos (1205 e 1207), como a diferença entre produzir mais M1 ou M3 não é significativa. Isso reflete a ideia de que há menos folga para a produção de M2 quando todos os três modelos são produzidos. Assim, com parte dos robôs desabilitados para a produção de M1 e M2, deve-se dar preferência para a produção de M1 e M3.

Assim, tem-se soluções que possibilitam a reconfiguração dinâmica da linha sem afetar significativamente CT, dependendo do *mix* produtivo em análise.

Tabela 14 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para um *mix* de produção (M1-M2-M3), desabilitando 1 robô da S12 para M1 e 1 robô da S10 para M2.

| <i>Mix</i> (%) | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (80,0,20) | 584 | 1162 | 1084 | 1161 | 1093 | 1160 | 2275 | 1941 | 1095 | 1123 | 1158 | 972 | 1129 | 1166 |
| (20,0,80) | 584 | 1167 | 1145 | 1165 | 1147 | 1165 | 2306 | 2233 | 1113 | 1157 | 1145 | 1118 | 1118 | 1167 |
| (80,20,0) | 584 | 1158 | 968 | 1158 | 1088 | 1159 | 1928 | 1910 | 1104 | 1132 | 1162 | 954 | 1134 | 1171 |
| (0,20,80) | 584 | 1164 | 1049 | 1164 | 1160 | 1164 | 1970 | 2299 | 1128 | 1177 | 1145 | 1148 | 1120 | 1175 |
| (40,40,20) | 584 | 1157 | 892 | 1158 | 1119 | 1160 | 1603 | 2073 | 1125 | 1163 | 1158 | 1032 | 1132 | 1182 |
| (20,40,40) | 584 | 1159 | 912 | 1160 | 1137 | 1161 | 1613 | 2170 | 1131 | 1174 | 1154 | 1081 | 1129 | 1190 |
| (20,80,0) | 584 | 1151 | 680 | 1154 | 1126 | 1157 | 920 | 2108 | 1148 | 1192 | 1162 | 1044 | 1139 | 1205 |
| (0,80,20) | 584 | 1152 | 700 | 1156 | 1144 | 1159 | 931 | 2205 | 1154 | 1203 | 1158 | 1092 | 1136 | 1207 |

Fonte: Autoria própria

4.4 MANUTENÇÃO

O próximo passo adotado foi simular situações com o objetivo de direcionar a programação da produção diária (elaboração de “filmes” de produção). Desta forma, objetiva-se adequar o

processo produtivo em função dos eventos previstos em uma rotina na área de manufatura, como manutenção preventiva, redução de uso dos robôs em função de alteração de demanda e também para aqueles eventos não previstos, como a colisão de um robô com a peça que está sendo soldada, por exemplo. Os experimentos das simulações foram acima de 6000 itens produzidos, admitindo alimentação ininterrupta na entrada da linha (S1), ou seja, considerou-se um *buffer* infinito na entrada do sistema.

A ênfase é avaliar os melhores cenários para auxiliar na manutenção dos robôs, que são então desabilitados, focando na preventiva parcial ou completa das peças de desgaste. Esses cenários podem auxiliar também em planos de contingência ou degradado quando ocorrem falhas nos robôs. O objetivo é avaliar diferentes sequências de produção dos modelos M1, M2 e M3 que têm menor impacto no tempo de ciclo.

A Tabela 15 mostra o tempo de processamento das estações (PT) e o tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo, sem desabilitar robôs para diferentes *sequências de produção* ($aM1-bM2-cM3$), sendo a , b e c o número produzido de cada modelo M1, M2 e M3 na sequência, respectivamente. O objetivo é utilizá-la como referência na análise do impacto no balanceamento da linha quando robôs são desabilitados.

O menor tempo de ciclo é obtido quando apenas os modelos M1 e M2 são produzidos (linha 3 da Tabela 15), deixando de produzir o modelo M3. Note que o valor de CT está abaixo do valor otimizado de 1168 unidades de tempo. Além disso, produzir uma sequência com o mesmo número de itens de cada modelo (linhas 1 e 2 da Tabela 15), não altera significativamente o valor de CT (1167 e 1165, respectivamente).

Tabela 15 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes sequências de produção ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, sem desabilitar os robôs.

| <i>Sequencia</i> | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (1M1-1M2-1M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1094 | 1155 | 1017 | 1129 | 1167 |
| (3M1-3M2-3M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1094 | 1155 | 1017 | 1129 | 1165 |
| (3M1-3M2-0M3) | 584 | 1155 | 824 | 1156 | 1107 | 1158 | 1424 | 2009 | 1126 | 1057 | 1162 | 943 | 1137 | 1162 |
| (3M1-3M2-1M3) | 584 | 1156 | 873 | 1158 | 1115 | 1159 | 1552 | 2055 | 1125 | 1073 | 1159 | 974 | 1133 | 1164 |
| (0M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 875 | 1160 | 1152 | 1162 | 1451 | 2252 | 1141 | 1085 | 1152 | 1120 | 1128 | 1167 |
| (3M1-0M2-3M3) | 584 | 1165 | 1115 | 1163 | 1120 | 1163 | 2291 | 2087 | 1104 | 1140 | 1152 | 989 | 1124 | 1167 |
| (1M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 902 | 1160 | 1141 | 1161 | 1567 | 2194 | 1137 | 1089 | 1153 | 1076 | 1129 | 1168 |
| (3M1-1M2-3M3) | 584 | 1162 | 1039 | 1162 | 1123 | 1162 | 2047 | 2099 | 1112 | 1120 | 1153 | 1001 | 1126 | 1168 |

Fonte: Autoria própria

Conforme verificado nas seções anteriores, a estação robótica S12 indicou ter um valor de 68% de taxa de utilização para o modelo M1, de 90% para M2 e 97% para M3, quando analisamos a taxa de utilização (%) individualmente por modelo produzido. A Tabela 16 mostra

o tempo de processamento das estações (PT) e o tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar 1 robô da S12 em todos os modelos para diferentes *sequências de produção* ($aM1-bM2-cM3$), sendo a , b e c o número produzido de cada modelo M1, M2 e M3 na sequência, respectivamente.

Tabela 16 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes *sequências de produção* ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô da S12 para todos os modelos.

| <i>Sequencia</i> | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (1M1-1M2-1M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2216 | 1124 | 1094 | 1155 | 1233 | 1129 | 1312 |
| (3M1-3M2-3M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1094 | 1155 | 1233 | 1129 | 1313 |
| (3M1-3M2-0M3) | 584 | 1155 | 824 | 1156 | 1107 | 1158 | 1424 | 2009 | 1126 | 1057 | 1162 | 1122 | 1137 | 1240 |
| (3M1-3M2-1M3) | 584 | 1156 | 873 | 1158 | 1115 | 1159 | 1552 | 2055 | 1125 | 1073 | 1159 | 1169 | 1133 | 1271 |
| (3M1-0M2-3M3) | 584 | 1165 | 1115 | 1163 | 1120 | 1163 | 2291 | 2087 | 1104 | 1140 | 1152 | 1191 | 1124 | 1307 |
| (3M1-1M2-3M3) | 584 | 1162 | 1039 | 1162 | 1123 | 1162 | 2047 | 2099 | 1112 | 1120 | 1153 | 1209 | 1126 | 1311 |
| (0M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 875 | 1160 | 1152 | 1162 | 1451 | 2252 | 1141 | 1085 | 1152 | 1388 | 1128 | 1388 |
| (1M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 902 | 1160 | 1141 | 1161 | 1567 | 2194 | 1134 | 1089 | 1153 | 1322 | 1129 | 1356 |

Fonte: Autoria própria

Produzir uma sequência com o mesmo número de cada modelo (linhas 1 e 2 da Tabela 16), não altera significativamente o valor de CT (1312 e 1313, respectivamente). Assim, a análise seguinte é feita com diferentes sequências a partir da sequência base (3M1-3M2-3M3). O menor tempo de ciclo é obtido quando produzimos apenas modelos M1 e M2 (linha 3 da Tabela 16), deixando de produzir o modelo M3. Neste caso, ocorre elevação do valor de CT para 1240 unidades de tempo, ou seja, cerca de 6,16% acima do valor referência. À medida que M3 é produzido (linha 4 em diante da Tabela 16) o valor de CT se eleva. Porém, a produção de M2 não altera muito o resultado (1313, 1307 e 1311) quando 3 modelos de M1 e M3 são produzidos na sequência (linhas 2, 5 e 6 da Tabela 16, respectivamente). Caso a produção de M1 seja menor que M2 e M3 (linhas 7 e 8 da Tabela 16), então o valor de CT eleva-se muito (1388 e 1356, respectivamente). Portanto, para 1 robô desabilitado em S12 para os três modelos, a produção de M2 não impacta significativamente no tempo de ciclo, caso M1 e M3 sejam produzidos na sequência base. Caso seja necessário reduzir a produção de M1 ou M3 na sequência base, deve-se optar por M1 em detrimento de M3, pois fornece o menor valor de CT. Além disso, a produção de M3 sem M1, eleva muito o valor de CT.

A próxima estação escolhida durante a simulação, é a estação S10, note que a estação S10 indicou ter um valor de 93% de taxa de utilização para o modelo M1, de 84% para M2 e 97% para M3, quando analisamos a taxa de utilização (%) sem o **mix** e sem a programação de produção. A Tabela 17 mostra o tempo de processamento das estações (PT) e o tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar 1 robô da S10 em todos os modelos para

diferentes *seqüências de produção* ($aM1, bM2, cM3$).

Tabela 17 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes *seqüências de produção* ($aM1-bM2-cM3$) - a, b e c é o número produzido de cada modelo na seqüência, desabilitando 1 robô da S10 para todos os modelos.

| <i>Seqüencia</i> | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (1M1-1M2-1M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1017 | 1129 | 1349 |
| (3M1-3M2-3M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1017 | 1129 | 1349 |
| (3M1-3M2-0M3) | 584 | 1155 | 824 | 1156 | 1107 | 1158 | 1424 | 2009 | 1126 | 1295 | 1162 | 943 | 1137 | 1294 |
| (3M1-3M2-1M3) | 584 | 1156 | 873 | 1158 | 1115 | 1159 | 1552 | 2055 | 1125 | 1318 | 1159 | 974 | 1133 | 1318 |
| (0M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 875 | 1160 | 1152 | 1162 | 1451 | 2252 | 1141 | 1336 | 1152 | 1120 | 1128 | 1336 |
| (1M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 902 | 1160 | 1141 | 1161 | 1567 | 2194 | 1134 | 1342 | 1153 | 1076 | 1129 | 1342 |
| (3M1-1M2-3M3) | 584 | 1162 | 1039 | 1162 | 1123 | 1162 | 2047 | 2099 | 1112 | 1389 | 1153 | 1001 | 1126 | 1389 |
| (3M1-0M2-3M3) | 584 | 1165 | 1115 | 1163 | 1120 | 1163 | 2291 | 2087 | 1104 | 1419 | 1152 | 989 | 1124 | 1419 |

Fonte: Autoria própria

Produzir uma seqüência com o mesmo número de cada modelo (linhas 1 e 2 da Tabela 17), não altera o valor de CT (1349), mesmo valor para ambos. Assim, a análise seguinte é feita com diferentes seqüências a partir da seqüência base (3M1-3M2-3M3). O menor tempo de ciclo é obtido quando produzimos apenas modelos M1 e M2 (linha 3 da Tabela 17), deixando de produzir o modelo M3. Neste caso, ocorre elevação do valor de CT para 1294 unidades de tempo, ou seja, cerca de 10,78% acima do valor referência. Valor em torno de 4% acima do resultado do menor tempo de ciclo, linha 3 da Tabela 17. À medida que M3 é produzido (linha 4 em diante da Tabela 17) o valor de CT se eleva. Porém, a produção de M1 não altera muito o resultado (1349, 1336 e 1342) quando 3 modelos de M2 e M3 são produzidos na seqüência (linhas 2, 5 e 6 da Tabela 17, respectivamente). Caso a produção de M2 seja menor que M1 e M3 (linhas 7 e 8 da Tabela 17), então o valor de CT eleva-se muito (1389 e 1409, respectivamente). Portanto, para 1 robô desabilitado em S10 para os três modelos, a produção de M1 não impacta significativamente no tempo de ciclo, caso M2 e M3 sejam produzidos na seqüência base. Caso seja necessário reduzir a produção de M2 ou M3 na seqüência base, deve-se optar por M2 em detrimento de M3, pois fornece o menor valor de CT. Além disso, a produção de M3 sem M2, eleva muito o valor de CT.

A próxima condição é desabilitar as estações S12 e S10 simultaneamente. A Tabela 18 mostra o tempo de processamento das estações (PT) e o tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar 1 robô de cada estação S12 e S10 em todos os modelos para diferentes *seqüências de produção* ($aM1-bM2-cM3$).

Todos os modelos tem impacto relevante no CT. Produzir uma seqüência com o mesmo número de cada modelo (linhas 1 e 2 da Tabela 18), não altera significativamente o valor de CT (1353 e 1356, respectivamente). Assim, a análise seguinte é feita com diferentes seqüências a

Tabela 18 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes sequências de produção ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô tanto da S12 quanto da S10 para todos os modelos.

| Sequencia | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (1M1-1M2-1M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1233 | 1129 | 1353 |
| (3M1-3M2-3M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1161 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1233 | 1129 | 1356 |
| (3M1-3M2-0M3) | 584 | 1155 | 824 | 1156 | 1107 | 1158 | 1424 | 2009 | 1126 | 1295 | 1162 | 1122 | 1137 | 1304 |
| (3M1-3M2-1M3) | 584 | 1156 | 873 | 1158 | 1115 | 1159 | 1552 | 2055 | 1125 | 1318 | 1159 | 1169 | 1133 | 1326 |
| (1M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 902 | 1160 | 1141 | 1161 | 1567 | 2194 | 1134 | 1342 | 1153 | 1322 | 1129 | 1356 |
| (0M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 875 | 1160 | 1152 | 1162 | 1451 | 2252 | 1141 | 1336 | 1152 | 1388 | 1128 | 1388 |
| (3M1-1M2-3M3) | 584 | 1162 | 1039 | 1162 | 1123 | 1162 | 2047 | 2099 | 1112 | 1389 | 1153 | 1209 | 1126 | 1389 |
| (3M1-0M2-3M3) | 584 | 1165 | 1115 | 1163 | 1120 | 1163 | 2291 | 2087 | 1104 | 1418 | 1152 | 1191 | 1124 | 1418 |

Fonte: Autoria própria

partir da sequência base (3M1-3M2-3M3). O menor tempo de ciclo é obtido quando produzimos apenas modelos M1 e M2 (linha 3 da Tabela 18), deixando de produzir o modelo M3. Neste caso, ocorre elevação do valor de CT para 1303 unidades de tempo, ou seja, cerca de 11,56% acima do valor referência. Valor em torno de 4,8% acima do resultado do menor tempo de ciclo na linha 3 da Tabela 17. Não produzir M2, acarreta o pior cenário de produção, eleva muito o valor de CT. Caso seja necessário produzir 100% de M2 e M3, é melhor produzir 100% de M1, pois fornece o mesmo valor de CT, conforme linha 2 (1356) da Tabela 18 em comparação à linha 5.

Tabela 19 – Tabela resumo das alternativas de sequenciamento de M1, M2 e M3 quando 1 robô é desabilitado para manutenção em cada uma das estações S12 e S10.

| Estação (1 robô desabilitado) | Melhor sequência CT | Pior sequência CT | Sequência alternativa CT |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| S12 | (3M1-3M2-0M3) 1240 | (0M1-3M2-3M3) 1388 | (3M1-3M2-3M3) 1313 |
| S10 | (3M1-3M2-0M3) 1294 | (3M1-0M2-3M3) 1409 | (3M1-3M2-3M3) 1349 |
| S12 e S10 | (3M1-3M2-0M3) 1304 | (3M1-0M2,-M3) 1418 | (3M1-3M2-3M3) 1356 |

Fonte: Autoria própria

A Tabela 19 mostra que, quando há necessidade de desabilitar 1 robô na estação S12, S10 ou em ambas as estações, a sequência considerada que produz o menor tempo de ciclo é a que não produz M3 em todos os casos. No caso em que M3 deva ser produzido por questões de demanda, a sequência na qual M1, M2 e M3 são produzidos em igual proporção de três itens para cada modelo é a alternativa a ser adotada. Não produzir um dos modelos M1 ou M2 quando três modelos M3 são produzidos na sequência é a opção menos recomendada, pois gera os maiores tempos de ciclo.

4.5 DESABILITANDO ROBÔS DE 3 ESTAÇÕES

Nas seções 4.3 e 4.4, as estações S12 e S10 foram consideradas para desabilitar robôs, pois possuem mais de 1 robô do mesmo tipo e possuem taxas de utilização de 68% e 84% para

os modelos M1 e M2, respectivamente, segundo a Tabela 8. Ou seja, existe uma folga nestas estações para a produção desses modelos. As estações S2, S4 e S6, embora possuam mais de 1 robô do mesmo tipo, não foram consideradas, pois estão próximas da taxa de utilização máxima para os três modelos: 97 a 98% na estação S2 e 97% nas estações S4 e S6. Portanto, desabilitar 1 robô dessas estações, representa uma situação crítica a ser considerada nesta seção.

A Tabela 20 mostra o tempo de processamento das estações (PT) e o tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo ao desabilitar 1 robô de cada uma das estações S12, S10 e S6 em todos os modelos para diferentes sequências de produção ($aM1-bM2-cM3$).

Tabela 20 – Tempo de processamento das estações (PT) e tempo de ciclo (CT) da linha em unidades de tempo para diferentes sequências de produção ($aM1-bM2-cM3$) - a , b e c é o número produzido de cada modelo na sequência, desabilitando 1 robô de cada uma das estações S12, S10 e S6 para todos os modelos.

| Sequencia | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| (1M1-1M2-1M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1449 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1233 | 1129 | 1449 |
| (3M1-3M2-3M3) | 584 | 1159 | 938 | 1160 | 1126 | 1449 | 1722 | 2116 | 1124 | 1350 | 1155 | 1233 | 1129 | 1449 |
| (3M1-3M2-0M3) | 584 | 1155 | 824 | 1156 | 1107 | 1445 | 1424 | 2009 | 1126 | 1295 | 1162 | 1122 | 1137 | 1445 |
| (0M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 875 | 1160 | 1152 | 1450 | 1451 | 2252 | 1141 | 1336 | 1152 | 1388 | 1128 | 1450 |
| (1M1-3M2-3M3) | 584 | 1158 | 902 | 1160 | 1141 | 1450 | 1567 | 2194 | 1134 | 1342 | 1153 | 1322 | 1129 | 1450 |
| (3M1-1M2-3M3) | 584 | 1162 | 1039 | 1162 | 1123 | 1451 | 2047 | 2099 | 1112 | 1389 | 1153 | 1209 | 1126 | 1451 |
| (3M1-3M2-1M3) | 584 | 1156 | 873 | 1158 | 1115 | 1447 | 1552 | 2055 | 1125 | 1318 | 1159 | 1169 | 1133 | 1451 |
| (3M1-0M2-3M3) | 584 | 1165 | 1115 | 1163 | 1120 | 1452 | 2291 | 2087 | 1104 | 1419 | 1152 | 1191 | 1124 | 1452 |

Fonte: Autoria própria

De acordo com a Tabela 20, o valor mínimo de CT eleva-se para 1445 unidades de tempo quando M3 não é produzido (linha 3 da Tabela 20), ou seja, cerca de 23,72% acima do valor referência. Além disso, nota-se que não há variação significativa do CT, que varia entre 1445 a 1452 unidades de tempo, para as diferentes sequências de produção consideradas. Portanto, quando 3 robôs são desabilitados para os três modelos, o CT é degradado acima de 20% do valor de referência, sendo a sequência de produção pouco relevante. Isso indica uma condição ruim para todas as programações de produção, inclusive quando apenas M1 e M2 são produzidos.

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção discute os resultados das Tabelas 15, 16, 17, 18 e 20, levando em conta a taxa de utilização das estações e o índice de suavidade (IS), o qual fornece um indicador para a “qualidade” do balanceamento da linha de produção. Quanto menor IS, mais homogênea a distribuição dos tempos entre as diferentes estações da linha em análise.

A Tabela 21 mostra as taxas de utilização das estações para diferentes possibilidades (cenários) de desabilitar robôs nas estações S12, S10 e S6, quando se produz apenas os modelos M1 e M2, indicado pela condição (3M1-3M2-0M3). Assim, é possível analisar a utilização das estações para a sequência que produz o menor tempo de ciclo de cada cenário (linha 3 das Tabelas 15, 16, 17, 18 e 20).

Como pode ser observado na Tabela 21, a estação gargalo se desloca ao longo da linha. Na condição de todos os robôs habilitados, linha 1 da Tabela 21, as estações gargalos são S4, S6 e S11. Na opção por desabilitar S12, a estação gargalo permanece em S11, reduzindo as cargas em S4 e S6 na mesma proporção, aumentando para 90% a carga de S12. Se desabilitar um robô em S10, a própria estação passa a ser gargalo. Quando robôs são desabilitados em duas estações (S12 e S10), linha 4 da Tabela 21, permanece a estação S10 como gargalo. Ao desabilitar robôs em S12, S10 e S6, a estação gargalo passa a ser S6.

Tabela 21 – Taxa de utilização (%) das estações para a sequência (3M1-3M2-0M3).

| Estações sem 1 robô | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | CT |
|---------------------|----|-----------|----|------------|----|------------|----|----|----|------------|------------|-----------|-----|------|
| Nenhuma | 50 | 99 | 71 | 100 | 95 | 100 | 61 | 87 | 97 | 91 | 100 | 81 | 98 | 1162 |
| S12 | 47 | 93 | 66 | 93 | 89 | 93 | 57 | 81 | 91 | 85 | 94 | 90 | 91 | 1240 |
| S10 | 45 | 89 | 64 | 89 | 85 | 89 | 56 | 77 | 87 | 100 | 90 | 73 | 88 | 1294 |
| S12 e S10 | 45 | 89 | 63 | 89 | 85 | 89 | 56 | 77 | 86 | 99 | 89 | 86 | 87 | 1303 |
| S12, S10 e S6 | 41 | 80 | 57 | 80 | 77 | 100 | 49 | 70 | 78 | 89 | 80 | 77 | 78 | 1445 |

Fonte: Autoria própria

Um outro 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. Um índice de suavidade igual a zero indica um perfeito balanceamento.

Na Tabela 22, são mostrados os índices de suavidade (IS) da linha para diferentes sequências de produção, análogas às utilizadas nas Tabelas 15, 16, 17, 18 e 20. O valor de referência de IS para a linha de solda robótica balanceada é de 589,17 u.t. para a produção apenas do modelo M3 (MICHELS *et al.*, 2018). Este é o menor valor de IS, pois a linha foi otimizada para a produção apenas do modelo M3, buscando um maior equilíbrio entre a carga das estações quando este modelo atravessa a linha.

Note que as ações de retirada dos robôs impactam no IS e, conseqüentemente, na “qualidade” do balanceamento da linha, de acordo com os dados na Tabela 22. Analisando somente a linha 5 da Tabela 22, que representa a retirada de robôs das 3 estações S12, S10 e S6, tem-se o índice de suavidade com o valor máximo de 1595,23 u.t. para (3M1-3M2-0M3), indicando que a linha de modelo misto está bem desbalanceada. Além disso, os índices de suavidade são todos valores próximos e relativamente elevados para todas as sequências

Tabela 22 – Índice de suavidade (u.t.) da linha para diferentes sequências.

| Estações sem 1 robô | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|----------------|---------|---------|---------|
| Nenhuma | 728,82 | 724,44 | 860,19 | 799,89 | 796,26 | 631,91 | 764,01 | 655,89 |
| S12 | 1090,58 | 1093,58 | 1026,52 | 1048,94 | 1380,66 | 944,88 | 1254,68 | 1000,66 |
| S10 | 1217,08 | 1217,08 | 1197,29 | 1203,44 | 1218,42 | 1285,63 | 1215,01 | 1263,89 |
| S12 e S10 | 1188,55 | 1197,53 | 1186,02 | 1186,27 | 1348,00 | 1262,45 | 1225,99 | 1216,18 |
| S12, S10 e S6 | 1459,89 | 1459,89 | 1595,23 | 1548,02 | 1508,20 | 1339,22 | 1484,70 | 1382,78 |
| A=(1M1-1M2-1M3) | B=(3M1-3M2-3M3) | C=(3M1-3M2-0M3) | D=(3M1-3M2-1M3) | | | | | |
| E=(0M1-3M2-3M3) | F=(3M1-0M2-3M3) | G=(1M1-3M2-3M3) | H=(3M1-1M2-3M3) | | | | | |

Fonte: Autoria própria

consideradas. Isso indica que, com 3 robôs desabilitados, a sequência de produção não é relevante para a operação da linha.

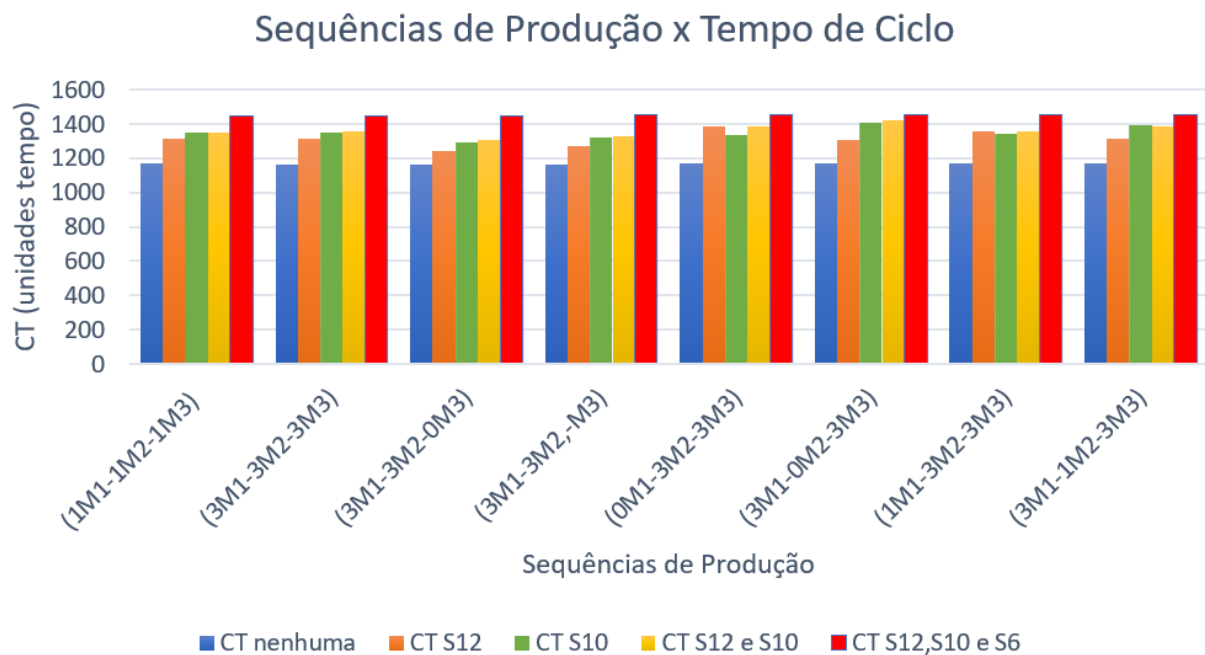
As Figuras 6 e 7 mostram os gráficos do tempo de ciclo (CT) e índice de suavidade (IS), respectivamente, para diferentes sequências de produção, obtidos das Tabelas 15, 16, 17, 18, 20 e 22. A produção de M1 e M2 é viável dentro do tempo de ciclo limite sem desabilitar robôs, conforme os resultados da Figura 6 (barras azuis sempre abaixo de 1168 u.t.), pois são modelos menos complexos quando comparados com M3. Contudo, quando M1 e M2 são produzidos, valores relativamente maiores de IS tendem a ser obtidos, conforme a Figura 7.

Na condição em que todos os robôs são habilitados (condição denominada “CT nenhuma”), o CT está abaixo de 1168 u.t. e a respectiva curva do IS (denominada “IS Nenhuma”) evidencia os menores patamares de IS em relação às demais condições (valores entre ≈ 630 a 860 u.t.). Na condição (3M1-0M2-3M3) o IS é de 631,91 u.t., menor valor observado para o contexto de estações sem desabilitar um dos robôs. Quando a sequência (3M1-3M2-0M3) ocorre, por exemplo, o IS aumenta para 860,19 u.t., indicando distribuições das tarefas menos uniformes entre as estações de trabalho em relação à sequência (3M1-0M2-3M3). Quando ocorre a retirada de um robô da S12, há um aumento no CT (condição denominada “CT S12”) e o IS também sofre influência (condição “IS S12”), elevando seu patamar médio para todas as sequências de produção avaliadas (valores entre ≈ 944 a 1380 u.t.). Com (3M1-0M2-3M3) o valor de IS é 944,88 u.t.; já com (0M1-3M2-3M3), IS sobre para 1380,66 u.t.. Com a retirada de robôs em S12, S10 e S6 (condição “CT S12,S10 e S6”), existe um aumento do tempo de ciclo, próximo de 1450 u.t.. A respectiva curva de IS tem seus patamares elevados para valores entre ≈ 1339 a 1595 u.t.. Observa-se que os valores numéricos de IS mantiveram-se próximos a 1450 u.t., sofrendo menores variações em relação às mudanças de sequência se compararmos, por exemplo, em relação à condição “IS S12” (flutuações de IS entre ≈ 944 a 1380 u.t.).

Desta forma, o valor do índice de suavidade é notoriamente influenciado pela retirada de

robôs e pela sequência produtiva, mas há condições de operação que causam menores variações de IS com mudanças no sequenciamento produtivo. Por exemplo, as condições “IS S12 e S10” (flutuações de IS entre ≈ 1183 a 1347 u.t.) e “IS S12, S10 e S6” (flutuações de IS entre ≈ 1339 a 1595 u.t.) em relação à condição “IS S12”, a qual retira somente um robô da linha (flutuações de IS entre ≈ 944 a 1380 u.t.).

Figura 6 – Tempo de Ciclo (CT) (unidades de tempo) para diferentes sequências e combinações de robôs desabilitados nas estações S12, S10 e S6.

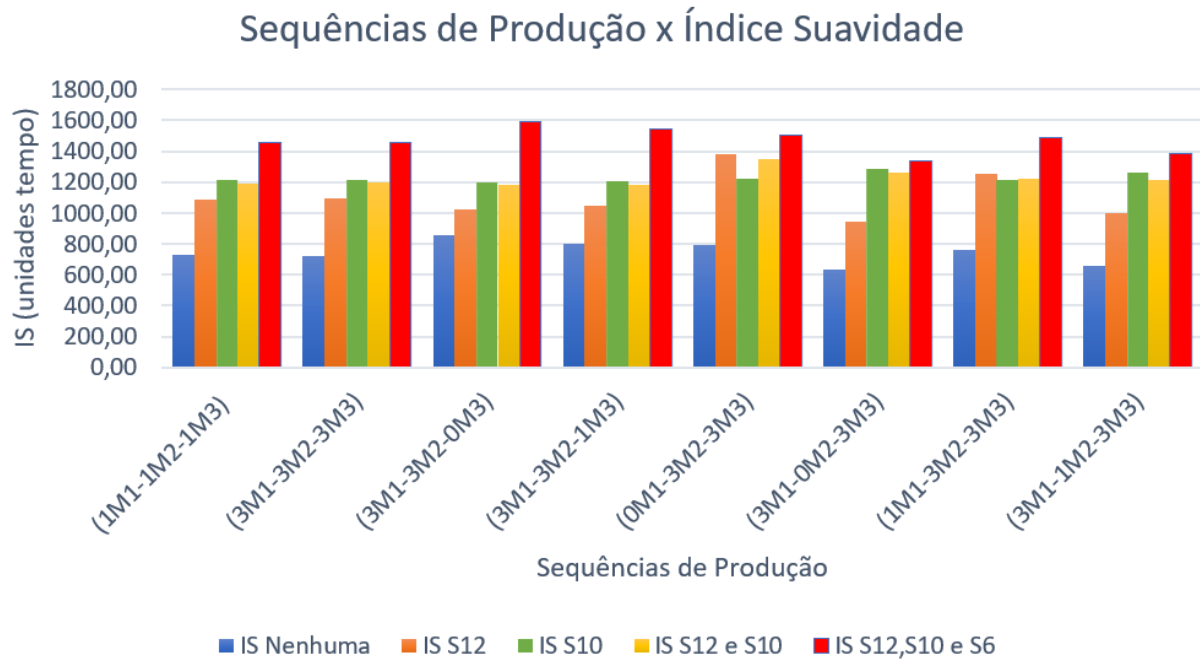


Fonte: Autoria própria

Pode-se concluir dos gráficos das Figuras 6 e 7 que desabilitar robôs aumenta o desbalanceamento e o tempo de ciclo da linha. Como consequência, a produção de veículos é reduzida, chegando a cerca de 20% de redução quando 3 robôs são desabilitados. Além disso, cenários mais balanceados (caso de nenhum robô desabilitado) são mais susceptíveis a mudanças na sequência de produção. Isso é menos significativo em cenários menos balanceados (caso de 3 robôs desabilitados). Em resumo, com nenhum ou poucos robôs desabilitados, a sequência de produção deve ser considerada para obter melhores balanceamentos e tempos de ciclo, mas não é tão importante quando todos os robôs considerados são desabilitados.

Assim, tem-se soluções que possibilitam conciliar a manutenção de robôs com a programação da produção, levando em conta que o CT será acrescido de no máximo 21,4% em relação ao valor de referência de 1168 u.t., de acordo com a sequência de produção. Essa sequência pode ser definida em função da demanda dos modelos a serem produzidos, até o limite de 2 robôs

Figura 7 – Índice de suavidade (IS) (unidades de tempo) para diferentes sequências e combinações de robôs desabilitados nas estações S12, S10 e S6.



desabilitados simultaneamente.

4.7 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos com o modelo de simulação proposto para a linha de montagem robótica multioperada e de modelo misto de Michels *et al.* (2018). Os resultados do modelo de simulação e comentários foram organizados em seis seções. A Seção 4.1 evidencia as estações com ociosidade, a depender do modelo que nela é processado. A Seção 4.2 traz uma análise quando um único modelo passa na linha produtiva. Na Seção 4.3, a linha é avaliada considerando-se a entrada de diferentes modelos de veículos (linha de modelo misto). A Seção 4.4 analisa as possibilidades de diferentes sequências de produção, com ênfase na manutenção preventiva e os impactos no tempo de ciclo. A Seção 4.5 apresenta o limite destas ações e os impactos provocados pelo (des)balanceamento na linha de modelo misto. A Seção 4.6 discute os resultados obtidos. O Capítulo 5 traz as principais conclusões obtidas com os estudos realizados e aponta possibilidades para futuros desenvolvimentos.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com a Indústria 4.0 e os conceitos de produção flexível sob demanda, linhas de montagem da indústria automotiva estão sujeitas a alterações constantes de demanda e modelos de veículos (linhas de montagem de modelo misto). Esta dissertação propôs um modelo de simulação para uma linha de montagem robótica, cujo projeto foi otimizado em (MICHELS *et al.*, 2018) para a produção de um determinado modelo de veículo mais complexo. Porém, a linha é capaz de produzir também dois modelos de veículos mais simples, com eventual subutilização das estações de trabalho. Essa subutilização foi identificada pela menor taxa de utilização de determinadas estações de trabalho, sendo explorada na simulação para desabilitar robôs, seja em um contexto de economia de recursos ou manutenção programada.

Os resultados mostraram que as estações S12 e S10 possuem menores taxas de utilização quando ocorre a montagem dos modelos de veículos M1 e M2, respectivamente. Apesar das estações S2, S4, S6, S10 e S12 da linha robótica considerada possuírem mais de um robô do mesmo tipo e, portanto, passíveis de serem desabilitados, apenas as estações S10 e S12 estão subutilizadas. As estações S2, S4 e S6 estão próximas de 100% de utilização para todos os três modelos M1, M2 e M3. Assim, em um contexto de economia de recursos, a estação S12 foi escolhida para desabilitar 1 robô quando ocorre a passagem de M1 e a estação S10 desabilita 1 robô quando ocorre a passagem de M2.

Os tempos de ciclo da linha para a produção de M1, M2 e M3 separadamente são 1162, 1165 e 1168 u.t. (valor de referência), respectivamente, para o caso em que não há robôs desabilitados. Quando 1 robô é desabilitado na estação S12 durante a montagem de M1 e 1 robô é desabilitado na estação S10 durante a montagem de M2, os tempos de ciclo atingem 1162 e 1212 u.t, respectivamente. Esses resultados são consistentes com a baixa taxa de utilização inicial de S10 e S12, pois não houve alteração significativa dos tempos de ciclo ao desabilitar robôs. Portanto, os modelos de veículos M1 e M2 podem ser produzidos na linha considerada com nenhuma ou pouca redução no tempo de ciclo, mesmo com robôs desabilitados. Para a produção de M3, não é possível desabilitar robôs sem que haja um aumento significativo no tempo de ciclo.

Quando se utiliza um *mix* de produção dos três modelos, ao invés de produzir cada modelo separadamente como acima, os resultados apontaram uma menor folga para produzir M2 quando M1 e M3 são produzidos. Assim, quando a linha opera com parte dos robôs desabilitados

para a produção de M1 e M2, deve-se dar preferência para a produção de M1 e M3.

No contexto de manutenção, robôs são retirados de operação para reparos programados ou não. Neste caso, robôs desabilitados deixam de executar tarefas para todos os modelos de veículos. Neste cenário, diferentes sequências de produção podem ser relevantes para o desempenho da linha. Assim, foram feitos experimentos nos quais os robôs das estações S12 e S10 podem entrar em manutenção. Os resultados mostraram que o menor tempo de ciclo é obtido quando não se produz M3, para qualquer caso de manutenção considerado (1 robô desabilitado em cada uma das estações S10 e S12 por vez ou em ambas simultaneamente). Quando M1 e M3 são produzidos, a produção de M2 tem impacto significativo no aumento do tempo de ciclo. Os resultados mostraram também que a produção de M1 e M2 é viável dentro do tempo de ciclo limite de 1168 u.t. para qualquer sequência de produção considerada, quando nenhum robô é desabilitado. Isso é devido aos modelos M1 e M2 serem menos complexos para montagem do que M3.

Quando se considera o caso de 3 robôs desabilitados simultaneamente nas estações S6, S10 e S12, o tempo de ciclo e o índice de suavidade da linha aumentam consideravelmente, ou seja, menos veículos serão produzidos no mesmo intervalo de tempo em uma linha desbalanceada. Porém, a sequência de produção adotada já não influencia tanto o resultado.

De maneira geral, pode-se concluir que desabilitar robôs aumenta o desbalanceamento e o tempo de ciclo da linha. Como consequência, a produção de veículos é reduzida, chegando a cerca de 20% de redução quando 3 robôs são desabilitados. Além disso, cenários mais balanceados (caso de nenhum robô desabilitado) são mais susceptíveis a mudanças na sequência de produção. Isso é menos significativo em cenários menos balanceados (caso de 3 robôs desabilitados). Em resumo, com nenhum ou poucos robôs desabilitados, a sequência de produção deve ser considerada para obter melhores balanceamentos e tempos de ciclo, mas não é tão importante quando todos os robôs considerados são desabilitados.

Assim, tem-se soluções que possibilitam conciliar a manutenção de robôs com a programação da produção, levando em conta que o tempo de ciclo será acrescido de, no máximo, 21,4% em relação ao valor de referência de 1168 u.t, de acordo com a sequência de produção. Essa sequência pode ser definida em função da demanda dos modelos a serem produzidos, até o limite de 2 robôs desabilitados simultaneamente.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se uma maior integração de uso entre o modelo matemático em MILP desenvolvido por Michels *et al.* (2018) e o modelo de simulação proposto. Por exemplo, quando um robô é desabilitado de uma estação específica, uma versão modificada do modelo MILP poderia avaliar a redistribuição de (alguns) pontos de solda ao longo das demais estações da linha, reduzindo a carga da estação em manutenção, de modo a (tentar) manter os indicadores de balanceamento e índice de suavidade. Na sequência, realiza-se a execução da simulação a eventos discretos para determinar, por exemplo, uma sugestão de sequenciamento para a atual configuração da linha. Em termos práticos, o procedimento sugerido impacta também a mudança dinâmica da programação de alguns robôs de estações diferentes daquelas que terão robôs desabilitados. O evento de manutenção poderia dinamicamente alterar a carga de várias estações da linha, uma condição de reconfiguração dinâmica do ambiente de manufatura.

Alinhado ao fato mencionado, mudanças de demanda poderiam impactar o tempo de ciclo da linha e, portanto, a condição de operação ideal. Em um caso de baixa demanda, por exemplo, a abordagem proposta, em colaboração à solução do modelo MILP, poderia ser empregada para determinar a condição operacional de balanceamento/sequenciamento na qual minimiza-se o número de robôs necessários.

Outra possibilidade de trabalho está pautada no aprimoramento do modelo de simulação proposto de modo a incorporar condições de *scheduling* das tarefas realizadas nas estações multioperadas. Em termos práticos, o modelo de simulação consideraria de modo detalhado as questões de sincronismo entre robôs de uma mesma estação para a realização das tarefas. Este aprimoramento levaria a uma representação mais detalhada do problema.

O modelo em MILP proposto em (MICHELS *et al.*, 2018) é capaz de determinar configurações de *layout* para a linha levando em consideração o balanceamento da carga de trabalho entre as estações. Contudo, os impactos causados pelas diferentes sequências de produção, *scheduling* da realização das tarefas dentro da estação e possíveis condições de reconfiguração da linha, pode ser avaliado pelo modelo de simulação proposto (e aprimoramentos deste), configurando uma abordagem complementar à apresentada na literatura.

REFERÊNCIAS

BAÊTA, Cláudio L. F.; MAGATÃO, Leandro; LÜDERS, Ricardo. Reconfiguração dinâmica de uma linha robótica de modelo misto com impacto reduzido no tempo de ciclo. *In: Anais do LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Campinas: Galoá, 2021. (a ser publicado).

BANKS, J; CARSON, J S; NELSON, B L; NICOL, D M. **Discrete event system simulation**. [s.n.], 1984. 625 p. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/5404549>.

BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 694–715, September 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>.

BRATCU, A. I.; DOLGUI, A. Some new results on the analysis and simulation of bucket brigades (self-balancing production lines). **International Journal of Production Research**, v. 47, 2009. ISSN 1366588X. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207540802426128>.

BUYUKSAATÇL, Sinem; TUYSUZ, Fatih; BILEN, Kemal. Balancing and simulation of assembly line in an lcd manufacturing company. **2015 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)**, July 2015.

DOLGUI, Alexandre; PETROODI, S. Ehsan Hashemi; KOVALEV, Sergey; KOVALYOV, Mikhail Y.; KOVALYOV, Mikhail Y. Workforce planning and assignment in mixed-model assembly lines as a factor of line reconfigurability: State of the art. *In: IFAC-PapersOnLine*. [s.n.], 2019. v. 52, p. 2746–2751. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.623>.

FATTAHI, Parviz; ROSHANI, Abdolreza; ROSHANI, Abdolhassan. A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 53, p. 363–378, July 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2832-y>.

FREITAS, Paulo J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. [S.l.: s.n.], 2008. 372 p. ISBN 9788575022283.

FRITZSCHE, Rayk; VOIGT, Eric; SCHAFFRATH, Robert; TODTERMUSCHKE, Marcel; RÖBER, Marcel. Automated design of product-flexible car body fixtures with software-supported part alignment using particle swarm optimization. **Procedia CIRP**, v. 88, p. 157–162, 2020. ISSN 2212-8271. 13th CIRP, 17-19 July 2019, Gulf of Naples, Italy. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.028>.

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. **Gestão & Produção [online]**, v. 14, p. 267–279, Setembro 2007. ISSN 1806-9649. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2007000200006>.

GIGLIO, Davide; PAOLUCCI, Massimo; ROSHANI, Abdolreza; TONELLI, Flavio. Multi-manned assembly line balancing problem with skilled workers: A new mathematical formulation. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 1211–1216, 2017. ISSN 2405-8963. 20th IFAC World Congress. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.344>.

GOKCEN, Hadi; EREL, Erdal. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, n. 2, p. 451–461, June 1998. ISSN 0360-8352. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00142-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00142-3).

GOULD, J.E. Joining aluminum sheet in the automotive industry - A 30 year history. **Welding Journal**, v. 91, n. 1, p. 23s–34s, 2012. Disponível em: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2012_01_s23.pdf.

JAMIL, Muthanna; RAZALI, Noraini Mohd. Simulation of assembly line balancing in automotive component manufacturing. **IOP: Materials Science and Engineering**, v. 114, Feb 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/114/1/012049>.

JOINES, J. A.; ROBERTS, S. D. **Simulation Modeling with SIMIO: A Workbook V4**. 4th ed. [S.l.]: SIMIO LLC, 2015. 432 p. ISBN 151914220X.

KAZEMI, Abolfazl; SEDIGHI, Abdolhossein. A cost-oriented model for multi-manned assembly line balancing problem. **Journal of Optimization in Industrial Engineering**, QIAU, v. 6, n. 13, p. 13–25, March 2013. ISSN 2251-9904. Disponível em: http://www.qjie.ir/article_137.html.

KELLEGÖZ, Talip. Assembly line balancing problems with multi-manned stations: a new mathematical formulation and Gantt based heuristic method. **Annals of Operations Research**, v. 253, n. 1, p. 377–404, June 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2156-x>.

KELLEGÖZ, Talip; TOKLU, Bilal. A priority rule-based constructive heuristic and an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 3, p. 736–756, April 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.920548>.

LOPES, Thiago Cantos; MICHELS, Adalberto Sato; LÜDERS, Ricardo; MAGATÃO, Leandro. A simheuristic approach for throughput maximization of asynchronous buffered stochastic mixed-model assembly lines. **Computers & Operations Research**, Elsevier Ltd, v. 115, p. 104863, 2020. ISSN 0305-0548. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104863>.

LOPES, Thiago Cantos; PASTRE, Giuliano Vidal; MICHELS, Adalberto Sato; MAGATÃO, Leandro. Flexible multi-manned assembly line balancing problem: Model, heuristic procedure, and lower bounds for line length minimization. **Omega**, v. 95, p. 102063, May 2019. ISSN 0305-0483. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.04.006>.

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**, v. 263, n. 3, p. 1033–1048, 2017. ISSN 0377-2217. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.001>.

LUSA, Amaia. A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 50–72, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/EJIE.2008.016329>.

MENDES, Ana R.; RAMOS, Ana L.; SIMARIA, Ana S.; VILARINHO, Pedro M. Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a pc camera assembly line. **Computers & Industrial Engineering**, v. 49, n. 3, p. 413–431, November 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.07.003>.

MICHALOS, G; MAKRIS, S; PAPAKOSTAS, N; MOURTZIS, D; CHRYSOLOURIS, G. Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 81–91, 2010. ISSN 1755-5817. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.12.001>.

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. ISSN 0360-8352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.010>.

MICHELS, Adalberto Sato; LOPES, Thiago Cantos; SIKORA, Celso Gustavo Stall; MAGATÃO, Leandro. A Benders' decomposition algorithm with combinatorial cuts for the multi-manned assembly line balancing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 278, n. 3, p. 796–808, 2019. ISSN 0377-2217. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.05.001>.

MÜLLER, C.; GRUNEWALD, M.; SPENGLER, T.S. Redundant configuration of automated flow lines based on “Industry 4.0”-technologies. **Journal of Business Economics**, Springer, v. 87, n. 7, p. 877–898, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11573-016-0831-7>.

NILS, Boysen; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin. Assembly line balancing: Which model to use when? **International Journal of Production Economics**, v. 111, p. 509–528, February 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>.

RAPTIS, Theofanis P.; PASSARELLA, Andrea; CONTI, Marco. Data management in industry 4.0: State of the art and open challenges. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 97052–97093, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2929296>.

ROSHANI, Abdolreza; GIGLIO, Davide. A simulated annealing approach for multi-manned assembly line balancing problem type ii. **International Federation of Automatic Control**, v. 48, n. 3, p. 2299–2304, May 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.430>.

ROSHANI, Abdolreza; GIGLIO, Davide. Simulated annealing algorithms for the multi-manned assembly line balancing problem: minimising cycle time. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 55, n. 10, p. 2731–2751, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1181286>.

ROSHANI, Abdolreza; ROSHANI, Arezoo; ROSHANI, Abdolhassan; SALEHI, Mohsen; ESFANDYARI, Azadeh. A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 238–247, November 2013. ISSN 0278-6125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.11.003>.

RUBINOVITZ, Jacob; BUKCHIN, Joseph. RALB - A heuristic algorithm for design and balancing of Robotic Assembly Lines. **Annals of the CIRP**, v. 42, n. 1, p. 497–500, Janeiro 1993. ISSN 0007-8506. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62494-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62494-9).

SIKORA, Celso Gustavo Stall; LOPES, Thiago Cantos; MAGATÃO, Leandro. Traveling worker assembly line (re)balancing problem: Model, reduction techniques, and real case studies. **European Journal of Operational Research**, v. 259, n. Issue 3, p. 949–971, June 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.027>.

SIKORA, Celso Gustavo Stall; LOPES, Thiago Cantos; SCHIBELBAIN, Daniel; MAGATÃO, Leandro. Integer based formulation for the simple assembly line balancing problem with multiple identical tasks. **Computers & Industrial Engineering**, v. 104, p. 134–144, 2017. ISSN 0360-8352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.026>.

TIACCI, Lorenzo. Event and object oriented simulation to fast evaluate operational objectives of mixed model assembly lines problems. **SMPT**, v. 24, p. 35–48, May 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.01.004>.

TIACCI, Lorenzo. Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. **IJPE**, v. 159, p. 319–333, January 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.05.005>.

VILARINHO, Pedro M.; SIMARIA, Ana Sofia. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 6, p. 1405–1420, May 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207540110116273>.