

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

RAFAEL GOBBI MOLINA

CONTRIBUIÇÕES PARA O BALANCEAMENTO DE UMA
LINHA DE MANUFATURA ROBOTIZADA POR MEIO DE
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

RAFAEL GOBBI MOLINA

**CONTRIBUIÇÕES PARA O BALANCEAMENTO DE UMA
LINHA DE MANUFATURA ROBOTIZADA POR MEIO DE
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, Linha de Pesquisa em Otimização de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Molina, Rafael Gobbi

Contribuições para o balanceamento de uma linha de manufatura robotizada por meio de programação matemática [recurso eletrônico] / Rafael Gobbi Molina.-- 2019.

1 arquivo texto (73 f.) : PDF ; 4,08 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 71-73.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Balanceamento de linha de montagem. 3. Indústria automobilística - Curitiba, Região Metropolitana de (PR). 4. Processos de fabricação - Automação. 5. Métodos de linha de montagem. 6. Robótica. 7. Soldagem elétrica - Automação. 8. Modelos Matemáticos. 9. Pesquisa operacional. 10. Programação (Matemática). 11. Programação linear. 12. Programação inteira. I. Magatão, Leandro, orient. II. Rodrigues, Luiz Carlos de Abreu, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 829

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Contribuições Para O Balanceamento De Uma Linha De Manufatura Robotizada Por Meio De Programação Matemática.**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) Rafael Gobbi Molina, no dia **25 de junho de 2019**, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração **Engenharia de Automação e Sistemas**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Leandro Magatão - Presidente (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Luiz Carlos Felizari - (IFPR)

Prof(a). Dr(a). Ricardo Lüders - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 25 de junho de 2019.

Aos meus pais, Saulo Molina e Laudimir Maria Gobbi Molina, por me ensinarem que o conhecimento é a única esperança de um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Deus, por me conceder vida e saúde até aqui, pois sem a Sua graça eu não seria nada. Em segundo aos meus pais, Saulo e Laudenir Molina, e a minha esposa, Aline, por não me deixar desistir nas dificuldades e por acreditar que eu iria conseguir até nos momentos em que eu mesmo não acreditava.

Agradeço também aos meus orientadores, Prof. Leandro Magatão e Prof. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues, pela confiança, amizade, apoio e compreensão durante estes últimos quatro anos. Certamente, muito do meu crescimento pessoal e profissional está baseado em seus exemplos.

Finalmente, agradeço ao apoio financeiro da Fundação Araucária e da Renault do Brasil por meio do convênio 011/2018 - SIT 38165 - Programa de Bolsas Fundação Araucária & Renault do Brasil - CP 01/2018 (FA - UTFPR - RENAULT). Assim como, a todas as pessoas com quem trabalhei no decorrer deste projeto, em especial: Thiago Cantos Lopes; Daniel Schibelbain; Robinson Mayer.



RENAULT
Passion for life



“O propósito da educação não é encher nossas mentes, mas abri-las. Quanto mais conhecimento obtemos, mais compreendemos o quanto não sabemos. É isso que significa ter mente aberta.”

(Hal Urban)

“ipse se nihil scire id unum sciat”
(Sócrates)

RESUMO

A indústria automotiva tem como base de seu sistema produtivo linhas de produção orientadas ao produto, estruturas conhecidas como *flow shop*. Esta é uma metodologia produtiva que possui como objetivo principal uma elevada cadência (capacidade produtiva) ou, de modo complementar, um baixo tempo de ciclo para obtenção dos produtos. Porém, a alta cadência de produção frequentemente está associada a uma grande especificidade nos equipamentos da linha e a um alto custo de implementação. Este custo e especificidade de equipamentos obriga os profissionais envolvidos a desenvolverem maneiras de contornar a rigidez do sistema, capacitando-o a produzir a maior diversidade possível de produtos na mesma linha produtiva. A presente dissertação busca apresentar uma metodologia capaz de ajudar no processo de introdução de uma nova diversidade de veículo a uma linha produtiva já em funcionamento, especificamente na etapa de balanceamento da carga de trabalho de robôs que realizam solda ponto por resistência. No estudo de caso distribuiu-se 500 pontos de solda, em trinta e quatro robôs, alocados a oito estações de trabalho. Para o processo de balanceamento, foram realizadas adaptações a um modelo matemático presente na literatura, o qual foi desenvolvido em Programação Linear Inteira Mista. Objetivou-se que o modelo final fosse capaz de considerar aspectos inerentes ao *layout* da linha, como a simetria entre os robôs e o veículo, além de considerar aspectos inerentes às capacidades individuais de cada robô. Em adição ao balanceamento inicial dos pontos de solda, um projeto paralelo, de atualização de oito dos trinta e quatro robôs, gerou a necessidade de elaboração de uma segunda variante do modelo matemático. Esta, capaz de realizar uma distribuição temporária dos pontos de solda dos oito robôs que passariam pelo processo de atualização, mantendo intacta a distribuição dos pontos de solda dos vinte e seis robôs que não seriam atualizados, garantindo a aplicação de todos os pontos de solda designados para a linha produtiva durante o período em que os trabalhos paralelos de atualização da linha estariam acontecendo. Os resultados obtidos foram avaliados por especialistas do sistema, indicando a viabilidade das respostas sugeridas pela abordagem proposta. Apresenta-se, desta forma, uma metodologia para o auxílio à tomada de decisões operacionais que sugere resultados otimizados matematicamente para a distribuição dos pontos de solda nos diferentes robôs do sistema produtivo, respeitando-se condições práticas da linha produtiva em análise.

Palavras-chave: Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem, Linhas Simétricas de Solda Robótica, Programação Linear Inteira Mista, Solda a Ponto por Resistência

ABSTRACT

The automotive productive systems are generally based on production lines oriented to the product, a flow shop structure. The main objective of this productive system is an high throughput (productive “cadence”) or, in a complementary way, the lowest cycle time for production. However, high throughput is usually associated with an elevated specificity of the line’s equipment and a high implementation cost. This cost and specificity forces the involved professionals to develop new ways to work around the system rigidity, allowing the production line to produce as many products as possible. This masters thesis presents a methodology capable of aiding the process of introducing a new vehicle model in a production line already in operation. Specifically, the focus is on the balancing of robots that perform spot welding tasks. In the case study, 500 weld spots were distributed in thirty-four robots, allocated to eight workstations. In the balancing process, adaptations were done in a Mixed-Integer Linear Programming mathematical model available in the literature. The final model needed to be able to consider the inherent aspects of the line layout, *e.g.*, the symmetry between the robots and the vehicles, besides the inherent aspects of the individual capabilities of each robot. In addition to the initial weld spot balancing problem, a parallel project, which was seeking to update eight of the thirty-four robots, showed the necessity of elaborating a second variant of the mathematical model. This variant was able to make a temporary distribution of the weld spots that were originally assigned to the eight robots under upgrade, keeping, at the same time, unaltered the weld spots distribution from the other 26 robots. In that way, the application of all weld spots assigned to the production line during the period in which line upgrade works was guaranteed. The feasibility of the proposed answers were evaluated by system experts. Thus, a methodology for aiding the operational decision-making was proposed. This methodology suggests mathematically optimized results for the distribution of weld spots between the robots of the productive system, respecting the practical conditions of the production line under analysis.

Keywords: Assembly Line Balancing Problem, Symetric Robotic Welding Lines, Mixed-Integer Linear Programming, Spot Resistance Welding

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Aplicação de solda ponto em uma zona final do setor de carroceria.	15
FIGURA 1.2	<i>Layout</i> simplificado da linha de produção.	16
FIGURA 2.1	Linhas de Montagem Simples, Modelo Misto e Múltiplos Modelos .	20
FIGURA 3.1	Ilustração dos robôs que serão retirados da linha de produção.	26
FIGURA 3.2	Ilustração de disputa de espaço.	28
FIGURA 3.3	Ilustração de cruzamento	29
FIGURA 3.4	Condição de Simetria.	30
FIGURA 3.5	Robô alocado com pinça de tipo X.	31
FIGURA 3.6	Robô alocado com pinça de tipo J	31
FIGURA 3.7	Ilustração de uma região de pontos de solda	32
FIGURA 3.8	Robô realizando ponto de solda na região do porta malas	34
FIGURA 3.9	Robô realizando ponto de solda na região da porta traseira	34
FIGURA 3.10	Ilustração de acessos	35
FIGURA 3.11	Robô realizando ponto de solda pelo parabrisa	36
FIGURA 3.12	Robô realizando ponto de solda e pela porta dianteira	36
FIGURA 4.1	Macro-Regiões de Interferência.	43
FIGURA 4.2	Ilustração de ciclos de adjacência	50
FIGURA 4.3	Controle de sequência dos robôs e eliminação das restrições de ciclo.	53
FIGURA 4.4	Diagrama de execução do modelo semi-simétrico.	61
FIGURA 5.1	Ilustração do <i>software</i> de simulação 3D.	65
FIGURA 5.2	Definição das regiões.	66
FIGURA 5.3	Definição de acessos.	67
FIGURA 5.4	Adjacência entre acessos.	68
FIGURA 5.5	Resultados da aproximação dos parâmetros de tempo.	69
FIGURA 5.6	Regiões de interferência.	70
FIGURA 5.7	Resultado do balanceamento semi-simétrico.	76
FIGURA 5.8	Comparação entre o modelos completo e semi-simétrico.	77
FIGURA 5.9	Resultado do Balanceamento Temporário.	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	Conjuntos e tuplas utilizados no modelo base.	40
TABELA 4.2	Parâmetros de ocorrência e controle de tempo	41
TABELA 4.3	Variáveis e seus respectivos significados.	45
TABELA 4.4	Conjuntos e tuplas adicionados no modelo Semi-Simétrico.	55
TABELA 4.5	Variáveis adicionadas no modelo Semi-Simétrico	56
TABELA 4.6	Expressões por Modelo Matemático	62
TABELA 5.1	Limites superiores e inferiores encontrados.	72
TABELA 5.2	Número de variáveis e restrições do problema.	73
TABELA 5.3	Comparação de diversas variantes do problema.	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVO	16
1.2.1 Objetivos Específicos	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 INTRODUÇÃO	18
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE LINHAS PRODUTIVAS	18
2.3 O PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM	20
2.4 CONTEXTO DE MANUFATURA DA CARROCERIA	23
3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE MANUFATURA	26
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES	27
3.3 CARACTERIZAÇÃO DE TAREFAS	29
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO	33
3.5 OBJETIVOS DA EMPRESA	37
4 MODELO MATEMÁTICO	38
4.1 MODELO BASE	38
4.1.1 Modelo Base: Função Objetivo	38
4.1.2 Parâmetros	39
4.1.2.1 Parâmetros de Controle de Acessibilidade	40
4.1.2.2 Parâmetros de Controle de Movimentação	41
4.1.2.3 Parâmetros de Controle de Interferência	42
4.1.2.4 Outros Parâmetros	43
4.1.3 Variáveis de Decisão	44
4.1.4 Restrições do Modelo Base	46
4.1.4.1 Restrições de Ocorrência	46
4.1.4.2 Restrições de Controle de Tempo	47
4.1.4.3 Restrições de Interferência	51
4.2 RESTRIÇÕES MODIFICADAS NO MODELO BASE	52
4.3 MODELO SEMI-SIMÉTRICO	54
4.3.1 Parâmetros	55
4.3.2 Variáveis de Decisão	56
4.3.3 Restrições	56
4.3.3.1 Restrições de Semi-Simetria	56
4.3.3.2 Restrições de Inclusão de Assimetrias	59
4.3.4 Modelo Semi-Simétrico: Função Objetivo	59

4.4	MODELO DE BALANCEAMENTO TEMPORÁRIO	60
4.4.1	Parâmetros e Restrição	60
4.5	MODELAGENS EM ANÁLISE	61
5	ESTUDO DE CASO	63
5.1	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	63
5.1.1	Regiões, Acessos e Acessibilidade	63
5.1.2	Parâmetros de Tempo	67
5.1.3	Interferências	69
5.2	RESULTADOS	71
5.2.1	Modelo Base <i>versus</i> Modelo Semi-Simétrico	71
5.2.2	Modelo Semi-Simétrico: Estudo de Caso	74
5.2.2.1	Modelo Semi-Simétrico: Abordagem 1	74
5.2.2.2	Modelo Semi-Simétrico: Abordagem 2	74
5.2.3	Modelo de Balanceamento Temporário	78
6	CONCLUSÃO	80
6.1	OBSERVAÇÕES FINAIS	80
6.2	POSSÍVEL CONTINUAÇÃO AO TRABALHO	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva pode facilmente ser considerada como um dos ramos industriais mais competitivos da atualidade. As grandes montadoras estão constantemente atualizando sua gama de veículos e lançando novos carros no mercado.

O lançamento de um novo veículo é cercado de inúmeros desafios, sendo um dos principais a incorporação deste novo veículo no sistema produtivo já em funcionamento. Quando o novo produto não é muito diferente do que já é produzido por uma linha de manufatura, existe uma tendência deste produto ser incorporado nesta linha de montagem, compartilhando espaço com outros produtos similares.

Considerando-se uma linha de manufatura organizada em estações de trabalho, ou postos de trabalho, se o novo produto (ou a nova diversidade de produto) possuir exatamente a mesma carga de trabalho em cada estação em relação à atual realidade operacional da linha, a tendência é que não exista um impacto significativo no funcionamento da mesma. Porém, essa condição é raramente encontrada e, portanto, encontrar formas de fazer com que vários produtos compartilhem a mesma linha de manufatura tem sido objetivo constante de modelos matemáticos que buscam balancear a alocação de trabalho entre os diversos postos de uma linha produtiva. A literatura chama essa temática de problema de balanceamento de linhas de montagem. Neste contexto, a presente dissertação busca apresentar a abordagem utilizada para introduzir um novo veículo em uma linha de produção robotizada de uma indústria automotiva localizada na região metropolitana de Curitiba.

1.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA

Esse trabalho foi inspirado pela necessidade de introduzir uma nova diversidade de veículo em uma linha de produção robotizada de modelo misto, ou seja, uma linha de produção em que diferentes modelos de veículos são produzidos no mesmo *layout* produtivo (SCHOLL, 2003). Em particular, avalia-se o problema encontrado no setor responsável pela produção da carroceria do veículo.

A principal função do setor da carroceria é aplicar solda ponto por resistência (GOULD, 2012), a qual confere integridade estrutural à carroceria metálica do veículo. O presente estudo é realizado especificamente em uma seção onde toda a geometria da carroceria já foi definida, porém, nenhuma parte móvel¹ foi instalada, conforme ilustrado na Figura 1.1. Portanto, esse setor da linha tem como objetivo aplicar os pontos de solda por resistência que garantirão que a geometria do veículo se mantenha inalterada quando os componentes móveis forem instalados e, principalmente, que o veículo atenderá as regras de rigidez e segurança esperadas em caso de acidente.

Esse setor conta com trinta e quatro robôs, que estão alocados a oito estações, conforme ilustrado na Figura 1.2. Os robôs do lado esquerdo da linha estão posicionados simetricamente, em relação à carroceria do veículo, com os robôs do lado direito da mesma. Os pares também possuem a mesma ferramenta de solda acoplada.

O novo veículo terá aproximadamente 500 pontos de solda, que poderão ser aplicados apenas nessa região da linha produtiva. Para a correta distribuição desses pontos, vários pré requisitos devem ser respeitados. O principal deles é a capacidade de cada robô. Essa linha possui robôs especializados, os quais conseguem acessar apenas parte das tarefas que deverão ser realizadas. Portanto, a metodologia utilizada deve observar essas limitações dos robôs.

Os robôs foram instalados na linha de produção aos pares, conforme mostra a Figura 1.2. A empresa considera como uma boa prática que, sempre que possível, as atividades feitas pelo robô de um lado da linha sejam espelhadas pelo seu respectivo par. Outro ponto importante encontra-se no fato de que cada estação pode contar com até oito

¹As partes móveis são, por exemplo, as portas, tampa do compartimento do motor e tampa do portamalas.

Figura 1.1: Aplicação de solda ponto em uma zona final do setor de carroceria.

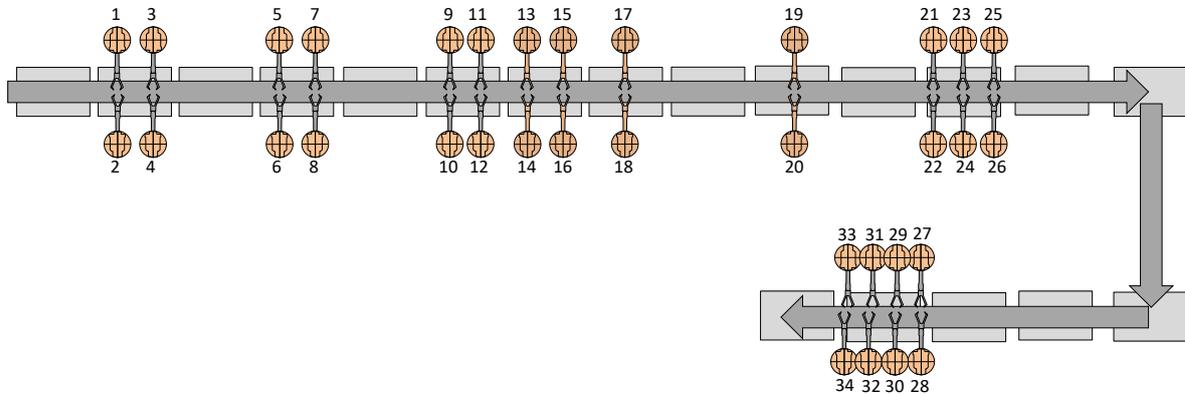


Fonte: KUKA

robôs trabalhando de forma simultânea. Logo, o risco de colisão entre robôs é constante e deve ser considerado no processo de modelagem do problema.

Por fim, durante o processo de incorporação desse novo veículo na linha de produção, alguns robôs dessa seção serão modernizados. Como ambos os projetos (entrada do novo veículo e mudanças de robôs) devem ocorrer em paralelo, parte dos robôs ficarão indisponíveis durante o processo de inclusão do novo veículo. Desta forma, é essencial encontrar um modo de aplicar os pontos de solda destes robôs que serão modernizados, ao menos de forma temporária, por meio dos outros robôs da linha de produção. Trata-se de um problema secundário que foi identificado e também será endereçado no presente trabalho como uma contribuição ao balanceamento da linha robotizada. De fato, situações em que alguns dos robôs estão ausentes (*e.g.*, devido a manutenções) podem ocorrer mesmo na linha já totalmente instalada e obter uma solução ao referido problema é relevante dentro do contexto de balanceamento de linhas robóticas.

Figura 1.2: *Layout* simplificado da linha de produção analisada no estudo de caso.



Fonte: Autoria Própria

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal do presente trabalho é utilizar técnicas de Pesquisa Operacional, em especial Programação Linear Inteira Mista, para otimizar o balanceamento de uma linha de manufatura robotizada. Especial atenção é posta na análise quando ocorre a entrada de um novo produto na linha ou quando mudanças na capacidade das estações de trabalho são observadas com alterações dos robôs.

O caminho seguido para a elaboração do trabalho foi dividido em quatro etapas, conforme descrito na subseção 1.2.1, objetivos específicos.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar uma linha robotizada que executa solda ponto por resistência em diferentes veículos, de modo a determinar as características práticas necessárias para a correta abordagem do problema de balanceamento na referida linha;
2. Avaliar na literatura abordagens que possam ser utilizadas como base para a resolução do problema em análise;
3. Desenvolver ou adaptar um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista com a capacidade de prover soluções otimizadas ao problema em análise. O modelo desenvolvido deve estar alinhado às características da linha produtiva;

4. Aplicar o modelo matemático resultante de modo a facilitar a incorporação deste novo veículo à linha produtiva, mesmo que variações de disponibilidade de robôs para as operações de solda sejam observadas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação segue a estruturação a seguir elencada. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão dos tópicos básicos na literatura com o objetivo de propiciar um melhor entendimento do contexto do problema em análise. O Capítulo 3 detalha o problema encontrado, exemplificando suas principais características. O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático que foi utilizado como base para esse trabalho, assim como todas as alterações necessárias para que o mesmo atendesse a todos os requisitos práticos exigidos. O Capítulo 5 apresenta o caso prático avaliado, juntamente com os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 sumariza as contribuições e conclusões desta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo está organizado da seguinte forma: A Seção 2.2 faz um breve resumo das características das linhas produtivas. A Seção 2.3 apresenta um resumo do problema de balanceamento de linhas produtivas. Por fim, a Seção 2.4 introduz as características do sistema produtivo encontrado no setor de carroceria dos complexos automotivos.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE LINHAS PRODUTIVAS

A primeira linha de montagem para o setor automotivo foi desenvolvida, em 1901, pela *Ransom Olds* para a *Oldsmobile* (Olds, R. E., 2019). A introdução deste método produtivo na planta de Detroit permitiu que a produção do veículo *Oldsmobile Curved Dash* passasse de 425 unidades por ano em 1901 para 2500 unidades por ano em 1902. Esse processo de montagem fixava os postos de trabalho e fazia com que os veículos fossem movimentados. Esse sistema é chamado em Thomopoulos (2014) de montagem progressiva.

O modelo produtivo onde os trabalhadores ficam restritos a uma posição específica e as peças são movimentadas também pode ser chamado de *flow shop*. Segundo Boysen et al. (2007), Boysen et al. (2009) e Lopes et al. (2018), a forma como as peças são deslocadas ao longo da linha pode ser usada para caracterizar as linhas produtivas em 4 classes. A diferenciação ocorre, portanto, em relação ao *passo* de movimentação da linha:

1. Contínuas - Linhas produtivas onde o produto é posicionado sobre uma esteira, que se move a velocidade constante. As operações são realizadas com a peça em movimento;

2. Assíncronas - Linhas produtivas onde as peças são transportadas para o próximo posto de trabalho assim que o trabalho do posto atual tiver sido terminado e o próximo posto estiver vago;
3. Síncrona - Linha produtiva onde as peças são transportadas entre as estações de forma simultânea. Como todas as peças se movem juntas, linhas desse tipo têm uma implementação mais simples e menos onerosa, quando comparadas às linhas assíncronas;
4. Híbridas - Linhas produtivas que combinam dois ou mais modelos de movimentação de peças entre estações. Recentemente Lopes et al. (2018) abordou o problema de balanceamento para esse tipo de linha.

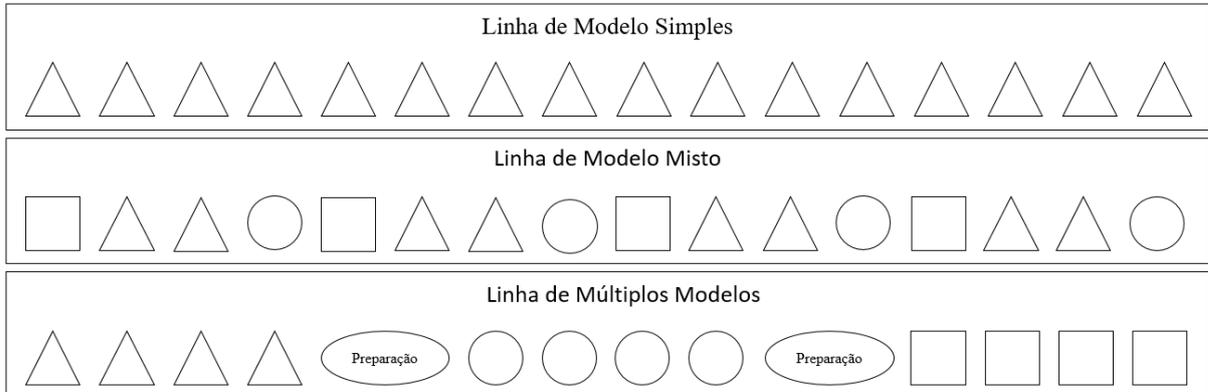
Além de serem categorizadas segundo seu passo, linhas produtivas também podem ser classificadas de acordo com a diversidade de produtos que as mesmas conseguem produzir. Segundo Battaia e Dolgui (2013) e Scholl (2003), há as seguintes classificações por diversidade de peças produzidas:

1. Linha de modelo simples - Apenas uma diversidade de produto é produzida;
2. Linha de modelo misto - Vários modelos de uma mesma família de produtos são produzidos simultaneamente. As tarefas realizadas em todos os modelos são similares. Portanto, não existe a necessidade de alterar as características físicas da linha para a realização das tarefas;
3. Linha de múltiplos modelos - Várias famílias de produtos são produzidas em lotes separados. Neste caso, a linha pode ser rebalanceada para cada lote e pode existir a necessidade de se considerar um tempo de preparação entre o fim de um lote e início de outro.

A Figura 2.1 ilustra as três variações de linhas produtivas, quando classificadas de acordo com o produto.

O *design* (projeto) de uma linha produtiva também é uma forma de caracterizá-la. Segundo Scholl (1999), um dos elementos que mais influenciam a capacidade produtiva de linhas assíncronas, como a presente no caso em estudo, é a existência/ausência de

Figura 2.1: Exemplificação de linhas de montagem simples, modelo misto e múltiplos modelos.



Fonte: Scholl (2003) adaptado

buffers. *Buffers* são estoques intermediários entre postos de trabalho ou linhas inteiras. Estes estoques podem agir como um simples posto de passagem, que pode absorver alguns desbalanceamentos existentes na linha, até um suplemento de peças reserva para o caso de falha em algum setor da linha.

A definição de como os *buffers* devem ser introduzidos na linha de produção representa, por si só, um problema complexo. Para o escopo deste trabalho a alocação dos *buffers*, bem como o *layout* da linha, serão considerados como parâmetros. Mais informações sobre alocação de *buffers* podem ser encontradas em Demir et al. (2014).

2.3 O PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE MONTAGEM

Gaither e Frazier (2002) definem o balanceamento de uma linha como a atribuição de tarefas a estações (ou postos) de trabalho de modo a alcançar a taxa de produção desejada, com o menor número de estações de trabalho, e/ou o menor tempo de ciclo. Por tempo de ciclo considere-se o tempo médio entre a saída consecutiva de produtos da linha.

Salveson (1955) apresentou pela primeira vez um modelo matemático com o objetivo de abordar o problema de balanceamento de linhas de montagem (ALBP¹). Ainda,

¹ALBP - *Assembly Line Balancing Problem*.

segundo Wee e Magazine (1982), o problema de balanceamento de linhas de montagem pode ser considerado como uma generalização do problema de empacotamento, logo, trata-se de um problema *NP-Completo*.

Baybars (1986) sugeriu algumas simplificações ao problema de balanceamento de linhas de montagem. Tais simplificações deram origem ao que hoje é conhecido como o Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem de Modelo Simples (SALBP²). Para que um problema possa ser considerado de tipo SALBP algumas considerações devem ser atendidas:

1. Parâmetros de entrada são conhecidos;
2. Tarefas não podem ser divididas entre as estações;
3. Relações de precedência³ devem ser respeitadas;
4. Todas as tarefas devem ser realizadas;
5. Todas as estações possuem as mesmas características;
6. O tempo de processamento das tarefas é constante;
7. Todas as tarefas podem ser feitas em todas as estações;
8. A linha é sequencial e simples;
9. A linha é de modelo simples;
10. O tempo de ciclo é um parâmetro de entrada.

As hipóteses anteriormente mencionadas definem a forma mais simples do problema de balanceamento de linhas. Porém, segundo Boysen et al. (2007), os problemas do tipo SALBP ainda podem ser divididos em quatro subtipos, de acordo com a sua função objetivo:

- SALBP 1 - Refere-se à situação em que, dado um tempo de ciclo, deseja-se minimizar o número de estações utilizadas;

²SALBP - *Simple Assembly Line Balancing Problem*.

³Precedências são relações entre tarefas que indicam qual a ordem necessária das operação para uma correta montagem de um produto (SCHOLL; BECKER, 2006).

- SALBP 2 - Refere-se à situação em que, dado um número de estações, deseja-se minimizar o tempo de ciclo;
- SALBP F - Refere-se à situação em que, dado um tempo de ciclo e um número de estações, deseja-se factibilizar uma situação inicial pré-estabelecida;
- SALBP E - Refere-se à situação em que, o tempo de ciclo e o número de estações pode ser alterado e se deseja melhorar a eficiência de um modo geral.

O problema de balanceamento de linhas de montagem de modelo simples já foi descrito diversas vezes na literatura. O primeiro trabalho acerca do tema foi publicado por Bowman (1960) e posteriormente aprimorado por White (1961). Variantes com um número menor de restrições foram propostas por Thangavelu e Shetty (1971) e Patterson e Albracht (1975). Uma solução implementada em um *solver* universal, capaz de resolver instâncias maiores do problema, foi apresentada por Pastor e Ferrer (2009).

Muito do sucesso dos algoritmos que tratam o SALBP vem da exploração da simplicidade estrutural do problema. Contudo, respeitar as hipóteses iniciais do SALBP pode ser inviável, conforme se adicionam algumas restrições práticas de problemas reais. Há diversas peculiaridades que podem descaracterizar um problema do tipo SALBP, as mais relevantes para o estudo de caso desse trabalho são:

1. Os problemas de Atribuição, que em sua forma mais simples tratam algumas características ligadas às tarefas como, por exemplo, tarefas que devem obrigatoriamente serem feitas em uma estação (BUXEY, 1974) ou tarefas que devem ser feitas em estações diferentes (LAPIERRE et al., 2004). Para o estudo de caso, esse fator insere-se no fato de que cada robô, devido a características geométricas, possui a capacidade de realizar apenas parte das tarefas envolvidas. Tal característica, segundo os esquemas apresentados por Battaia e Dolgui (2013) e Boysen et al. (2008), podem ser descritas como restrições ligadas às características das estações.
2. Nem todos os trabalhadores/robôs são igualmente rápidos. Esse tipo de consideração é comumente encontrada em problemas de balanceamento de linhas de montagem robotizadas (RALBP⁴)(RUBINOVITZ; BUKCHIN, 1991).

⁴RALBP - *Robotic Assembly Line Balancing Problem*.

3. O tempo de ciclo de cada trabalhador/robô é dado pelo tempo de suas movimentações somado ao tempo gasto em operações. Alguns modelos matemáticos, como o apresentado por Scholl et al. (2013), abordam essa consideração como tempo de *setup*. Porém, esses modelos precisam de uma matriz com os tempos de movimentação entre cada par de operações. Tal condição funciona bem em problemas pequenos mas, para problemas maiores, acaba gerando um conjunto de dados intratável ou não coletável. Lopes et al. (2017) propõem uma nova abordagem para a consideração dos tempos de movimentação. Maiores detalhes sobre essa abordagem serão discutidos nos Capítulos 3 e 4.
4. As estações possuem múltiplos operadores. Tal consideração é frequentemente vista em produtos maiores, onde múltiplos operadores podem trabalhar simultaneamente em uma mesma estação de trabalho. Porém, essa condição necessita de um correto sequenciamento das atividades dos robôs (DIMITRIADIS, 2006).

O estudo de caso em análise reúne todas as características citadas anteriormente, além de outras que serão discutidas no Capítulo 3. O modelo matemático proposto por Lopes et al. (2017) considera em sua formulação todas as variantes citadas sendo, até onde é conhecido pelo autor desta dissertação, a proposta presente na literatura que mais se aproxima das características encontradas no estudo de caso. Portanto, o referido modelo matemático serve de base para o desenvolvimento do presente trabalho.

2.4 CONTEXTO DE MANUFATURA DA CARROCERIA

O processo para a produção de veículos pode ser simplificado em quatro partes principais: estamparia, carroceria, pintura e montagem. É necessária a passagem do veículo por todas estas etapas antes do mesmo estar completo (MICHALOS et al., 2010).

O setor da carroceria, inspiração para a presente dissertação, é o responsável por unir as partes metálicas do veículo. Trata-se de um processo entre a estampagem das chapas e a pintura, onde a estrutura metálica do veículo já deve estar completa.

O processo de união das chapas metálicas acontece quase que exclusivamente por solda ponto por resistência elétrica. O mesmo é amplamente utilizado por ser robusto, barato e altamente automatizável (BARNES; PASHBY, 2000). De modo simplificado,

as duas peças metálicas são unidas por uma corrente elétrica que passa pelas chapas, soldando-as em pontos específicos a partir de liquefação e solidificação do material. O processo de liquefação, união e solidificação do material dura menos de um segundo (ASLANLAR et al., 2008). Para que a solda aconteça, os eletrodos, elementos que transmitem a corrente elétrica, devem estar posicionados em ambos os lados das chapas envolvidas. Portanto, o acesso aos pontos de solda é mais difícil se comparado a outros métodos que precisam acessar a região de solda apenas por um lado. Por esse motivo, muitas geometrias de ferramentas de solda podem ser necessárias para que todos os pontos de solda do veículo possam ser executados pela presente técnica.

O processo de solda pode ser realizado tanto em postos manuais quanto em ilhas (células) robotizadas (ASLANLAR et al., 2008). De modo geral, a união de peças relativamente pequenas é realizada em postos manuais, também chamados no chão de fábrica de postos de preparação; os conjuntos maiores são soldados em ilhas robotizadas. A manipulação das peças, de modo semelhante, pode ser realizada manualmente ou por dispositivos automáticos. As principais opções automáticas são: manipuladores robotizados, transportadores e veículos autoguiados.

Dentro do contexto fabril em análise, um veículo precisa de algo entre 3000 e 7000 pontos de solda para que a integridade estrutural de sua carroceria seja garantida (HAMIDINEJAD et al., 2012). A realização de cada um desses pontos de solda pode ser considerada como uma tarefa e, por consequente, o balanceamento das operações do setor da carroceria implica distribuir esses pontos de solda entre os postos de trabalho.

O Capítulo 3 a seguir apresenta os detalhes envolvidos no problema de balanceamento de uma linha de montagem robotizada, na qual a integridade estrutural da carroceria de veículos é garantida pela aplicação de solda ponto por resistência elétrica.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho trata o problema de balanceamento de uma linha de manufatura robotizada onde realiza-se a aplicação de solda ponto por resistência elétrica na carroceria de veículos. Em particular, restrições de simetria do produto analisado são levadas em conta. Duas contribuições para a operação da linha são desenvolvidas no presente contexto.

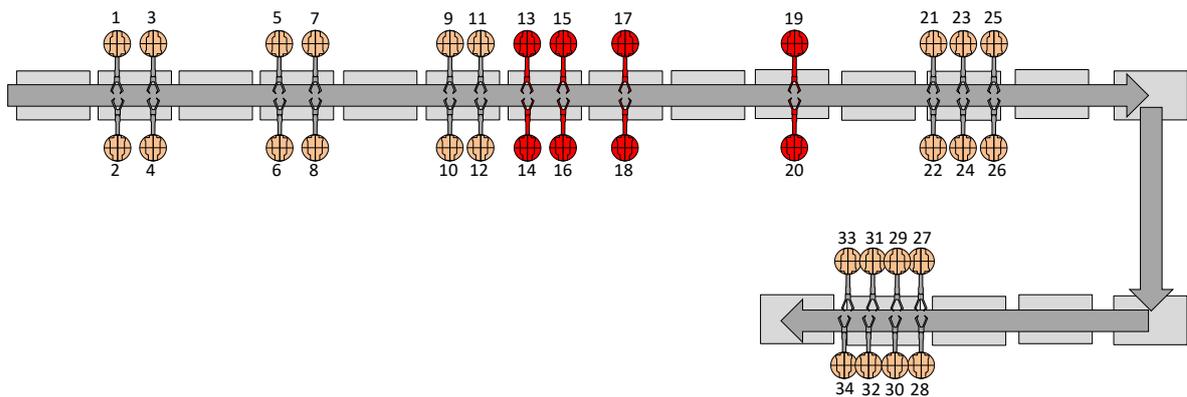
A primeira contribuição, que pode ser considerada como oriunda da continuação do trabalho proposto por Lopes et al. (2017), tem o objetivo de balancear as tarefas de um novo produto que deve ser incorporado ao fluxo produtivo da indústria, mas considerando-se restrições de simetria. No estudo de caso aqui apresentado, a linha avaliada (ilustrada de modo simplificado na Figura 1.2) conta com 34 robôs distribuídos em oito estações, que devem absorver aproximadamente 500 pontos de solda (tarefas) do total de pontos de um novo automóvel.

A segunda contribuição é voltada ao problema de balanceamento temporário. Verificou-se que alguns dos robôs da linha podem ficar inoperantes durante certos intervalos de tempo (*e.g.*, vários dias), havendo necessidade de realocar os pontos de solda anteriormente realizados por eles a outros robôs; o objetivo é que a linha continue operando, mesmo que o tempo de ciclo seja (um pouco) elevado. No estudo de caso em análise, das oito estações estudadas, três possuem robôs obsoletos e a empresa tem o objetivo de atualizá-los. Porém, entre a retirada dos robôs antigos e a entrada dos novos a linha não pode parar. Há de se considerar, adicionalmente, que além das questões de instalação física do novo robô no chão de fábrica há também toda a fase de programação e testes preliminares necessários para a correta operação do novo robô na linha. Este contexto pode consumir (vários) dias até a efetiva entrada em produção do novo robô. Logo, o balanceamento temporário retira os pontos das estações obsoletas e os redistribui,

quando as capacidades dos demais robôs possibilitarem, em outras estações da linha.

A Figura 3.1 apresenta os robôs, marcados em vermelho, que devem ser substituídos na linha no decorrer da realização do estudo de caso de balanceamento temporário.

Figura 3.1: Ilustração dos robôs que serão retirados da linha de produção.



Fonte: Autoria Própria

As condições de base para o problema de balanceamento de uma linha robótica de solda ponto por resistência foram tratadas por Lopes et al. (2017). Porém, uma nova condição imposta pela indústria, as restrições de simetria, fizeram com que o problema precisasse ser reavaliado em relação às premissas indicadas no artigo da literatura. Além disto, no decorrer do estudo, as condições práticas exigiram que a substituição dos robôs na linha, com a consequente avaliação de balanceamentos temporários, também fosse tida em conta. Nas Seções 3.1 a 3.4 descrevem-se as características do problema, assim como as hipóteses utilizadas para abordá-lo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE MANUFATURA

Este projeto tem por objetivo abordar linhas de manufatura robotizadas em estilo *flow shop*, com passo assíncrono e com *buffers* já alocados. Por ser, em essência, uma linha de modelo misto e passo assíncrono, as peças podem se mover para a próxima estação assim que o trabalho na estação atual já estiver completo e a próxima estação estiver

livre. Essa transição de peças acontece de forma similar entre todas as estações e possui um tempo a ser considerado.

A linha de produção ilustrada na Figura 3.1 é, de fato, a parte final da linha de produção de carrocerias e as operações associadas são relativas à finalização da carroceria (*ligne de finition robotize*). Deste modo, no trecho de linha em análise, as cargas de trabalho demandadas nos diferentes produtos são muito semelhantes. Portanto, a exemplo do que foi apresentado em Lopes et al. (2017) e Michels et al. (2018), aproximou-se o comportamento da linha de modelo misto para uma de modelo simples devido às similaridades temporais entre execuções necessárias nos diferentes produtos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES

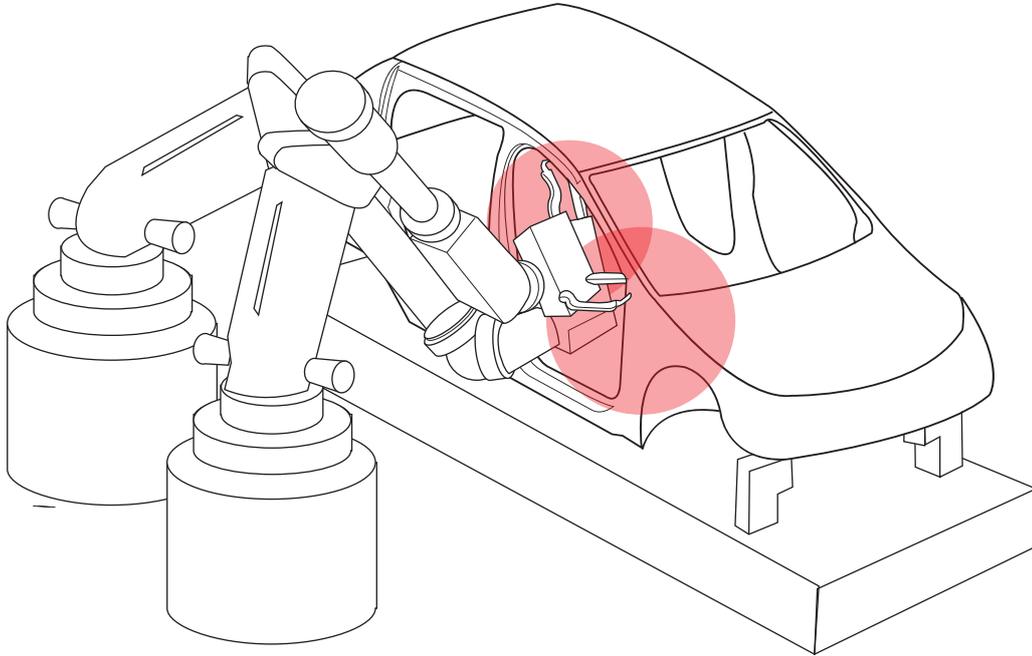
As estações de trabalho, no setor de linha analisado, são compostas por múltiplos operadores robóticos. Essa condição faz com que exista a possibilidade de ocorrer colisão entre os robôs e, desta forma, esse cenário deve ser levado em consideração. Portanto, duas condições de interferência são consideradas por: disputa de espaço, ilustrada na Figura 3.2; cruzamento dos braços dos robôs, ilustrada na Figura 3.3.

As disputas de espaço estão associadas à condição onde dois robôs, de uma mesma estação, atuam em uma região do veículo que não permite que dois robôs trabalhem de forma simultânea. Isso gera duas possíveis situações: a primeira faz com que um dos robôs tenha que esperar o outro realizar suas atividades; a segunda faz com que os robôs tenham que trabalhar dentro de um ciclo em ao menos duas regiões do veículo e que eles alternem entre uma região com disputa de espaço e uma região sem disputa de espaço. A Figura 3.2 ilustra uma colisão por disputa de espaço.

Um programador experiente é capaz de fazer com que dois robôs realizem pontos de solda em regiões com espaço restrito, porém, além de colocar em risco a integridade dos robôs, ainda faz com que a etapa de programação dos mesmos fique muito mais onerosa, em relação ao tempo de implementação da programação robótica. De forma geral, trata-se de uma condição que deve ser evitada.

O segundo tipo de restrição de interferência diz respeito ao cruzamento dos braços dos robôs. A Figura 3.3 ilustra a condição onde o robô que está localizado em uma posição

Figura 3.2: Ilustração de uma colisão entre dois robôs tentando realizar tarefas de solda na porta dianteira do veículo de forma simultânea.

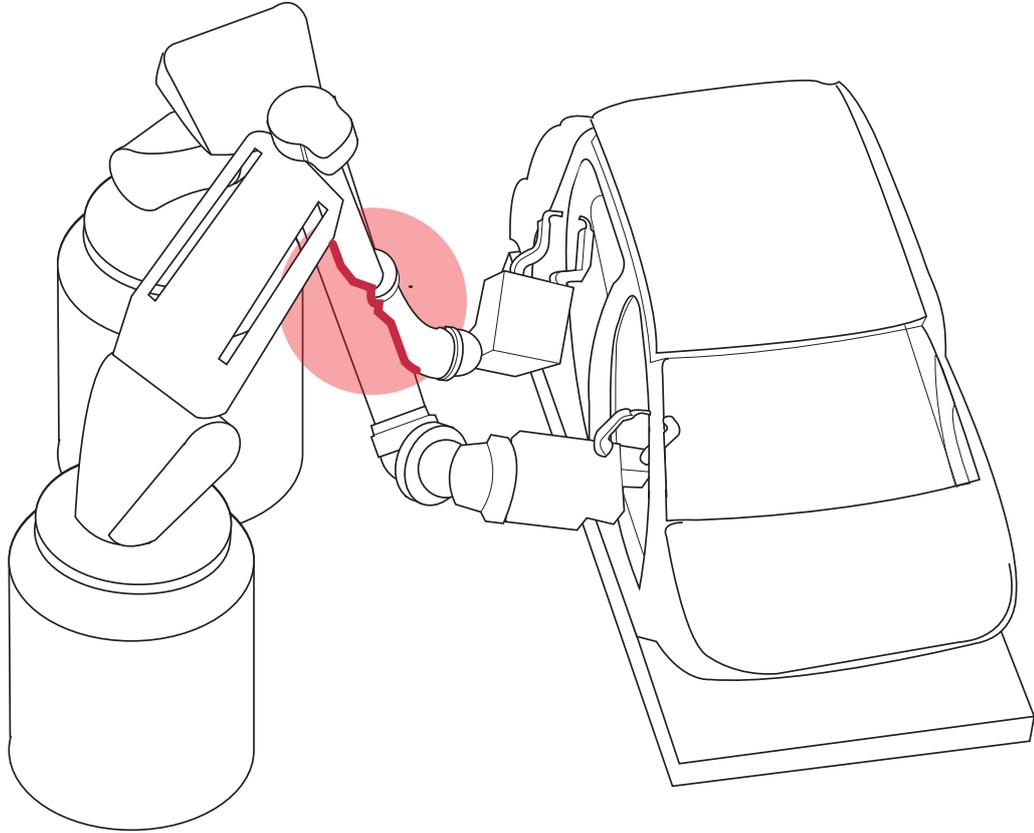


Fonte: Lopes et al. (2017)

mais próxima da região frontal do veículo, tenta realizar pontos de solda na região traseira do mesmo, no caso ilustrado a porta traseira, ao mesmo tempo em que um robô localizado em uma posição mais próxima da traseira do veículo tenta realizar pontos de solda em uma região na dianteira do mesmo, no caso ilustrado a porta dianteira. Essa situação invariavelmente levará a uma colisão entre os braços dos robôs.

No que diz respeito à construção das estações, uma última característica deve ser levada em consideração. A linha de produção foi implementada pensando-se na existência de simetria entre os robôs localizados entre os lados direito e esquerdo da linha de produção, ou seja, um robô que está localizado do lado direito do veículo, em uma dada posição e com uma determinada pinça (ferramenta), terá um par idêntico no lado esquerdo. Nas Figuras 3.4a e 3.4b é possível observar que o robô do lado esquerdo está na mesma posição relativa em relação à mesa de transporte do veículo e com o mesmo conjunto de pinças instalados. Tal situação é replicada em todas as outras estações analisadas.

Figura 3.3: Ilustração da condição de colisão entre robôs devido ao cruzamento entre os braços dos mesmos.



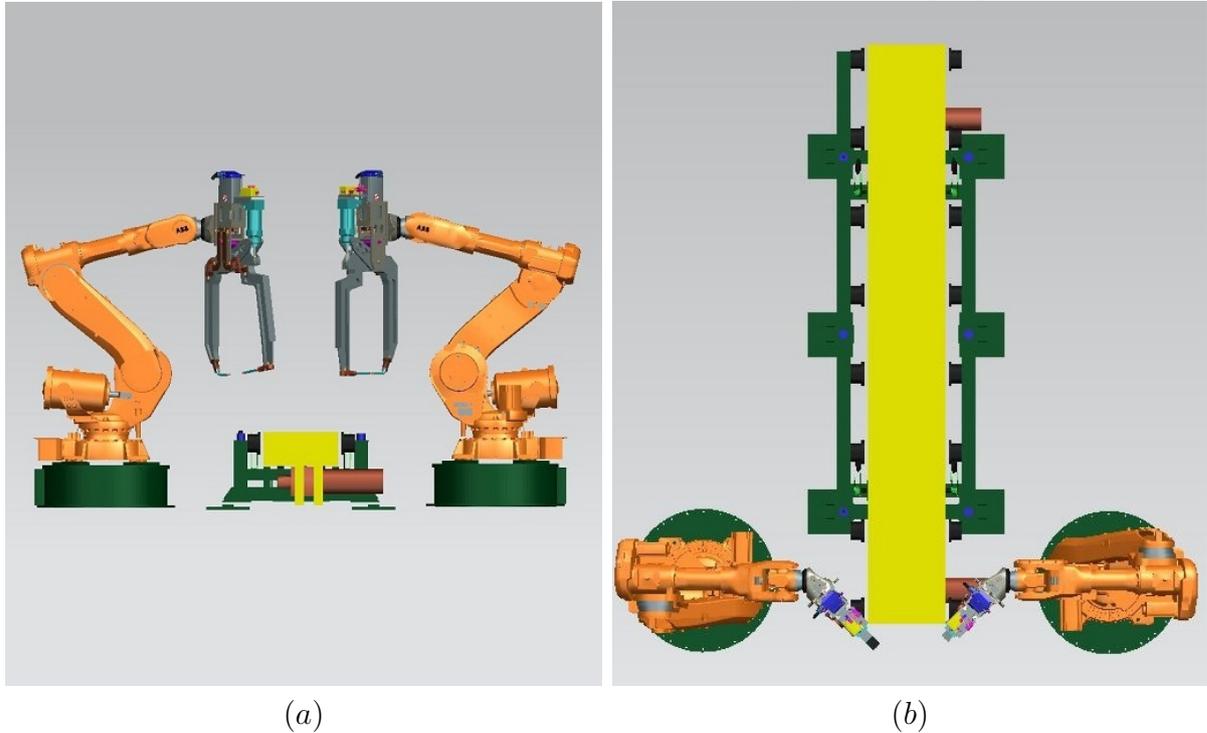
Fonte: Lopes et al. (2017)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DE TAREFAS

Na linha de produção robotizada abordada nesse trabalho, a aplicação de pontos de solda por resistência é a atividade que agrega valor ao produto. Portanto, cada um desses pontos de solda pode ser considerado como uma das tarefas do problema. Os responsáveis pela realização das tarefas, nesse contexto, são os robôs. Logo, estes podem ser comparados, de forma simplificada, às estações de trabalho do problema SALBP. Em adição a isso, a posição de cada ponto de solda (tarefa) em relação à carroceria do veículo limita a capacidade dos robôs (estação de trabalho) de fazer as tarefas, ou seja, nenhum robô tem a capacidade de realizar todas as tarefas.

A impossibilidade de que todos os robôs efetuem todas as tarefas é oriunda de

Figura 3.4: Ilustração das condições de simetria de uma estação de trabalho. Observa-se que o robô do lado esquerdo está na mesma posição relativa em relação ao *pallet* de transporte do veículo e com o mesmo conjunto de pinças instalados.



Fonte: Autoria Própria

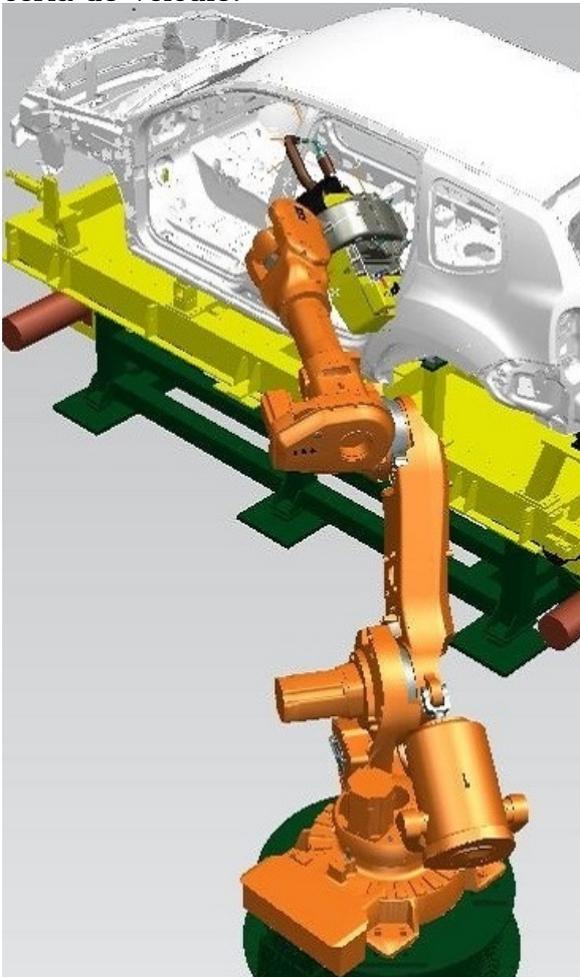
três características geométricas básicas:

1. Os robôs podem estar instalados em posições distintas em relação à carroceria do veículo. Tal condição pode ser vista nas Figuras 1.1 e 1.2, onde observa-se que podem existir de dois a oito robôs em cada estação, fato que impossibilita que todos estejam posicionados na mesma posição em relação à carroceria do veículo;
2. Cada robô possui uma pinça de solda instalada, as quais são classificadas pela indústria em análise em dois tipos: X e J. Existem inúmeras variações de tamanhos e geometrias para cada um dos tipos de pinça e cada uma dessas variações influencia o modo como o robô tem que se posicionar para realizar os pontos solda. Conforme ilustrado nas Figuras 3.5 e 3.6, para a realização de um mesmo ponto de solda, a pinça X (3.5) está posicionada de modo completamente diferente se

comparado com o modelo de tipo J (3.6).

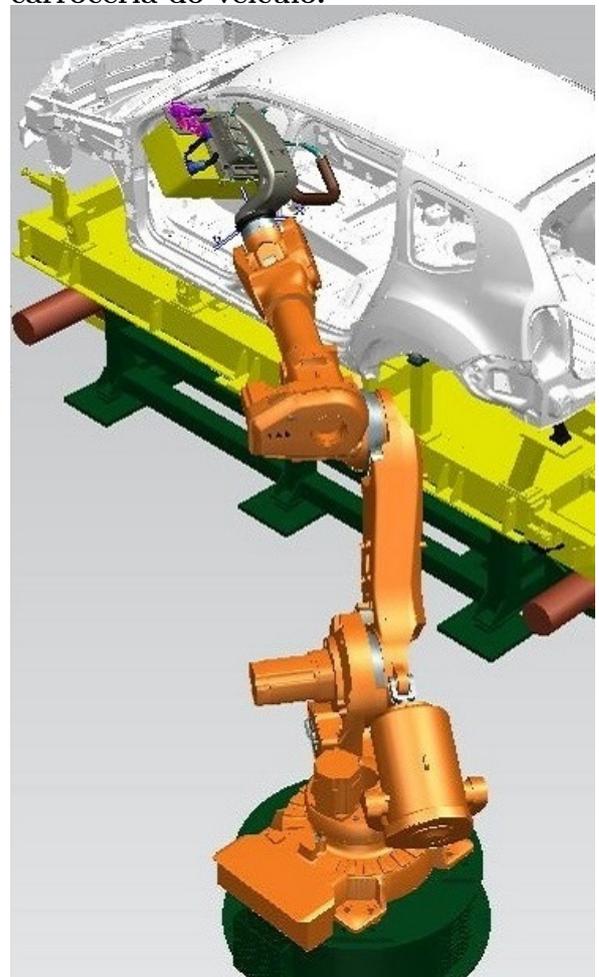
3. A carroceria do veículo possui geometria variável. Portanto, cada região da carroceria possui características distintas que impedem que apenas um conjunto de robô com pinça possa ser usado.

Figura 3.5: Robô realizando ponto de solda na região da porta traseira com pinça de tipo X. Perceba que existe uma colisão entre o corpo da pinça e a carroceria do veículo.



Fonte: Autoria Própria

Figura 3.6: Robô realizando ponto de solda na região da porta traseira com pinça de tipo J. Perceba que não existe uma colisão entre o corpo da pinça e a carroceria do veículo.

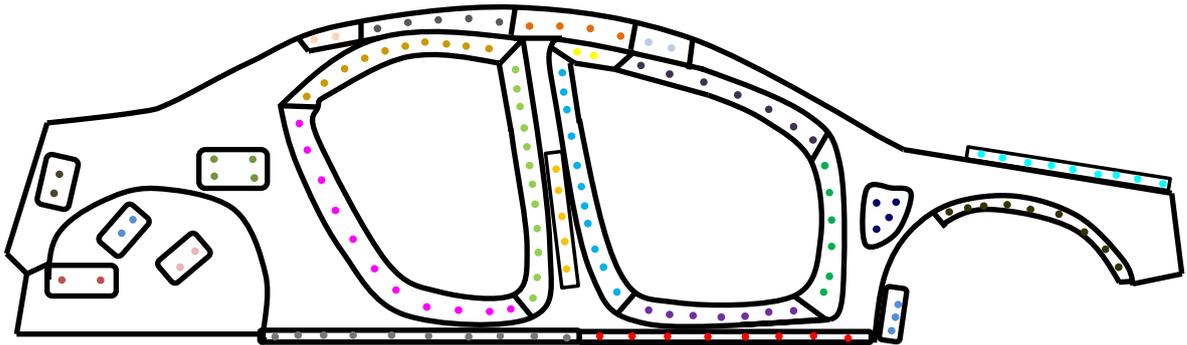


Fonte: Autoria Própria

Essas características de acessibilidade deram origem às restrições de alocação. Como consequência, essas restrições fazem com que as tarefas possam ser realizadas apenas por robôs com posicionamento e ferramenta de solda adequada.

Após a definição do modo de aproximação de cada robô a cada tarefa, faz-se necessário definir o tempo para a realização de cada uma dessas tarefas. Tal tempo é dado pela junção de dois fatores. O primeiro diz respeito às “micromovimentações” que ocorrem dentro de uma região de pontos de solda. De fato, o termo micromovimentações está associado à movimentação necessária para o atendimento de pontos de solda adjacentes que se encontram bastante próximos, acarretando um pequeno deslocamento da ferramenta de solda. As regiões de pontos de solda, que serão discutidas com maior profundidade na Seção 4.1.4, representam a junção de pontos de solda que estão próximos, conforme ilustrado na Figura 3.7, e preferencialmente uniformemente espaçados entre si. Por estarem uniformemente espaçados, o fator tempo de movimentação ponto a ponto dentro de uma região é considerado constante.

Figura 3.7: Ilustração do agrupamento dos pontos de solda em regiões de pontos de solda. Cores distintas indicam as regiões.



Fonte: Lopes et al. (2017)

O segundo fator que deve ser considerado para a determinação do tempo de uma tarefa diz respeito à realização física do ponto de solda. Esse tempo varia de acordo com as características da região de realização da solda. Por exemplo, se as chapas forem relativamente grossas e em grande número, a quantidade de pulsos elétricos necessários para a fusão do material será maior, assim como o tempo necessário para efetuar a tarefa. Portanto, a semelhança nas características físicas da zona do veículo que deve ser soldada, como a espessura e a quantidade das chapas e o material envolvido, é um fator determinante na separação das tarefas em regiões de pontos de solda.

Para o uso no modelo matemático, o tempo necessário para a realização de um

ponto de solda foi simplificado como a soma do tempo necessário para uma movimentação dentro de uma região de pontos de solda com o tempo para a realização do ponto de solda em si. Como as características dos pontos de solda dentro de uma região são idênticas, os pontos de solda dentro dessa região consomem uma quantidade constante de tempo para serem realizados.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

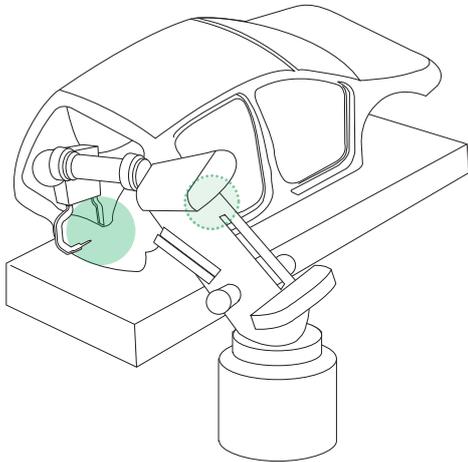
O estudo de caso em análise aborda a seção final do setor de carroceria. Nesta etapa do processo todas as uniões de peças, com o objetivo de garantir a geometria do veículo, já foram previamente efetuadas e, sendo assim, não existe uma ordem que deve ser obedecida para a aplicação dos pontos de solda. Tal característica faz com que não exista a necessidade de se observar relações de precedência neste setor da linha de produção.

Durante um tempo de ciclo os robôs fazem múltiplos pontos de solda. Cada um desses pontos de solda está posicionado em uma coordenada em relação à carroceria do veículo. Portanto, para a realização de todos os pontos de solda é imperativo que o braço robótico tenha que se deslocar de um ponto de solda para outro. Assim, o tempo que cada robô passa se locomovendo é relevante para uma correta avaliação do tempo de ciclo do mesmo.

Devido às características geométricas da carroceria do veículo e do modo de operação dos eixos dos robôs, esse tempo de movimentação não pode ser simplesmente relacionado com a distância euclidiana entre dois pontos de solda. Nas Figuras 3.8 e 3.9 é possível observar um robô realizando dois pontos de solda com distâncias euclidianas pequenas entre si. Nessa situação é possível observar como, apesar da proximidade entre os pontos de solda, os robôs estão com uma configuração de eixos completamente diferente em cada uma das posições.

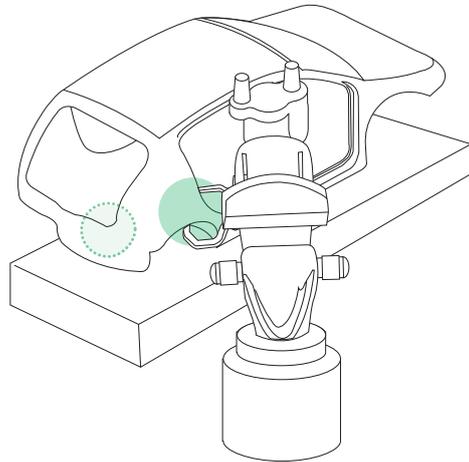
Observações empíricas da linha, ilustrada na Figura 1.2, mostraram que as movimentações dos robôs podem ser divididas em quatro casos. O primeiro aborda as movimentações pequenas, que acontecem entre duas regiões que não são adjacentes e que encontram-se em um mesmo *acesso*. Da mesma forma como as regiões são agrupamentos de pontos de solda, os acessos são agrupamentos de regiões em zonas maiores do veículo,

Figura 3.8: Robô realizando ponto de solda na região do porta malas.



Fonte: Lopes et al. (2017)

Figura 3.9: Robô realizando ponto de solda na região da porta traseira.



Fonte: Lopes et al. (2017)

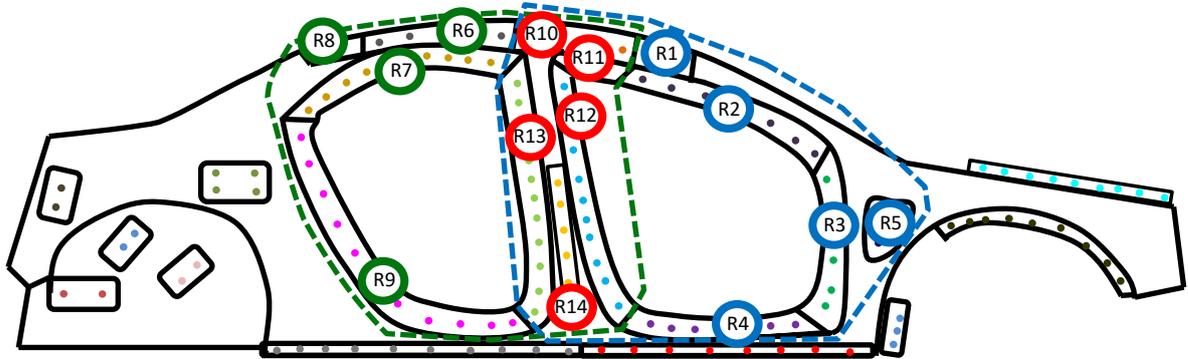
utilizadas para a correta contabilização de movimentos maiores (LOPES et al., 2017).

A Figura 3.10 exemplifica o conceito de acesso. Nessa figura pode-se observar que as regiões R1 a R5, delimitadas pelo tracejado azul, representam as regiões de pontos de solda que compõem exclusivamente a porta dianteira. As regiões R6 a R9, delimitadas pelo tracejado verde, formam o conjunto de regiões cujo acesso é feito exclusivamente pela porta traseira. E as regiões R10 a R14, localizadas na interseção dos pontilhados azul e verde, formam um grupo de regiões de pontos de solda que podem ser acessadas por ambas as portas, sendo a limitação do acesso determinada por características individuais de cada robô. Em adição a isso, similarmente ao que acontece com os pontos de solda dentro de uma região, as movimentações entre regiões dentro de um acesso, via de regra, têm tempo constante.

O segundo caso para análise de movimentações dos robôs aborda as regiões adjacentes dentro de um mesmo acesso. Esta condição ocorre, por exemplo, entre as regiões R2 e R3 na Figura 3.10, onde o tempo de movimentação entre as referidas regiões pode ser desconsiderado.

A terceira alternativa são os movimentos médios. Estes são caracterizados nos cenários onde um robô precisa fazer pontos em dois acessos próximos, como por exemplo

Figura 3.10: Ilustração do agrupamento de regiões em acessos.



Fonte: Autoria Própria

quando a movimentação acontece da porta dianteira para a porta traseira ou do para-brisa para a porta dianteira.

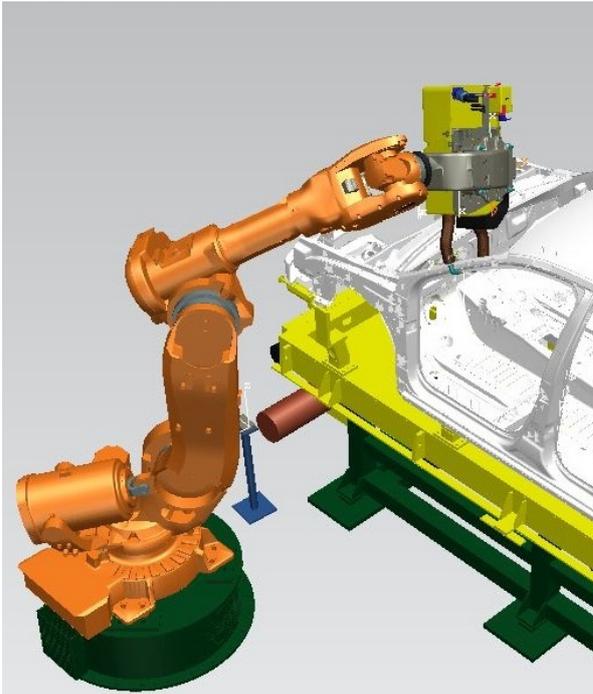
Por fim, o quarto caso trata as movimentações mais longas, ou seja, as movimentações em que o robô precisa sair do porta-malas e ir para a porta dianteira ou sair do para-brisa e se locomover para realizar outros pontos de solda na porta traseira.

Além do que foi apresentado nas quatro condições anteriores, ainda existe um outro fator complicador. Algumas tarefas podem ser acessadas por mais de uma região do veículo. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram um robô realizando um ponto de solda em uma região que pode ser acessada tanto pelo para-brisa quanto pela porta dianteira. Dependendo da escolha, a posição do braço robótico fica completamente diferente. Logo, se no ciclo do robô existirem pontos na região da porta, o tempo necessário para o robô acessar esse ponto mostrado na Figura 3.12 será menor do que se ele o fizer pelo para-brisa.

A Figura 3.10 ilustra como essa situação de diferentes possibilidades de acesso a um ponto de solda é informada ao modelo. Perceba que existe um *overlap* (sobreposição) entre os acessos da porta dianteira e traseira. Este fato faz com que os pontos envolvidos estejam presentes em ambos os acessos e, portanto, possam ser realizados por qualquer um dos mesmos. Em adição a isso, pode existir um *overlap* entre os acessos, isso indica, por exemplo, que os pontos da coluna central podem ser efetuados tanto pelo acesso porta dianteira quanto pelo acesso porta traseira.

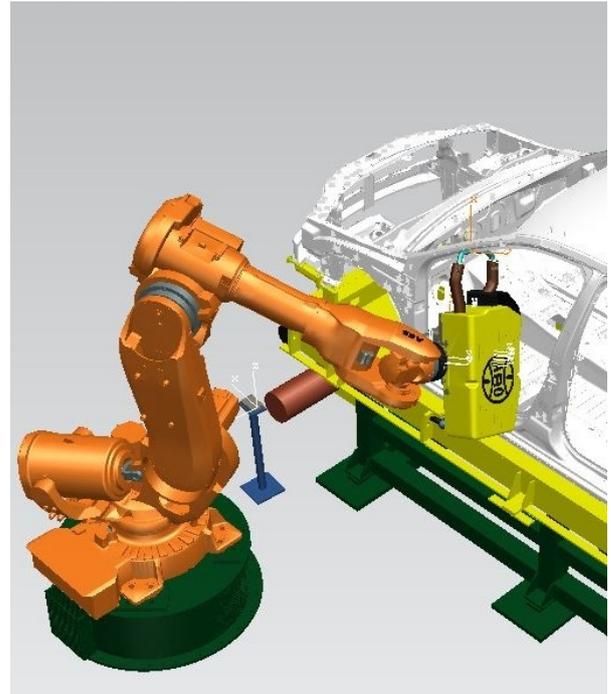
Ainda sobre as opções de solda, outro fator pode ser mencionado. Assim como as

Figura 3.11: Robô realizando ponto de solda em uma região entre o para-brisa e a porta dianteira acessando pelo para-brisa. Na Figura 3.12 o robô está acessando esse mesmo ponto de solda, porém, sua configuração de eixos está completamente diferente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 3.12: Robô realizando ponto de solda em uma região entre o para-brisa e a porta dianteira acessando pela porta dianteira. Na Figura 3.11 o robô está acessando esse mesmo ponto de solda, porém, sua configuração de eixos está completamente diferente.



Fonte: Autoria Própria

estações foram construídas de forma simétrica, a maioria das tarefas também o são. De modo geral, se existir um ponto de solda em um lado da carroceria existirá um ponto de solda do outro lado em uma posição simétrica em relação à linha de centro do veículo.

Apesar da maioria dos pontos de solda possuírem um par simétrico, e dos robôs da linha estarem posicionados simetricamente, não existe a possibilidade de um robô do lado direito da linha fazer exatamente os mesmos pontos que o seu irmão do lado esquerdo em todas as estações. Tal impedimento tem sua origem em duas condições distintas. A primeira tem sua base apenas no fato de que existem algumas pequenas diferenças entre os lados direito e esquerdo do veículo. Um exemplo pode ser notado no fato de que, de modo geral, os carros possuem o acesso ao tanque de combustível apenas em um de seus lados. Portanto, durante a fabricação da carroceria de um veículo existe a necessidade de

realizar alguns pontos de solda na estrutura do canal de entrada do tanque de combustível.

A segunda está diretamente ligada às características de interferência. Em algumas regiões do veículo, como por exemplo o porta-malas, pode existir as mesmas condições de interferência apresentadas nas Figuras 3.2 e 3.3. Logo, para esses pontos de solda não existe a possibilidade de se realizar uma distribuição exatamente simétrica, tendo em vista a impossibilidade dos robôs trabalharem livremente devido às questões de interferência.

3.5 OBJETIVOS DA EMPRESA

O objetivo principal da empresa é inserir um novo modelo de veículo sem impactar a *performance* (desempenho) da linha. Sabendo-se que o número de estações e as informações dos robôs são conhecidas, a dificuldade principal do problema reside na necessidade de distribuir os pontos de solda que devem ser feitos pelos diferentes robôs, mas mantendo-se o tempo de ciclo abaixo do requisitado.

O segundo objetivo da empresa reside em criar uma alternativa temporária para uma futura substituição de alguns robôs obsoletos por modelos mais novos. Por ser uma tarefa que envolve modificações de estrutura fabril além das programações e testes dos novos robôs, o período de substituição pode se estender por vários meses. Portanto, o segundo objetivo resume-se a encontrar uma distribuição para os pontos de solda, que originalmente estavam alocados nos robôs em atualização, nos robôs remanescentes, sem alterar as trajetórias originais dos robôs que receberão os pontos de solda, e impactando o mínimo possível a “cadência” (tempo de ciclo) da linha.

O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático original, proposto por Lopes et al. (2017), juntamente com as alterações que foram realizadas com o intuito de alcançar os objetivos esperados pela indústria em análise.

4 MODELO MATEMÁTICO

Esse capítulo foi organizado da seguinte forma: A seção 4.1 discute o modelo base, apresentado por (LOPES et al., 2017). A Seção 4.2 apresenta algumas modificações realizadas nas restrições do modelo base. A seção 4.3 discute as adaptações necessárias para modelar os aspectos de semi-simetria encontrados no estudo de caso apresentado; o conteúdo da presente seção é o componente principal de um artigo apresentado pelo autor da presente dissertação no Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (MOLINA et al., 2018). Por fim, a Seção 4.4 apresenta as modificações que foram adicionadas ao modelo com o objetivo de realizar o balanceamento temporário.

4.1 MODELO BASE

Este trabalho foi baseado em um modelo matemático proposto por Lopes et al. (2017). Nesse contexto, esta seção fará uma apresentação deste modelo matemático e lançará a base para o entendimento de quais modificações precisaram ser feitas de modo a atingir o objetivo de considerar as características de simetria exigidas, o balanceamento temporário, assim como, algumas modificações com o intuito de facilitar a implementação das respostas do modelo no ambiente prático em análise.

4.1.1 MODELO BASE: FUNÇÃO OBJETIVO

O modelo apresentado por Lopes et al. (2017) considerava que a linha já estava funcionando e as três diversidades de veículos avaliadas já estavam implementadas e em fluxo normal de produção. Portanto, as possibilidades de melhoria se reduziam a duas: Minimizar o tempo de ciclo da linha; Maximizar o número de pontos de solda feitos na linha, respeitando-se um tempo de ciclo máximo admissível, em uma tentativa de diminuir

a carga de trabalho de outros setores da fábrica.

A primeira abordagem acabou sendo escolhida por estar alinhada ao objetivo industrial de aumento de cadência das linhas produtivas (diminuição do tempo de ciclo). Neste sentido, a função objetivo do modelo base ficou sendo a minimização do tempo de ciclo (vCT), conforme apresentado na Equação 4.1, sendo este dado pelo tempo do robô mais carregado ($vCTW_w$) dentre todos os robôs avaliados ($w \in W$), conforme apresentado na Inequação 4.2.

$$\text{Minimizar } Z = vCT \quad (4.1)$$

$$vCT \geq vCTW_w \quad \forall w \in W \quad (4.2)$$

Similarmente aos problemas de tipo SALBP, o tempo de ciclo deste modelo é dado pelo tempo de ciclo da estação mais lenta.

4.1.2 PARÂMETROS

No contexto de problemas práticos abordados por meio de Programação Linear Inteira Mista, conforme o estudo de caso em análise, a correta obtenção de parâmetros de entrada é fundamental. Os dados de entrada podem ser configurados de várias maneiras, desde, por exemplo, um valor único, como o número de estações de trabalho da linha, a conjuntos complexos com vários índices, como, por exemplo, dados de acessibilidade. No restante deste trabalho, da mesma forma como em Lopes et al. (2017), esses dados serão chamados conjuntos de tuplas, ou, vetores inteiros multi-posicionais que apresentam interpretações específicas para cada valor em cada posição.

As informações relevantes ao problema¹, que foram inicialmente apresentadas no Capítulo 3, serão transcritas em conjuntos de tuplas e parâmetros. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados todos os conjuntos de tuplas e parâmetros utilizados pelo modelo base apresentado por Lopes et al. (2017). De modo a facilitar o entendimento, todos os parâmetros aqui apresentados terão sua primeira letra maiúscula e as variáveis terão a primeira letra minúscula.

¹As informações relevantes ao problema podem ser resumidas em: características das acessibilidades, interferências e movimentações.

Tabela 4.1: Conjuntos e tuplas utilizados no modelo base.

Conjunto	Tuplas	Descrição e significado de cada conjunto de tuplas
S	s	Intervalo do conjunto de estações (<i>Stations</i>)
R	r	Intervalo do conjunto de regiões (<i>Regions</i>)
W	w	Intervalo do conjunto de robôs (<i>Workers</i>)
WS	(w, s)	Indica que o robô w está alocado na estação s
WRA	(w, r, a)	Indica que o robô w possui a capacidade de acessar a região r pelo acesso a
WA	(w, a)	Indica que o robô w possui a capacidade de utilizar o acesso a
RR	(r_1, r_2)	Indica que as regiões r_1 e r_2 são adjacentes
$WRRR$	(w, r_1, r_2, a)	Indica que o robô w consegue fazer uso da adjacência entre as regiões r_1 e r_2 pelo acesso a
WAA	(w, a_1, a_2)	Indica que o robô w consegue fazer uso da adjacência entre os acessos a_1 e a_2
CR	(c, r)	Indica que a região r pertence ao ciclo de regiões c
WCR	(w, cr)	Indica que o robô w é capaz de atuar no ciclo de regiões cr
WCA	(w, ca)	Indica que o robô w é capaz de atuar no ciclo de acessos ca
WEM	(w, em)	Indica que o robô w pode acessar a macro-região de exclusão em
WCM	(w, cm)	Indica que o robô w pode acessar a macro-região de cruzamento cm
EMR	(em, r)	Indica que a região r pertence à macro-região de exclusão em
CMR	(cm, r)	Indica que a região r pertence à macro-região de cruzamento cm
$WMWM$	(w_1, m_1, w_2, m_2)	Indica que o robô w_1 não é capaz de acessar a macro-região de cruzamento m_1 ao mesmo tempo que o robô w_2 acessa a macro região de cruzamento m_2
EA	a	Indica que o acesso a controla a restrição de disputa de espaço

4.1.2.1 PARÂMETROS DE CONTROLE DE ACESSIBILIDADE

Como descrito no Capítulo 3 nem todos os robôs possuem a capacidade de realizar todos os pontos de solda. As tuplas que caracterizam os aspectos referentes à acessibilidade têm o objetivo de delimitar quais regiões podem ser trabalhadas por determinados robôs. Para tanto, dois conjuntos de tuplas são utilizados: O primeiro define quais acessos, ilustrados na Figura 3.10, um robô é capaz de acessar; O segundo determina quais regiões, ilustradas na Figura 3.7, dentro desse acesso o robô é capaz de atuar.

O Conjunto WRA de tuplas (w, r, a) descreve quais regiões um robô é capaz de acessar em cada acesso. Note na Figura 3.10 que uma região pode ser trabalhada por

Tabela 4.2: Parâmetros de ocorrência e controle de tempo

Parâmetro	Conjunto	Tupla	Significado
T_s	-	-	Tempo fixo de transferência de peças entre as estações
N_r	R	r	Número de pontos em uma região r
T_r	R	r	Duração de cada ponto em uma região r
T_w	W	w	Duração de cada ponto para um robô w
V_w	W	w	Velocidade relativa do robô w
T_{movR}	-	-	Tempo de movimentação entre regiões
T_{movA}	-	-	Tempo de movimentação entre acessos
T_{adjR}	-	-	Tempo ganho por adjacência entre regiões
T_{adjA}	-	-	Tempo ganho por adjacência entre acessos
U_p	-	-	Limitante superior para regiões com disputa de espaço
D_p	-	-	Valor de ajuste para restrição de disputa de espaço

mais de um acesso. No caso ilustrado, um robô poderia acessar a parte vertical central da porta dianteira pelo acesso referente à porta traseira.

O conjunto WA de tuplas (w, a) descreve por qual acesso um robô w possui a capacidade de realizar um ponto de solda. Esse conjunto tem como principal objetivo contabilizar o número de movimentações entre acessos que um robô realiza durante seu ciclo, conforme pode ser observado na Seção 4.1.4. É válido observar que todas as tuplas (w, r, a) em WRA possuem um equivalente no conjunto WA .

4.1.2.2 PARÂMETROS DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO

O tempo que um robô passa se locomovendo entre um ponto de solda e outro está diretamente ligado ao número de regiões em que o mesmo atua. De modo geral, quanto maior o número de regiões maior será o tempo gasto com deslocamentos. Neste sentido é importante salientar que, conforme discutido no Capítulo 3, o tempo de deslocamento entre regiões pode variar e, nos casos em que exista adjacência entre regiões, ser desprezível.

O conjunto RR de tuplas (r_1, r_2) indica a existência de adjacência entre o par de regiões r_1 e r_2 . Sendo que, o conjunto (WRA) de tuplas (w, r_1, r_2, a) indica quais destas adjacências um robô w é capaz de utilizar. Esse segundo conjunto (WRA) é necessário pois existe a possibilidade de algum conjunto específico envolvendo robô/ferramenta não ser capaz de fazer uso de alguma adjacência por algum acesso.

O conjunto CR de tuplas (c, r) descreve as regiões que formam ciclos. Essa

característica não foi tratada no Capítulo 3 por envolver uma das simplificações que serão discutidas nas Seções 4.1.4.2 e 4.2.

Tão importante quanto contabilizar as adjacências entre regiões é contabilizar as adjacências entre acessos. Porém, diferentemente do que acontece com a adjacência entre regiões, a adjacência entre acessos não possui um padrão lógico de continuidade. Em fato, as adjacências entre acessos indicam proximidade e podem ocorrer de forma dupla. Por exemplo, suponha que uma movimentação entre dois acessos sem adjacência leve 6 segundos, então, uma adjacência simples levaria 4 segundos e uma adjacência dupla poderia levar 2 segundos. É importante ressaltar que o tempo de movimentação entre duas regiões localizadas em acessos diferentes é dado pelo tempo da movimentação dentro do acesso acrescido do tempo de movimentação entre acessos.

O conjunto WAA de tuplas (w, a_1, a_2) , similarmente com o que ocorre com o conjunto WRA , indica a capacidade de um robô w de fazer uso das adjacências entre a_1 e a_2 .

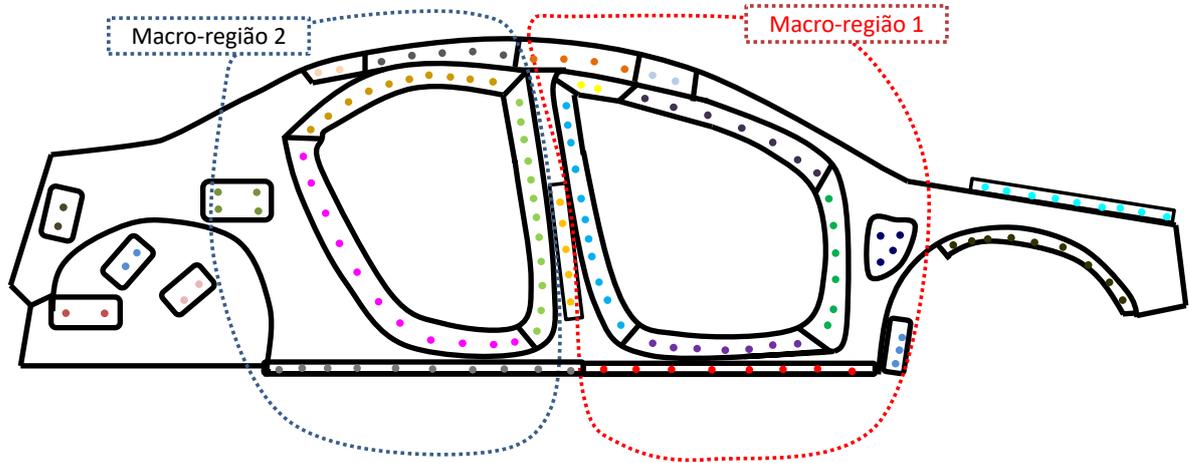
4.1.2.3 PARÂMETROS DE CONTROLE DE INTERFERÊNCIA

As interferências foram modeladas levando-se em consideração dois aspectos: acessos e macro-regiões. O primeiro já foi abordado na Seção 4.1.2.1, o segundo, para a grande maioria dos casos, não precisaria ser definido. Porém, como existem acessos como o porta-malas, onde podem ocorrer interferências por cruzamentos e interferência por disputa de espaço, apenas o controle por acessos não seria suficiente.

As macro-regiões, ilustradas na Figura 4.1, possuem um conceito muito semelhante aos acessos, ou seja, são grupos compostos por regiões.

Para as disputas de espaço, outros dois parâmetros são necessários: U_p e D_p . O primeiro é um número inteiro que informa ao modelo matemático o número máximo de pontos de solda que um robô pode realizar em um acesso, se apenas ele trabalhar no mesmo. Trata-se de um número suficientemente grande, de modo que garanta que a resposta ótima não será influenciada. O segundo é um decremento ao primeiro e fala quantos pontos de solda a menos um robô poderá realizar na região, caso exista disputa de espaço.

Figura 4.1: Figura exemplificando as Macro-Regiões de Interferência.



Fonte: Lopes et al. (2017) adaptado

Os parâmetros de cruzamento são controlados pelo conjunto EMR . Esse conjunto indica quais regiões pertencem a uma macro região de cruzamento. O conjunto $WMWM$ é composto de combinações de robôs w_1 e w_2 trabalhando nas macro-regiões m_1 e m_2 . A partir destes dois pares que foram formuladas as restrições de interferência por cruzamento.

Por fim, os conjuntos WEM e WCM são listas com os robôs que têm direito a trabalhar em acessos com disputa de espaço e dos robôs que estão submetidos às restrições de cruzamento, respectivamente. Esses dois parâmetros são úteis para a definição das variáveis de interferência.

4.1.2.4 OUTROS PARÂMETROS

O *range* S é uma lista de todas as estações. O conjunto R lista todas as regiões do problema. O conjunto W lista todos os robôs. O conjunto WS informa a quais estações os robôs estão alocados.

Cada região tem um número de pontos de solda N_r e uma duração para a realização desses pontos de solda T_r . Similarmente, cada robô tem um tempo próprio para a realização dos pontos de solda T_w e um parâmetro de velocidade V_w .

Os parâmetros de movimentação envolvem: T_{movR} , que representa o tempo de movimentação entre regiões; e T_{movA} , que controla o tempo de movimentação entre acessos. Como forma de controlar o tempo para movimentações menores, o parâmetro T_{adjR} faz um decremento ao tempo de movimentação entre regiões e o parâmetro T_{adjA} faz um decremento para as movimentações entre acessos. Por fim, todos os tempos que não são controláveis, como por exemplo, tempos de *setup* ou tempos de movimentação das peças entre as estações são informados ao modelo pelo parâmetro T_S .

4.1.3 VARIÁVEIS DE DECISÃO

Dentro do contexto de Programação Linear Inteira Mista, as variáveis de decisão delimitam o que está sendo otimizado e quais são as possíveis alternativas a serem seguidas. Segundo Williams (2013), existem basicamente as seguintes variantes das referidas variáveis:

1. As variáveis reais, que representam valores contínuos. Neste trabalho é usado primariamente para o controle de tempo;
2. As variáveis inteiras que controlam decisões que precisam ser necessariamente expressas em valores discretos. A contabilização dos pontos de solda representa um exemplo aplicável neste trabalho deste tipo de variável;
3. As variáveis binárias que são aplicadas para decisões de sim ou não. Neste trabalho elas são utilizadas, por exemplo, toda vez que é necessário definir se um robô atua em uma região de pontos de solda ou não.

De forma a facilitar o entendimento, a notação de parâmetros e variáveis utilizadas no trabalho original foi mantida. Ou seja, todos os nomes que compõem as variáveis serão dados segundo a seguinte forma: R para regiões; A para acessos; S para estações; W para robôs; C para ciclos; T para tempo; N para número; M para macro-regiões ou movimentos. Em adição a isso, as seguintes letras minúsculas são utilizadas para facilitar a visualização do tipo de variável: b indica uma variável binária; n uma variável inteira; v uma variável real não negativa. A Tabela 4.3 concatena todas as variáveis utilizadas no modelo base para esse trabalho.

Tabela 4.3: Variáveis e seus respectivos significados.

Variável	Tupla	Descrição e significado de cada variável
vCT	-	Tempo de ciclo da linha
$vCTW$	w	Tempo de ciclo de cada robô
nMR	w	Número de movimentos entre regiões realizados pelo robô w
nMA	w	Número de movimentos entre acessos realizados pelo robô w
bWA	(w, a)	Informa se o robô w usa o acesso a
$nWRA$	(w, r, a)	Número de pontos de soldas efetuados pelo robô w na região r pelo acesso a
$bWRA$	(w, r, a)	Binária que indica que o robô w realiza algum ponto de solda na região r pelo acesso a
$bWRRR$	(w, r_1, r_2, a)	Binária que indica que o robô w utiliza adjacência entre as regiões r_1 e r_2 pelo acesso a
$bWAA$	(w, a_1, a_2)	Binária que indica que o robô w utiliza adjacência entre os acessos a_1 e a_2
$bWEM$	(w, em)	Binária que indica que o robô w efetua pontos de solda em uma região com disputa de espaço em
$bWCM$	(w, ccm)	Binária que indica que o robô w efetua pontos de solda em uma região com interferência por cruzamento ccm

O objetivo principal do problema em análise é o balanceamento da linha, ou seja, a adequada distribuição de carga de trabalho entre os operadores robóticos. Nesse sentido torna-se lógico que a variável básica deste modelo matemático seja a variável que contabilize a quantidade de pontos de solda efetuada por cada robô ($nWRA$), definida no conjunto de entrada WRA .

Todas as outras variáveis estão conectadas, de forma direta ou indireta, à variável principal ($nWRA$). Seguindo-se com esta análise, outra variável importante é $bWRA$. Essa variável binária indica se um robô w realiza ou não pontos de solda na região r pelo acesso a ; recebe o valor 1 toda vez que o a variável $nWRA$ receber um valor igual ou superior a 1. Esse mesmo conceito também é seguido pela variável que controla por qual acesso o robô efetua o ponto de solda, bWA .

O controle de movimentações do modelo matemático foi atribuído a duas variáveis complementares: a nMR e a nMA . A primeira controla quantos movimentos um robô utiliza entre regiões (r) e a segunda faz o mesmo para os acessos (a).

Para fazer a correta avaliação do tempo de ciclo, esse modelo precisa contabilizar quais adjacências são utilizadas por cada robô. A variável $bWRRR$ controla se um robô w utiliza as regiões r_1 e r_2 pelo acesso a . De modo similar a variável $bWAA$ controla se

um robô w faz uso da adjacência entre os acessos a_1 e a_2 .

De modo a evitar colisões entre robôs duas variáveis foram implementadas. A primeira, $bWEM$, controla as interferências de disputa de espaço; e a segunda, $bWCM$ controla a existência de cruzamento dos braços dos robôs.

Por fim, a variável vCT controla o tempo de ciclo da linha.

4.1.4 RESTRIÇÕES DO MODELO BASE

Com as variáveis definidas, o próximo passo é apresentar as restrições matemáticas, que juntamente com essas variáveis, representam o comportamento da linha produtiva. O modelo base é composto por três tipos principais de restrições:

1. Restrições de ocorrência, que fazem com que todos os pontos de solda sejam feitos;
2. Restrições de controle de tempo, que controlam o tempo de cada robô, suas movimentações e adjacências, conforme as definições do problema;
3. Restrições de interferência, que servem para prevenir que interações não válidas entre os múltiplos robôs de uma estação ocorram.

4.1.4.1 RESTRIÇÕES DE OCORRÊNCIA

As restrições de ocorrência garantem que todos os pontos de solda serão efetuados, isto implica que, para cada região r , a soma de pontos de solda efetuados nessa região deve ser igual à quantidade de pontos que a mesma contém. As restrições de acessibilidade dizem que apenas os robôs que conseguem acessar a região de pontos de solda podem efetuar os mesmos. Essa informação é um parâmetro dado ao modelo pelo conjunto WRA . A Equação 4.3 apresenta a formulação utilizada para modelar as ocorrências.

$$\sum_{(w,r,a) \in WRA} nWRA_{(w,r,a)} = N_r \quad \forall r \in R \quad (4.3)$$

4.1.4.2 RESTRIÇÕES DE CONTROLE DE TEMPO

Para o balanceamento de linhas de montagem de modelo simples o tempo de ciclo da linha é determinado pelo tempo da estação mais carregada. Na linha de produção robótica analisada, cada estação pode ser considerada como um espaço físico onde os robôs são alocados e, de forma análoga ao visto para o tempo de ciclo da linha, o tempo de ciclo da estação é dado pelo robô mais carregado da mesma. O tempo de ciclo de cada robô é dado pela quantidade de operações² que o mesmo realiza, conforme dado pela Inequação 4.4. Observe que esta inequação é definida para todo (w, s) pertencente a WS de forma que o tempo de *setup* para cada estação (T_s) possa ser observado.

A Inequação 4.4 pode ser dividida em seis termos:

1. Termo relacionado ao tempo requerido para que um robô realize o ponto de solda. Para cada região o tempo requerido é proporcional ao número de pontos de solda realizados. Este termo está diretamente relacionado à variável $nWRA$, que contabiliza quantos pontos de solda um robô efetuou em uma região por um acesso.
2. Termo diretamente relacionado à variável nMR que contabiliza quantas movimentações entre regiões de pontos de solda foram efetuadas pelo robô. O tempo de movimentação entre cada região ($TmovR$) é constante e pode ser influenciado por um parâmetro de velocidade do robô (V_w).
3. Termo que contabiliza o tempo morto de uma estação (T_s) é usado para contabilizar tempo de manipulação das peças e outros possíveis tempos de *setup*.
4. Termo relacionado à variável binária $bWRA$ e tem o objetivo de identificar se a movimentação efetuada entre regiões por um robô é entre duas regiões adjacentes. Se a afirmativa for verdadeira esse termo aplica um decremento no custo desta movimentação.
5. Termo diretamente relacionado à variável nMA que contabiliza quantas movimentações entre acessos foram efetuadas pelo robô. O tempo de movimentação entre cada acesso ($TmovA$) é constante e pode ser influenciado por um parâmetro de velocidade do robô (V_w).

²As operações podem ser basicamente duas: solda ou manipulação.

6. Termo relacionado a variável binária $bWAA$ e tem o objetivo de identificar se a movimentação efetuada entre acessos por um robô é entre dois acessos adjacentes, se a afirmativa for verdadeira esse termo aplica um decremento no custo desta movimentação.

$$\begin{aligned}
vCTW_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)} + nMR_w \cdot \frac{T_{movR}}{V_w} + \\
& + T_s - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRRR \\ r \in R}} bWRRR_{(w,r_1,r_2,a)} + \\
& + nMA_w \cdot \frac{T_{movA}}{V_w} - \frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \in WAA_{adj}} bWAA_{(w,a_1,a_2)} \\
& \forall w \in W, \forall s \in S
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Antes de iniciar a contagem do número de movimentações, avalia-se se um robô irá atuar ou não em uma região por um acesso. Essa decisão é controlada por duas variáveis binárias, a $bWRA$ e a bWA . A Inequação 4.5 controla se um robô efetua pontos de solda em uma região e a Inequação 4.6 controla por qual acesso o robô efetua o ponto de solda.

$$bWRA_{(w, r, a)} \geq nWRA_{(w, r, a)}/N_r \quad \forall (w, r, a) \in WRA \tag{4.5}$$

$$bWA_{(w, a)} \geq bWRA_{(w, r, a)} \quad \forall (w, r, a) \in WRA \tag{4.6}$$

Uma vez definido quais acessos e regiões são utilizados por um robô, a Equação 4.7 contabiliza o número de regiões em que cada robô atua; por sua vez, a Equação 4.8 contabiliza em quantos acessos o mesmo atua. Perceba que na contabilização o número de movimentações entre acessos e regiões é dado pela quantidade de vezes que os mesmos são utilizados, decrescido de um. Esse decremento existe pois não há movimentação entre a última região utilizada pelo robô e a primeira.

$$nMR_w = -1 + \sum_{(w, r, a) \in WRA} bWRA_{(w, r, a)} \quad \forall w \in W \tag{4.7}$$

$$nMA_w = -1 + \sum_{(w, a) \in WA} bWA_{(w, a)} \quad \forall w \in W \quad (4.8)$$

Apenas contabilizar os movimentos com o objetivo de contabilizar o tempo de ciclo levaria a uma resposta excessivamente conservadora. Desta forma, a função das adjacências é justamente decrementar esse tempo de movimentações para trajetos em que sabidamente esse tempo é menor. Para que isso ocorra o robô deve atuar nas extremidades de ambas as regiões. A Inequação 4.9 controla se um robô w tem direito a usar a adjacência entre r_1 e r_2 . De modo similar a Inequação 4.10 controla se o robô tem o direito de usar as adjacências entre acessos.

$$\begin{aligned} bWRR A_{(w, r_1, r_2, a)} &\leq bWRA_{(w, r_1, a)} && \forall (w, r_1, r_2, a) \in WRR A \\ bWRR A_{(w, r_1, r_2, a)} &\leq bWRA_{(w, r_2, a)} && \forall (w, r_1, r_2, a) \in WRR A \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} bWAA_{(w, a_1, a_2)} &\leq bWA_{(w, a_1)} && \forall (w, a_1, a_2) \in WAA \\ bWAA_{(w, a_1, a_2)} &\leq bWA_{(w, a_2)} && \forall (w, a_1, a_2) \in WAA \end{aligned} \quad (4.10)$$

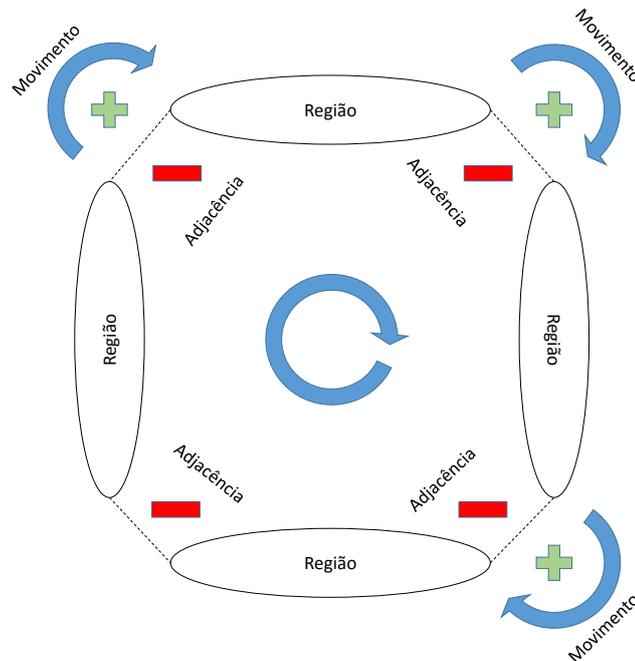
Da forma como o modelo base foi construído existe a possibilidade de que a contabilização das adjacências aconteça de forma incorreta em casos onde exista a formação de um ciclo. Um ciclo, ilustrado na Figura 4.2, ocorre quando um robô inicia suas atividade em uma região e, ao final de seu ciclo, a última região por ele acessada possui adjacência com a primeira e todas as regiões intermediárias possuem adjacências entre si.

A variável de controle de ciclos possui um conjunto de parâmetros difíceis de serem coletados. Neste sentido, para o modelo semi-simétrico essa característica foi tratada de uma forma diferente e as Inequações 4.11 e 4.12, que controlam os aspectos referentes aos ciclos de adjacências, foram retiradas do modelo base, conforme detalhado na Seção 4.2.

$$\sum_{\substack{(c, r_1) \in CR \\ (c, r_2) \in CR \\ (w, r_1, r_2, a) \in WRR A}} bWRR A_{(w, r_1, r_2, a)} \leq -1 + \sum_{(c, r) \in CR} 1 \quad (4.11)$$

$$\forall (w, c) \in WCR$$

Figura 4.2: Ilustração do ciclo de adjacências. Observe que, sem o controle de ciclo, se um robô atuar nas quatro regiões este se beneficiaria de quatro descontos de tempo oriundos do conceito de adjacência. Nessa situação o modelo contabilizaria um tempo de movimentação negativo, algo que é impossível.



Fonte: Lopes et al. (2017) adaptado

$$\sum_{\substack{(c, a_1) \in CA \\ (c, a_2) \in CA \\ (w, a_1, a_2) \in WAA}} bWAA_{(w, a_1, a_2)} \leq -1 + \sum_{(c, a) \in CA} 1 \quad \forall (w, c) \in WCA \quad (4.12)$$

Por fim, algumas limitações precisavam ser feitas em relação às adjacências. As Inequações 4.13 e 4.14 foram modeladas com esse objetivo. A primeira limita o número de usos de uma adjacência entre duas regiões a um. A segunda diz que no máximo duas adjacências podem ser utilizadas a partir de uma região. É importante ressaltar que essas restrições são aplicáveis apenas às regiões e, portanto, as adjacências entre acessos podem ser utilizadas por diversos robôs.

$$\sum_{(w, r_1, r_2, a) \in WRRR} bWRRR_{(w, r_1, r_2, a)} \leq 1 \quad \forall (r_1, r_2) \in RR \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{(w, r, r_1, a) \in WRRR} bWRRR_{(w, r, r_1, a)} + \\ + & \sum_{(w, r_2, r, a) \in WRRR} bWRRR_{(w, r_2, r, a)} \leq 2 \quad \forall (w, r, a) \in WRA \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.1.4.3 RESTRIÇÕES DE INTERFERÊNCIA

As restrições de interferência podem ser divididas em duas categorias: Restrições de cruzamento e restrições de disputa de espaço. A primeira é mais restritiva e simplesmente proíbe a existência de cruzamentos. A segunda é mais flexível e, em algumas situações específicas, permitem que os robôs trabalhem conjuntamente em um dado acesso.

O controle das interferências é diretamente restringido pela variável $bWRA$, ou seja, as variáveis binárias que controlam se haverá cruzamento ($bWCM$) ou disputa de espaço ($bWEM$) apenas estarão ativas se a região for trabalhada pelo robô, conforme apresentado nas Inequações 4.15 que limitam os cruzamentos, e as Inequações 4.16 que limitam as condições de disputa de espaço.

$$bWCM_{(w, cm)} \geq bWRA_{(w, r, a)} \quad \forall (w, r, a) \in WRA, (cm, r) \in WCM \quad (4.15)$$

$$bWEM_{(w, em)} \geq bWRA_{(w, r, a)} \quad \forall (w, r, a) \in WRA, (em, r) \in WEM \quad (4.16)$$

A restrição que realiza o controle do cruzamento dos braços dos robôs, apresentada na Inequação 4.17, foi concebida de forma a impossibilitar que dois robôs tenham operações que permitam colisão por cruzamento de braços. Ela utiliza o parâmetro $WMWM$, o qual fornece ao modelo pares de robôs e macro regiões de cruzamento que não podem efetuar atividades de modo simultâneo.

$$bWCM_{(w_1, m_1)} + bWCM_{(w_2, m_2)} \leq 1 \quad \forall (w_1, m_1, w_2, m_2) \in WMWM \quad (4.17)$$

As restrições de disputa de espaço, diferentemente das restrições de cruzamento, permitem que dois robôs trabalhem simultaneamente em um acesso do veículo, sendo sua formulação apresentada na Inequação 4.18. Basicamente, essa inequação diz que se apenas um robô atuar em um acesso, a quantidade máxima de pontos de solda factíveis para esse robô será de $U_p + D_p$. Caso dois robôs precisem atuar nesse acesso, o número de pontos de solda que cada robô poderá aplicar será apenas de U_p , sendo que, essa quantidade U_p representa um número de pontos de solda que garanta que cada robô passará menos da metade de seu tempo de ciclo útil dentro da região e, portanto, suas atividades poderão ser sequenciadas.

$$\sum_{\substack{(w, r, a) \in WRA \\ (w, s) \in WS}} nWRA_{(w, r, a)} \leq U_p - D_p \cdot \left(-1 + \sum_{(w, a) \in WA} bWA_{(w, a)} \right) \quad (4.18)$$

$$\forall a \in EA, s \in S$$

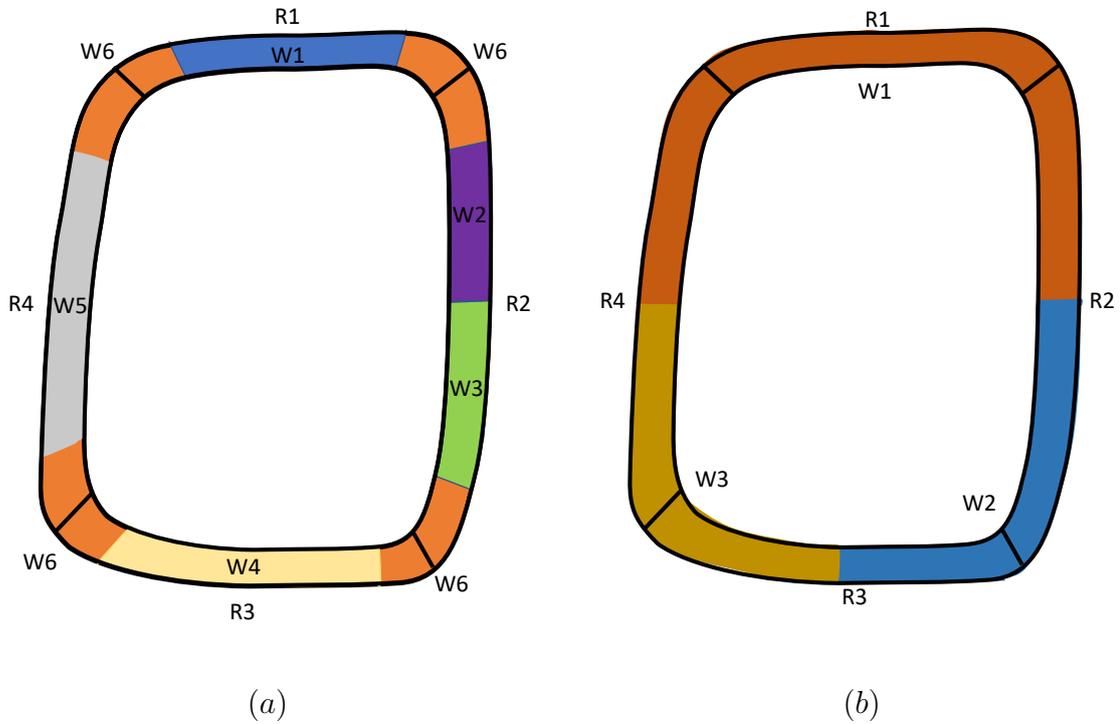
4.2 RESTRIÇÕES MODIFICADAS NO MODELO BASE

O modelo base controla as adjacências de duas formas: a primeira diz que a adjacência entre duas regiões pode ser ativada no máximo uma vez (Inequação 4.13); e a segunda diz que no máximo duas adjacências poderiam ser originadas em uma região (Inequação 4.14). Note que esse conjunto de restrições não impede que três ou mais robôs atuem em uma mesma região. Quando três ou mais robôs atuam em uma região, conforme exemplificado na Figura 4.3a, um destes robôs deve, necessariamente, realizar um movimento longo para acessar aquela região. Em alguns casos específicos isso pode levar a respostas ligeiramente melhores, porém, deixa o balanceamento contra intuitivo. Em conversas com os representantes da empresa chegou-se à conclusão que seria mais aderente à realidade operacional desejada se esse tipo de situação não acontecesse.

Para tanto, algumas restrições foram adicionadas ao modelo e algumas retiradas. A primeira restrição adicionada, a Restrição 4.19, estabelece que todo robô possui inicialmente o direito de “aproveitar” apenas uma adjacência. O mesmo ganhará direito a utilizar uma segunda adjacência apenas se ele completar todos os pontos (n) da segunda

região que ele estiver atuando, conforme exemplificado na Figura 4.3b. Observe que o robô w_1 inicia as suas operações na região R_4 e continua as operações pela região R_1 e as finaliza na região R_2 . Observe que esse robô fez uso de duas adjacências, porém, isso aconteceu apenas porque o mesmo fez todos os pontos de solda da região R_1 .

Figura 4.3: Controle de sequência dos robôs e eliminação das restrições de ciclo. A Figura a apresenta uma possível resposta para o modelo original. A Figura b apresenta o único formato de resposta possível após a incorporação das restrições apresentadas na Seção 4.2



Fonte: Autoria Própria

$$\begin{aligned}
 & \sum_{(w, r, r_1, a) \in WRRR} bWRRR_{(w, r_1, r, a)} + \\
 + & \sum_{(w, r_2, r, a) \in WRRR} bWRRR_{(w, r_2, r, a)} \leq \\
 \leq & 1 + \frac{1}{n} \cdot \sum_{(w, r, a) \in WRA} nWRA_{(w, r, a)} \\
 & \forall (w, r) \in WR
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

A segunda restrição inserida, a Inequação 4.20, diz que no máximo dois robôs podem atuar em uma região. Ela substitui a Inequação 4.14 e, juntamente com a Restrição 4.19, garante que existirá uma sequência lógica a ser seguida e que sempre que uma região tenha que ser dividida, um robô a inicie e outro a termine, conforme apresentado na Figura 4.3b. Observe que o robô w_2 assume os pontos de solda que não foram feitos pelo w_1 , completa a região e apenas após isso inicia as atividades em outra região.

$$\sum_{(w,r,a) \in WRA} bWRA \leq 2 \quad \forall r \in R \quad (4.20)$$

Após implementadas as Restrições 4.19 e 4.20 percebeu-se que as mesmas eliminam a necessidade de se considerar os ciclos, ao menos para os problemas que foram abordados. Observe que como não existia no modelo base restrições que impedissem que três robôs atuassem em uma região, conforme ilustrado na Figura 4.3a, este fato poderia acontecer. Isso possibilita que um robô, no caso apresentado o w_5 , atue em todas as regiões e, caso nenhuma adjacência do ciclo seja utilizada por outro robô, fazendo o uso de todas as adjacências. Se essa situação hipotética acontecesse existiria um fechamento de ciclo. Portanto, as considerações das Inequações 4.11 e 4.12 eram, de fato, necessárias no modelo base.

Com o conjunto de restrições apresentado nessa seção, para que um robô consiga fechar um ciclo é necessário que ele faça todos os pontos de todas as regiões que compõem o ciclo. Conforme será ilustrado *a posteriori*, para o conjunto de dados utilizados nos estudos de caso avaliados, esta seria uma condição não possível, pois há necessidade de mais de um robô para atender a todas as operações necessárias para um ciclo completo.

4.3 MODELO SEMI-SIMÉTRICO

Seguindo as diretrizes da empresa onde o estudo de caso foi desenvolvido, o próximo passo tomado foi em direção a considerar as características de simetria da linha. Deste modo, nesta seção são apresentadas as modificações feitas ao modelo base para que esse objetivo fosse atingido. É importante ressaltar que essas restrições tornam o modelo semi-simétrico menos genérico que o modelo base, tendo em vista que muitas restrições, como por exemplo as que eliminam a necessidade de ciclos (apresentada na

Seção 4.2), são válidas somente para as condições específicas consideradas. Por outro lado, as considerações realizadas tiveram por base melhor respeitar as necessidades práticas da resposta de balanceamento no estudo de caso em análise.

4.3.1 PARÂMETROS

Para o controle das restrições de simetria se faz necessário que se defina quais regiões são simétricas e quais regiões são não simétricas. Com esse objetivo, os parâmetros R_{sim} e R_{nsim} , apresentados na Tabela 4.4, foram adicionados. O parâmetro R_{sim} indica quais regiões podem ser consideradas simétricas e o parâmetro R_{nsim} indica quais regiões são assimétricas.

Tabela 4.4: Conjuntos e tuplas adicionados no modelo Semi-Simétrico.

Conjunto	Tuplas	Descrição e significado de cada conjunto de tuplas
R_{sim}	r_{sim}	Regiões que possuem um par simétrico
R_{nsim}	r_{nsim}	Regiões sem par simétrico
WRA_{INI}	(w, r, a, n)	Número de pontos de solda n que inicialmente são efetuados pelo robô w na região r pelo acesso a
$DIFF_{max}$	n	Número permitido de diferenças entre a resposta inicial e a nova distribuição de pontos de solda

A maioria das assimetrias são dadas no formato de regiões inteiras que existem de um lado do veículo e não do outro, como é o caso do tanque de combustível. Porém em alguns casos podem existir assimetrias em termos do número de pontos dentro de uma região do lado esquerdo e direito. Essas assimetrias que acontecem por diferença em número de pontos foram tratadas em uma segunda rodada (nova execução), pelo modelo completo, onde é feita uma inclusão desses pontos na resposta simétrica.

Para fazer essa inclusão dois parâmetros adicionais são usados, o primeiro WRA_{INI} carrega a resposta semi-simétrica no modelo e o segundo $DIFF_{max}$ limita a quantidade de pontos de solda que podem ser realocados da resposta original. É importante que alguns pontos possam ser realocados para garantir que essa inclusão não gere desbalanceamentos na linha, porém, se esse número for muito alto existe a possibilidade da resposta perder as características de simetria. No estudo de caso, apresentado no Capítulo 5, esse número foi utilizado como sendo a exata quantidade de pontos que deveriam ser incluídos.

4.3.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO

No que diz respeito às variáveis de decisão, o controle de simetria foi feito pelo tempo de trabalho de cada robô w . Para tanto, foram adicionadas uma variável para controlar o tempo que um robô passa em uma região simétrica ($vCTF$) e outra para controlar o tempo que o mesmo passa em uma região não simétrica ($vCTD$), conforme apresentado na Tabela 4.5. Para incluir as assimetrias oriundas de diferenças no número de pontos de regiões simétricas, a variável $nDIFF$ foi incluída para medir as diferenças entre a solução atual e a inicial.

Tabela 4.5: Variáveis adicionadas no modelo Semi-Simétrico e seus respectivos significados.

Variável	Tupla	Descrição e significado de cada variável
$vCTD$	w	Tempo de trabalho do robô w nas regiões não simétricas
$vCTF$	w	Tempo de trabalho do robô w nas regiões simétricas
$nDIFF$	(w, r, a)	Diferença em termos de número de pontos de solda que um robô w efetua em uma região r por um acesso a

4.3.3 RESTRIÇÕES

O modelo semi-simétrico precisa de duas etapas (execuções³) para garantir a correta distribuição de todos os pontos de solda. A subseção 4.3.3.1 apresenta as variáveis que controlam a interação entre as regiões simétricas e semi-simétricas. A subseção 4.3.3.2 apresenta como é feita a inclusão na resposta do modelo semi-simétrico das assimetrias entre regiões “irmãs”, ou seja, regiões que existem fisicamente em ambos os lados do veículo, porém, possuem assimetrias em relação à quantidade de pontos de solda.

4.3.3.1 RESTRIÇÕES DE SEMI-SIMETRIA

O controle de simetria foi realizado a partir do controle do tempo de ciclo de cada robô ($vCTW_w$). Basicamente, a variável $vCTW_w$, que originalmente era controlada pela Inequação 4.4, foi separada em duas outras, a $vCTD$ (Inequação 4.21), que controla

³De modo geral, a primeira execução é mais demorada, para os dados do estudo de caso a otimalidade não foi alcançada. A segunda execução é mais rápida, muitas variáveis estão fixadas, em geral, para o estudo de caso, o tempo de execução ficou abaixo de dez minutos.

as operações realizadas nas regiões não simétricas, e a $vCTF$ (Inequação 4.22), a qual controla as operações realizadas nas regiões simétricas, juntamente com os tempos de movimentação entre acessos.

O controle do tempo que um robô passa realizando operações de solda em regiões não simétricas ($vCTD$) é feito pela Inequação 4.21. O valor da variável é influenciado pelo tempo que um robô passa realizando pontos de solda dentro de uma região, adicionado do tempo de movimentação entre regiões que se encontram no mesmo acesso (T_{movR} multiplicado pela soma de movimentações entre regiões) e decrescido o tempo ganho por possíveis adjacências entre regiões (T_{adjR}).

$$\begin{aligned}
vCTD_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)} + \\
& + \frac{T_{movR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} bWRA_{(w,r,a)} - \\
& - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} bWRA_{(w,r_1,r_2,a)} \quad \forall w \in W
\end{aligned} \tag{4.21}$$

O controle do tempo que um robô passa realizando operações de solda em regiões simétricas ($vCTF$) é feito pela Inequação 4.22. O valor da variável é influenciado pelo tempo que um robô passa realizando pontos de solda dentro de uma região, adicionado do tempo de movimentação entre regiões que se encontram no mesmo acesso (T_{movR} multiplicado pela soma das movimentações entre regiões), do tempo de movimentação entre acessos (T_{movA} multiplicado pela soma das movimentações entre acessos), do tempo de preparação da estação (T_s) e decrescido do tempo ganho por possíveis adjacências utilizadas entre regiões e acessos (T_{adjR} e T_{adjA}).

Considerou-se que apenas os robôs pares⁴ podem trabalhar nas regiões simétricas ($w \bmod 2 = 0$, Expressão 4.22). Essa consideração elimina parte das soluções factíveis do modelo apresentado por Lopes et al. (2017), porém, possibilita que uma quantidade menor de robôs e pontos de solda sejam avaliados pelo modelo matemático, viabilizando a ob-

⁴Os robôs pares são todos os robôs alocados ao lado direito da linha produtiva, conforme ilustrado na Figura 1.2.

tenção de respostas práticas de boa qualidade em um tempo computacional relativamente menor, conforme será detalhado na Seção 5.2.

$$\begin{aligned}
vCTF_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{sim}}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)} \\
& + \frac{T_{movR}}{V_w} \cdot \left(\sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{sim}}} bWR_{(w,r,a)} - 1 \right) + \\
& + T_s - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRRA \\ r \in R_{sim}}} bWRRA_{(w,r_1,r_2,a)} + \\
& + T_{movA} \cdot \frac{nMA_w}{V_w} - \frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \in WAA_{adj}} bWAA_{(w,a_1,a_2)} \\
& \forall s \in S, \forall w \in W \mid w \bmod 2 = 0
\end{aligned} \tag{4.22}$$

As operações feitas na região simétrica pelos robôs do lado esquerdo não são consideradas pela Inequação 4.22. No entanto, para a resposta ser consistente e implementável, o tempo que esses robôs precisam para trabalhar nessas regiões deve ser considerado. Portanto, na Equação 4.23 é explicitado que o tempo que um robô do lado esquerdo passa realizando operações na região simétrica deve ser igual ao tempo que um robô do lado direito faz isso.

$$vCTF_w = vCTF_{w+1} \quad \forall w \in W \mid w \bmod 2 = 1 \tag{4.23}$$

O tempo de ciclo completo de cada robô é controlado pela Equação 4.24 e é dado pelo tempo de todas as operações que um robô faz fora da região simétrica, adicionado ao tempo que ele passa trabalhando na região não simétrica. De modo complementar, a Inequação 4.25 impõem que o tempo de ciclo da linha é diretamente influenciado pelo robô com maior valor de $vCTW$, identicamente ao que acontece no modelo Base.

$$vCTW_w = vCTF_w + vCTD_w \quad \forall w \in W \quad (4.24)$$

$$vCT \geq vCTW_w \quad \forall w \in W \quad (4.25)$$

4.3.3.2 RESTRIÇÕES DE INCLUSÃO DE ASSIMETRIAS

A inclusão das Restrições 4.21 a 4.25 são o suficiente para controlar as condições de simetria da linha. Contudo, estas restrições não conseguem lidar com possíveis assimetrias geradas por (pequenas) diferenças dentro das regiões que foram consideradas simétricas, porém possuíam um número de pontos de solda ligeiramente diferente do encontrado em sua região irmã. O modelo simétrico possui a capacidade de trabalhar apenas com regiões simétricas irmãs que possuam exatamente o mesmo número de pontos de solda. Deste modo, para fazer a inclusão dos pontos faltantes foi utilizado o modelo base, acrescido de algumas restrições.

A Equação 4.26 faz o controle da diferença em número de pontos de solda entre a resposta inicial WRA_{INI} e a resposta atual $nWRA_{(w,r,a)}$. O somatório dessas diferenças é então controlado pela Inequação 4.27 que restringe o número de mudanças na solução inicial a $DIFF_{max}$.

$$nDIFF_{(w,r,a)} = n - nWRA_{(w,r,a)} \quad \forall (w, r, a, n) \in WRA_{INI} \quad (4.26)$$

$$DIFF_{max} \geq \sum_{(w,r,a) \in WRA_{INI}} nDIFF_{(w,r,a)} \quad (4.27)$$

4.3.4 MODELO SEMI-SIMÉTRICO: FUNÇÃO OBJETIVO

Para o estudo de caso realizado, a quantidade de robôs e o número total de pontos de solda que devem ser realizados são conhecidos. Então, o objetivo do modelo é minimizar o tempo de ciclo da linha, o que pode ser obtido minimizando o tempo de ciclo do robô mais carregado, conforme descrito na Equação 4.1.

4.4 MODELO DE BALANCEAMENTO TEMPORÁRIO

Conforme detalhado no Capítulo 3 há necessidade de se avaliar uma condição de balanceamento temporário, na qual alguns robôs da linha são substituídos por outros mais recentes (vide Figura 3.1), mas com acessibilidade equivalente ao dos antigos. Nesta condição temporária, deve ocorrer o remanejamento dos pontos de solda dos robôs em substituição para os demais robôs em operação, comprometendo-se o mínimo possível as questões de balanceamento da linha.

A programação dos robôs que permanecem na linha deve ser realizada em paralelo às atividades já existentes. Foi neste contexto que surgiu a ideia de agregar ao modelo base um conjunto de restrições que permitissem que pontos de solda fossem adicionados a uma distribuição já existente de pontos, sem que esta fosse alterada.

Nas Subseção 4.4.1 são apresentados os parâmetros e restrição adicionados ao modelo Semi-Simétrico para abordar esse problema.

4.4.1 PARÂMETROS E RESTRIÇÃO

Para o modelo de balanceamento temporário o conjunto WRA_{fix} foi adicionado, o qual é definido em função da tupla (w, r, a, n) . Esse conjunto informa ao modelo o número de pontos de solda n que cada robô w aplica em uma região r pelo acesso a . Ou seja, define-se um parâmetro de entrada n para cada diferente combinação (w, r, a) contida em WRA_{fix} .

Com a informação de quais pontos de solda deveriam ser fixados, a restrição que faz esse controle simplesmente impõe que o número de pontos de solda realizados por cada robô em cada região por cada acesso deve ser igual ao número da solução inicial, conforme Equação 4.28. Essa restrição é adicionada ao modelo semi-simétrico e trata-se de uma simplificação das restrições apresentadas na Seção 4.3.3.2. Observe que esta restrição realiza o que as restrições 4.26 e 4.27 fazem, porém para um $DIFF_{max}$ igual a zero.

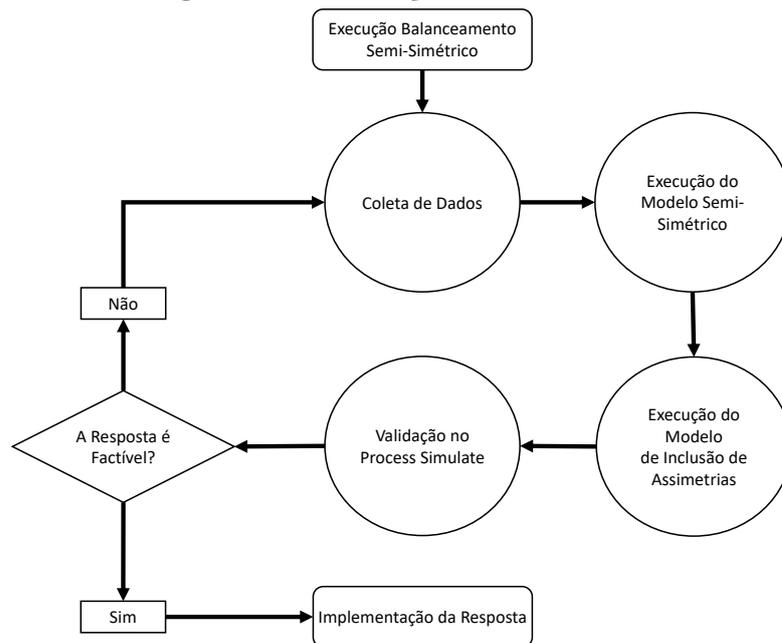
$$n \leq nWRA_{(w,r,a)} \quad \forall (w, r, a, n) \in WRA_{fix} \quad (4.28)$$

Com a inclusão da restrição 4.28, a quantidade de robôs e o número total de pontos de solda que devem ser realizados continua conhecido. Então, o objetivo do modelo é minimizar o tempo de ciclo da linha, o que pode ser obtido minimizando o tempo de ciclo do robô mais carregado, conforme descrito na Equação 4.1.

4.5 MODELAGENS EM ANÁLISE

A Tabela 4.6 a seguir resume os modelos matemáticos avaliados no presente trabalho. O símbolo “✓” indica que uma expressão específica é utilizada, enquanto um “-” indica a ausência da mesma. De modo complementar, a Figura 4.4 indica o diagrama de execução do Modelo Semi-Simétrico.

Figura 4.4: Diagrama de execução do modelo semi-simétrico.



Fonte: Autoria Própria

No diagrama de execução pode ser observado que a utilização completa do modelo Semi-Simétrico está atrelada a quatro ações básicas: Coleta de dados; Execução do Modelo Semi-Simétrico; Incorporação de possíveis assimetrias à resposta previamente encontrada; e validação da resposta no *software* de Simulação 3D Siemens Process Simulate (Siemens, 2019). Ao final destas quatro ações uma decisão deve ser tomada. Se a

Tabela 4.6: Resumo do uso das expressões por cada modelo apresentado.

Expressão	Modelo			
	Base	Semi-Simétrico	Inclusão	Temporário
4.1	✓	✓	✓	✓
4.2	✓	✓	✓	✓
4.3	✓	✓	✓	✓
4.4	✓	-	✓	✓
4.5	✓	✓	✓	✓
4.6	✓	✓	✓	✓
4.7	✓	✓	✓	✓
4.8	✓	✓	✓	✓
4.9	✓	✓	✓	✓
4.10	✓	✓	✓	✓
4.11	✓	-	-	-
4.12	✓	-	-	-
4.13	✓	✓	✓	✓
4.14	✓	-	-	-
4.15	✓	✓	✓	✓
4.16	✓	✓	✓	✓
4.17	✓	✓	✓	✓
4.18	✓	✓	✓	✓
4.19	-	✓	✓	✓
4.20	-	✓	✓	✓
4.21	-	✓	-	-
4.22	-	✓	-	-
4.23	-	✓	-	-
4.24	-	✓	-	-
4.25	-	✓	-	-
4.26	-	-	✓	-
4.27	-	-	✓	-
4.28	-	-	-	✓

resposta for factível deve-se buscar a implementação da mesma. Caso contrário, deve-se verificar por incoerências no conjunto de dados que levaram a restrições práticas não serem incorporadas no modelo matemático.

O Modelo Base e o Modelo de Balanceamento Temporário demandam apenas execuções simples dos mesmos. Isso tem origem no fato destes não precisarem respeitar condições de simetria. Portanto, não existe a necessidade de rebalancear assimetrias.

O Capítulo 5 a seguir utiliza as formulações sumarizadas na Tabela 4.6 para a realização de estudos de caso na indústria de manufatura em análise.

5 ESTUDO DE CASO

Esse Capítulo é organizado da seguinte forma: Na Seção 5.1 é apresentado como os dados foram coletados, os critérios para a formulação das regiões, acessos, acessibilidades, parâmetros temporais e informações relacionadas às interferências; Na Seção 5.2 são apresentados os resultados obtidos.

5.1 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Dentro do contexto fabril em análise, a forma comumente usada para o balanceamento de pontos de solda de um novo veículo é avaliar o que os robôs faziam nos veículos anteriores e utilizar a solução mais próxima possível da condição já existente. Tal medida não é necessariamente eficiente, pois muito dos vícios existentes no balanceamento do veículo original são transmitidos para o novo veículo. O modelo matemático proposto no Capítulo 4 é uma possível solução para esse problema, porém, para utilizá-lo é necessário que os dados de acessibilidade, alocação dos robôs, interferências, movimentações, propriedades dos robôs e propriedades das tarefas sejam coletados.

5.1.1 REGIÕES, ACESSOS E ACESSIBILIDADE

A definição das tarefas que devem ser feitas na seção final da linha de carroceria ocorre do seguinte modo: esse setor da linha absorve todos os pontos que não puderam ser realizados durante a fase de união das peças, fixação da geometria do veículo. Durante a definição de quais pontos irão para a Finição¹, são feitas apenas duas verificações: Se algum robô é capaz de realizar o ponto de solda; Se é pertinente para os outros setores

¹Finição é um jargão comumente utilizado na empresa em análise para referir-se ao setor final da carroceria.

da linha que esse ponto seja feito na Finição.

De modo geral, as áreas dos veículos que são soldadas na Finição não oscilam tanto entre os diferentes modelos de veículos, ou seja, tendem a ser feitos nesse setor os pontos que complementam a integridade estrutural das portas, para-brisa, porta-malas e outras regiões periféricas do veículo. Essas semelhanças entre os modelos faz com que seja comum, na empresa em análise, que as atividades do novo veículo sejam muito similares às dos veículos que já são produzidos pela linha. Esse método acaba por replicar vícios de processo, existentes nos modelos em produção, para o novo modelo e, portanto, deve ser usado com cautela.

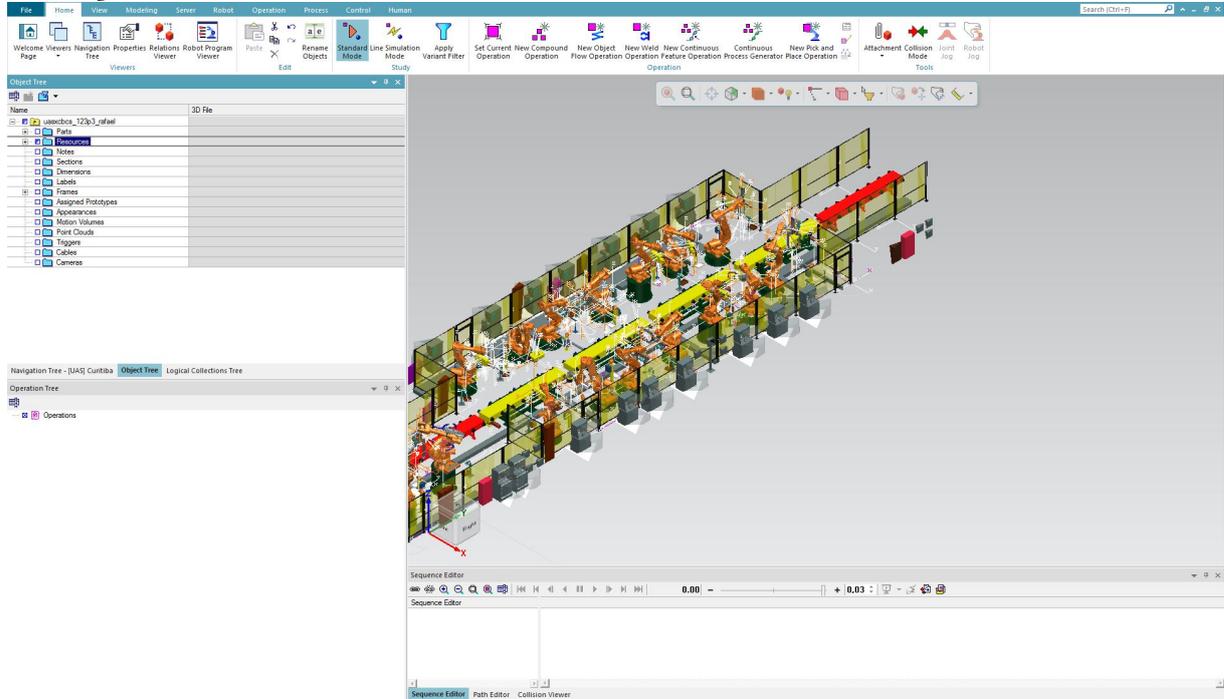
Apesar dos possíveis problemas, o método apresentado no parágrafo anterior foi o ponto de partida para a resolução dos problemas. O conhecimento do que já era feito pela linha permitiu que a fase de criação das regiões e acessos fosse mais intuitiva. Porém, o uso de um *software* de simulação 3D, ilustrado na Figura 5.1, chamado Siemens Process Simulate (Siemens, 2019) foi necessário para validar as regiões criadas.

O Process Simulate permitiu a verificação da capacidade de cada robô de acessar cada ponto de solda. Deste modo, durante esse processo foram encontradas as regiões, ilustradas na Figura 5.2, que cada robô tem a capacidade de trabalhar. É possível observar na Figura 5.2 que o robô 1 tem a capacidade de acessar as zonas verticais e parte das zonas horizontais do acesso; o robô 2 tem a capacidade de atuar nas zonas horizontais e em parte das zonas verticais. A divisão final de regiões pode ser definida por meio das intersecções das capacidades de ambos os robôs. No caso em análise na Figura 5.2, oito regiões foram identificadas.

Durante a etapa de definição das regiões uma das principais vantagens do modelo semi-simétrico pôde ser observada. Como o modelo faz uso de conceitos de simetria, para todas as regiões completamente simétricas, apenas os dados dos robôs do lado direito precisaram ser coletados. Isto poupou uma quantidade considerável de tempo, durante a etapa de coleta de dados.

A Figura 5.2 também ilustra o conceito de adjacência. Observe que existe uma continuação lógica entre uma região subsequente e outra, por exemplo, se um robô atuar na região 1 e 2, a passagem dele por essas regiões acontece de forma fluida, como se essas regiões fossem apenas uma.

Figura 5.1: Ilustração do *software* de simulação 3D utilizado na etapa de coleta e validação dos dados.



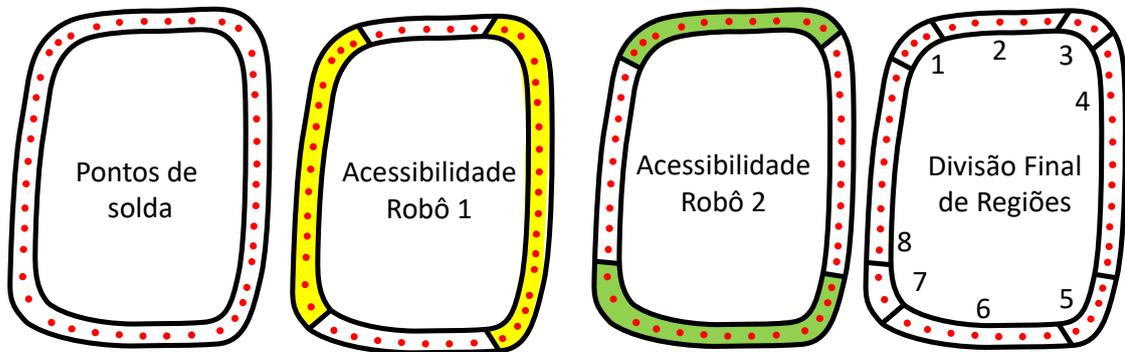
Fonte: Siemens

O veículo estudado compartilha a estrutura básica dos demais veículos que passam pela linha, ou seja, ele possui quatro portas, porta-malas, para-brisa, caixa de ar, para-choques e, como exceção para esse veículo, uma janela menor entre o porta malas e a porta traseira. A divisão dos acessos do veículo foi feita conforme o ilustrado na Figura 5.3, a qual evidencia a existência de sete acessos em cada um dos lados observados.

A união das regiões e dos acessos fornecem as bases para o controle de semi-simetria. Tal controle é feito no modelo matemático pela pré-definição de quais regiões devem ser consideradas simétricas ou não. Foram incluídas como regiões não simétricas todas as regiões que compõem o acesso ao porta-malas, acesso 7 da Figura 5.3, assim como algumas assimetrias em relação à existência ou não de pontos, como por exemplo, o tanque de combustível que está incluso no acesso 6.

O porta malas não pode ser considerado simétrico devido a restrições geométricas. De modo complementar, diferentemente do para-brisa, o porta malas conta com

Figura 5.2: Processo de criação de regiões para os robôs 1 e 2 e divisão final das regiões.



Fonte: Autoria Própria

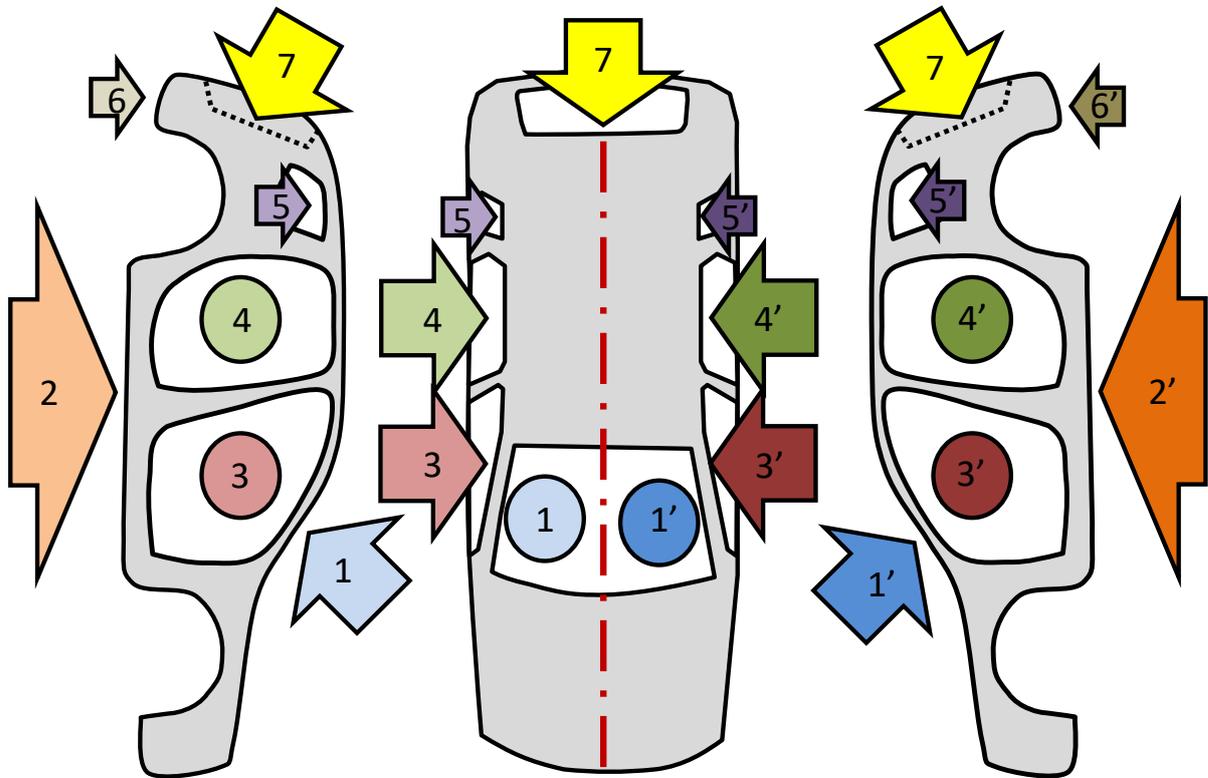
menos espaço para os robôs realizarem suas operações. Portanto, existe a necessidade de se introduzir as restrições de interferência nesse acesso.

O conceito de acessos além de ser essencial para a definição das acessibilidades dos robôs, também o é para o correto controle das movimentações. O tempo necessário para que um robô se movimente entre duas regiões em um mesmo acesso será menor do que se essas regiões estivessem em acessos distintos. O número de acessos que um robô utiliza durante seu ciclo influencia no número de movimentos que os mesmos efetuam.

Um dos problemas encontrados na contagem de acessos reside no fato de que o tempo de movimentação entre os mesmos não é constante. Por exemplo, robôs que atuam na parte lateral inferior do veículo levam menos tempo para se movimentar para a região do porta-malas do que se esse robô iniciasse a movimentação nas portas. A distância euclidiana entre os dois pontos é similar, porém, quando o robô tem como origem a porta, o mesmo precisa de um cuidado maior para se distanciar desse acesso do que se o mesmo iniciasse o movimento na parte lateral inferior traseira do veículo, o que influencia no tempo necessário para a movimentação.

Para fazer um controle mais refinado das movimentações, adjacências entre acessos foram definidas com base em observações empíricas. A Figura 5.4 apresenta o mapa de adjacências entre as partes do veículo pelas ligações entre os acessos. No estudo realizado,

Figura 5.3: Definição da divisão do veículo em acessos.



Fonte: Autoria Própria

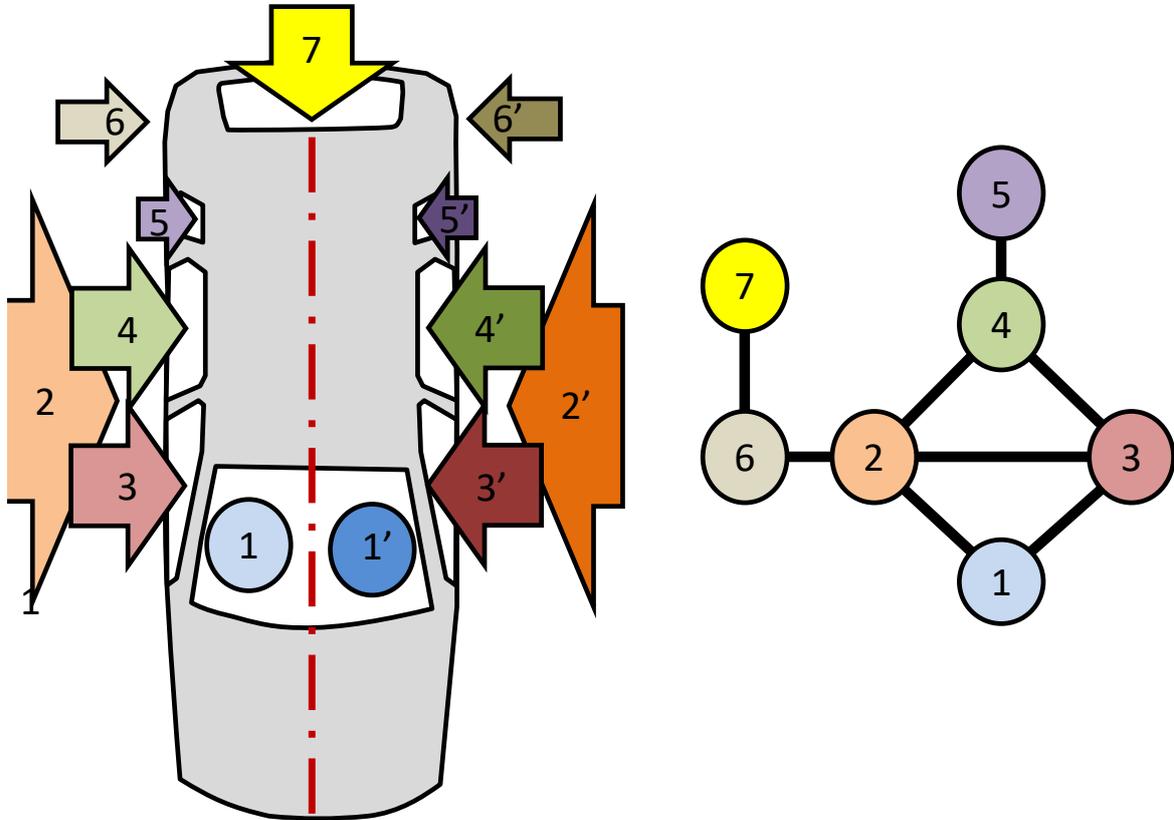
verificou-se, por exemplo, que o acesso 2 possui adjacência com os acessos 1, 3, 4 e 6. Ou seja, quando um robô realiza operações pelo acesso 2 ele poderia realizar deslocamentos para esses acessos em um tempo menor do que se essa movimentação fosse realizada para os acessos 5 ou 7.

Alguns robôs possuem capacidade de movimento reduzida por conta da ferramenta de solda instalada. Esses casos são tratados como exceções à regra pelo uso de tuplas (w, r_1, r_2) e (w, a_1, a_2) onde informa-se que o robô w não tem direito de fazer uso das adjacências entre as regiões r_1 e r_2 ou dos acessos a_1 e a_2 .

5.1.2 PARÂMETROS DE TEMPO

Os parâmetros temporais formam um conjunto de dados que podem influenciar de modo decisivo as decisões sugeridas pelo modelo matemático. Devido às escolhas de

Figura 5.4: Definição das adjacências entre acessos do veículo.



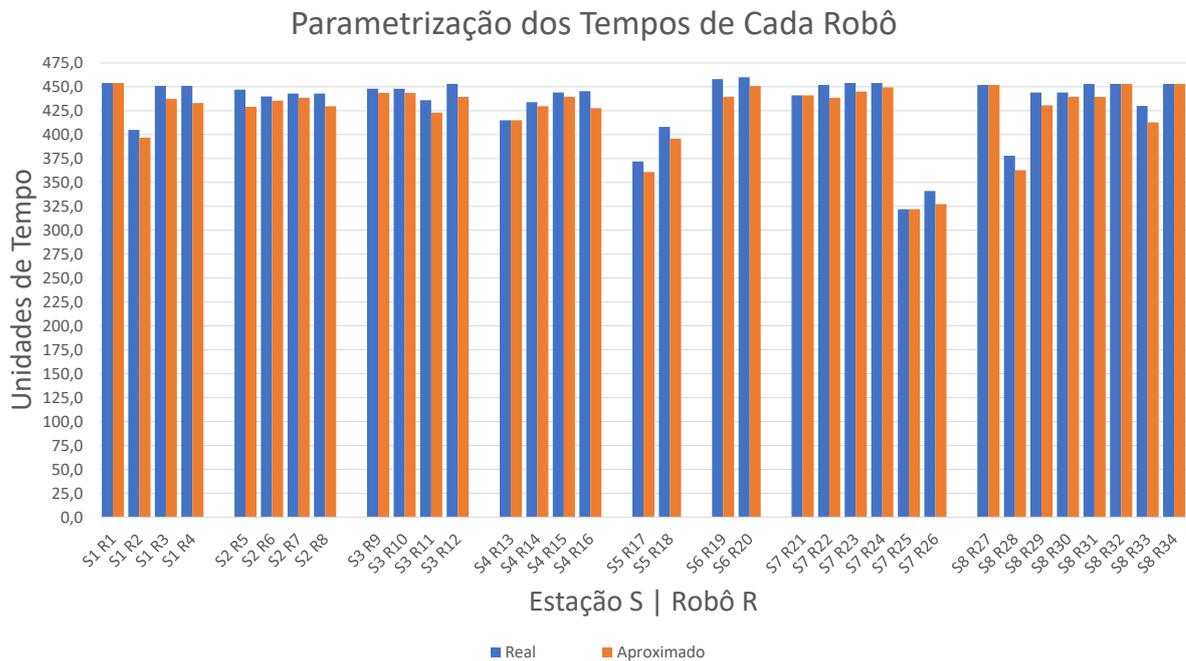
Fonte: Autoria Própria

modelagem, o controle dos tempos é feito a partir da contagem de movimentos, onde cada movimento utiliza uma quantidade de tempo dada por um parâmetro discreto. Portanto, a forma como esses dados são coletados influencia diretamente se a resposta do modelo matemático estará próxima da realidade ou não.

Para a determinação dos parâmetros de tempo, foram realizadas filmagens do modelo de veículo com a geometria mais próxima do novo veículo a ser balanceado. A partir das filmagens, foi estimado o tempo de cada tipo de operação, assim como o tempo de ciclo de cada robô da linha. Os dados coletados foram inseridos no modelo e a resposta de tempo de ciclo de cada robô dada pelo modelo foi comparada aos dados reais. Os parâmetros temporais foram refinados até o ponto onde o tempo de ciclo de saída do modelo matemático, com a mesma distribuição de pontos do modelo real, apresentasse uma resposta ligeiramente conservadora (ou no máximo igual) quando comparada ao

tempo de ciclo real obtido pelas filmagens. A Figura 5.5 ilustra os resultados obtidos após o refino dos parâmetros de tempo para cada um dos 34 robôs. Note que os tempos de ciclo, em unidades de tempo² obtidos pelo modelo matemático ficaram ligeiramente inferiores aos observados pelas filmagens.

Figura 5.5: Resultados obtidos após o refino dos parâmetros de tempo. Os tempos obtidos pelo modelo matemático ficaram ligeiramente inferiores aos observados pelas filmagens.



Fonte: Autoria Própria

5.1.3 INTERFERÊNCIAS

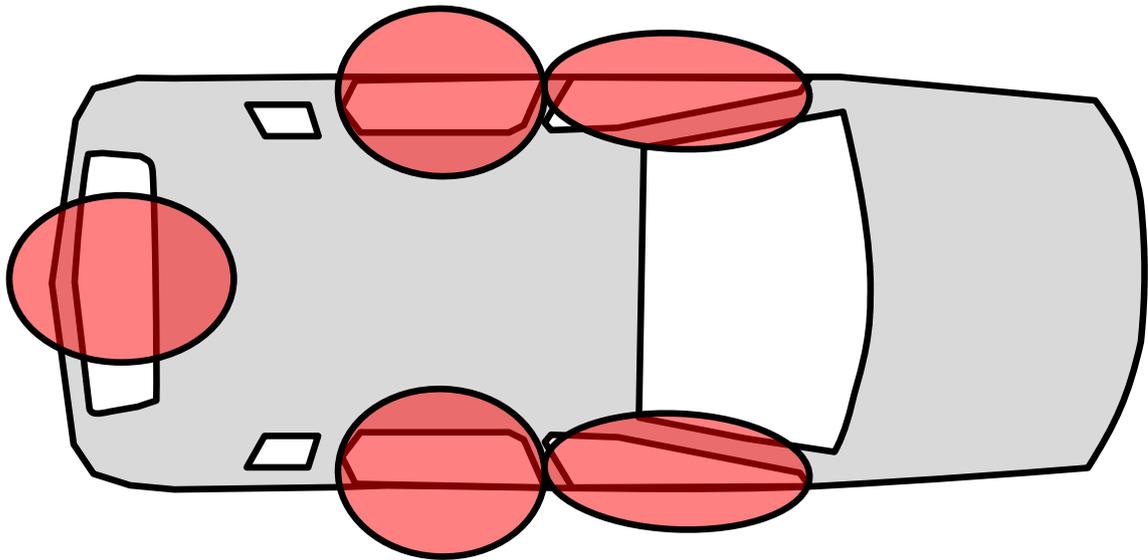
As considerações de interferência são outro conjunto de parâmetros que devem ser refinados com cautela. Por um lado, tais considerações devem buscar eliminar a possibilidade de que o modelo gere uma resposta que ocasione colisões entre robôs. Por outro lado, de forma a possibilitar que o modelo matemático possa obter a melhor resposta possível, é necessário dar-lhe opções de escolha. Ou seja, uma entrada de parâmetros que

²Os valores temporais são apresentados em unidades de tempo (u.t.) para não expor os valores reais da empresa, mas mantém a correspondência aos valores reais.

proíba todas as possibilidades de interferências pode retirar condições operacionais viáveis e que conduziriam a respostas práticas de qualidade. Trata-se de dois objetivos opostos e encontrar o correto ponto de equilíbrio representa um desafio.

O processo de definição das regiões de interferência foi realizado empiricamente levando-se em consideração os aspectos geométricos da linha. A Figura 5.6 ilustra as regiões de interferência observadas. Note que as interferências estão localizadas principalmente nas portas e porta-malas.

Figura 5.6: Figura ilustrando as regiões de interferência encontradas. Observe que as interferências se concentram nas portas e porta-malas.



Fonte: Autoria Própria

Conforme anteriormente mencionado, as interferências também influenciam na determinação das regiões simétricas e não simétricas. O porta-malas e o para-brisa são regiões localizadas nas extremidades do veículo. Porém, a região do para-brisa conta com muito mais espaço para que os robôs efetuem os pontos de solda. Portanto, o para-brisa foi separado em dois acessos distintos e o robô do lado direito atua no acesso deste lado e o do esquerdo atua no acesso esquerdo. Deste modo, as considerações de interferência puderam ser ignoradas.

Para o porta-malas a situação é um pouco diferente, o acesso é menor e um robô localizado no lado esquerdo do veículo muitas vezes consegue atuar apenas no lado direito do mesmo. Portanto, o porta-malas representa apenas um acesso e as condições de exclusão foram utilizadas.

5.2 RESULTADOS

Durante o desenvolvimento do trabalho três vertentes foram abordadas. A primeira busca avaliar como o modelo semi-simétrico se comporta quando comparado ao modelo completo; essa vertente será discutida na Seção 5.2.1. A segunda abordou o problema de balanceamento do novo modelo de veículo e será tratada na Seção 5.2.2. Por fim, a terceira vertente aborda um problema de balanceamento temporário e será mais profundamente tratada na Seção 5.2.3.

O problema foi modelado no ambiente de modelagem e otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM, 2019), instalado em um computador com o processador *Intel core i7-8700 (3.2GHz)* e *32 Gigabytes* de memória *RAM*.

Várias instâncias do modelo foram testadas por meio do *solver* CPLEX, o qual de fato é executado para a resolução do equacionamento gerado em cada instância. Em particular, adotou-se uma ênfase do processo de busca específica (ênfase 4 do *solver*), a qual tem o objetivo de priorizar a busca por soluções factíveis ocultas. De modo a fazer uma comparação entre o modelo base e o modelo semi-simétrico, dez instâncias, de cada um dos modelos avaliados, foram executadas por um período de até 3600 segundos cada.

5.2.1 MODELO BASE *VERSUS* MODELO SEMI-SIMÉTRICO

Para avaliar o modelo semi-simétrico optou-se por criar dez instâncias baseadas no caso real. Foi criada uma instância com 10% dos pontos do caso real, outra com 20%, 30% e subsequentemente até 100% dos pontos presentes no caso real. O objetivo deste teste é obter respostas similares ao do modelo original e verificar como o modelo semi-simétrico se comporta do ponto de vista de esforço computacional.

Os resultados das instâncias são apresentados na Tabela 5.1. De modo complementar a Tabela 5.2 apresenta a dimensão dos modelos matemáticos gerados (número de

Tabela 5.1: Tabela comparativa dos limites superiores (LS), inferiores (LI) e de tempo de resposta encontrados entre o modelo completo e o modelo semi-simétrico.

Instância	Modelo Completo				Modelo Semi-Simétrico			
	LS	LI	Gap	Tempo (s)	LS	LI	Gap	Tempo (s)
10%	191	191	0%	0.204	191	191	0%	0.141
20%	211	211	0%	1.547	211	211	0%	0.422
30%	264	263	0.38%	3600.391	263	263	0%	6.297
40%	275	271	1.45%	3603.047	272	272	0%	1060.438
50%	322	312	3.11%	3603.656	317	312	1.58%	3614.984
60%	340	326	4.12%	3600.219	332	326	1.81%	3607.172
70%	363	352	3.03%	3602.359	354	352	0.56%	3605.063
80%	395	372	5.92%	3600.094	390	377	3.31%	3603.375
90%	435	405	6.92%	3603.468	427	410	3.98%	3602.813
100%	444	419	5.72%	3604.046	444	424	4.56%	3603.469

variáveis e restrições).

Na Tabela 5.1 é possível observar que o modelo semi-simétrico obteve respostas iguais ou melhores em todas as instâncias testadas (comparando-se as colunas do limite superior - LS). Para as instâncias 10% e 20%, ambos os modelos conseguiram chegar na resposta ótima; o modelo semi-simétrico obteve o valor ótimo em um tempo computacional menor para os referidos casos. Em todas as outras instâncias o modelo semi-simétrico obteve limites superiores menores ou iguais aos do modelo completo e limites inferiores (LI) iguais ou maiores do que o mesmo. Deste modo, o *gap* de integralidade (coluna Gap) do modelo semi-simétrico foi igual ou menor do que o apresentado pelo modelo completo, indicando uma maior proximidade de prova da otimalidade da solução, ou mesmo provando a referida otimalidade (Gap igual a 0%) nas instâncias 30% e 40%.

Conforme dados da Tabela 5.2, tal comportamento de melhor convergência computacional do modelo semi-simétrico é provavelmente um reflexo da diminuição do espaço de busca do referido modelo em relação ao modelo completo, função dos parâmetros adicionais considerados para impor condições de simetria, que reduziram o número de regiões consideradas pelo modelo. Em relação ao número de variáveis e restrições, o modelo semi-simétrico apresenta, quando comparado ao modelo completo, 30% menos restrições (ΔR) e 34% menos variáveis (ΔV), conforme apresentado na Tabela 5.2.

A Tabela 5.2 evidencia que o conjunto de variáveis e restrições dos modelos ma-

Tabela 5.2: Tabela comparativa do modelo completo com o modelo semi-simétrico em relação ao número de variáveis e restrições.

Instância	Completo		Semi-Simétrico		Diferença	
	Restrição	Variável	Restrição	Variável	ΔR (%)	ΔV (%)
10%	3690	935	2915	680	21.00%	27.27%
20%	5031	1503	3637	1024	27.71%	31.87%
30%	5760	1811	4004	1192	30.49%	34.18%
40%	5760	1811	4004	1192	30.49%	34.18%
50%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
60%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
70%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
80%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
90%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
100%	6024	1927	4136	1254	31.34%	34.92%
Média	5638.5	1762.2	3937.6	1161.2	29.77%	33.70%

temáticos analisados está diretamente ligado à existência ou não de pontos de solda em uma região. Conforme os conjuntos de pontos de solda foram sendo proporcionalmente reduzidos, naturalmente foram obtidas algumas regiões com números de pontos de solda não inteiros. Logo, durante o processo de aproximação dos dados, todas as regiões que continham um número de pontos de solda superior a 0.5 foram contabilizados como possuindo 1 ponto. Esse fato levou a uma não redução no número de restrições em regiões com mais de 50% dos pontos de solda. Ou seja, mesmo as regiões que continham apenas um ponto de solda no conjunto de dados só deixaram de existir quando o tamanho do conjunto caiu abaixo de 50%.

De modo complementar aos resultados apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, a instância com 100% dos dados foi também executada por um tempo maior, 14400 segundos, com o intuito de avaliar a qualidade da resposta em tempos maiores. Ao final das 4 horas de execução computacional, no caso do modelo completo observou-se um *gap* de integralidade de 5.61%. Isso representa uma melhoria de apenas 0.11% na qualidade da resposta em relação ao *gap* de integralidade de 5.72% originalmente obtido em 1 hora de execução. Deste modo, evidencia-se que o modelo matemático possui dificuldade de convergência, mesmo se um maior tempo computacional for disponibilizado. Comportamento similar também foi observado para o modelo semi-simétrico, com uma melhoria de

apenas 0.28% na qualidade da resposta após 10200 segundos de execução computacional³.

5.2.2 MODELO SEMI-SIMÉTRICO: ESTUDO DE CASO

Após verificar-se que os dados estavam corretamente parametrizados e que a formulação do modelo semi-simétrico apresentava respostas coerentes em relação ao modelo base (Seção 5.2.1), seguiu-se o estudo de caso com o uso do modelo semi-simétrico. O referido modelo foi aplicado com o objetivo de, sempre que possível, estabelecer uma resposta de balanceamento em que as características de simetria da linha fossem respeitadas. Duas abordagens para execução do modelo semi-simétrico foram avaliadas, sendo a segunda a adotada para a consecução do projeto.

5.2.2.1 MODELO SEMI-SIMÉTRICO: ABORDAGEM 1

A primeira abordagem avaliada levava em conta as questões de assimetria por diferenças de pontos de solda entre regiões bastante similares ou “quase-simétricas”. Utilizava-se o maior número de pontos entre as duas regiões no conjunto de dados de entrada do modelo matemático. As assimetrias são inseridas em um pós-processamento manual, retirando das respostas todas as tarefas que foram inseridas para garantir a simetria dos conjuntos de entrada. Os conjuntos de entrada das Tabelas 5.1 e 5.2 foram gerados utilizando-se dessa configuração. As respostas do modelo semi-simétrico, com as assimetrias inseridas de modo manual podem ser observadas na Tabela 5.3, coluna “Simétrico Manual”.

5.2.2.2 MODELO SEMI-SIMÉTRICO: ABORDAGEM 2

A segunda abordagem proposta para o modelo semi-simétrico endereça as assimetrias por meio de identificação de pares de regiões simétricas. Inclui-se no conjunto de entrada o número de tarefas comuns, observando-se a região com menor número de pontos. Posteriormente, com o uso de um modelo matemático de inclusão de assimetrias (vide seção 4.3.3.2), realizam-se as inclusões assimétricas necessárias. O diagrama apresentado na Figura 4.4 ilustra o referido fluxo de execução.

³Falhas de execução do *solver* ocorreram na tentativa de execuções com tempos superiores ao apresentado.

Durante o processo de inclusão de assimetrias, uma das entradas do modelo limita o impacto dessas inclusões na resposta inicial. Considere-se que, se muitas inclusões forem necessárias, a qualidade do balanceamento obtido pode ser consideravelmente degenerada. Durante este estudo de caso duas hipóteses foram utilizadas para este quesito de inclusões na resposta inicial. Na primeira, as mudanças permitidas correspondem à exatamente o número de tarefas que devem ser incluídas, aproximadamente 3% do número total de tarefas. Na segunda, as mudanças permitidas correspondem ao dobro do utilizado no primeiro caso, aproximadamente 6% do número total de tarefas. Ambos os resultados podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Compilação das respostas de tempo de ciclo (em u.t.) das diversas condições de balanceamento testadas.

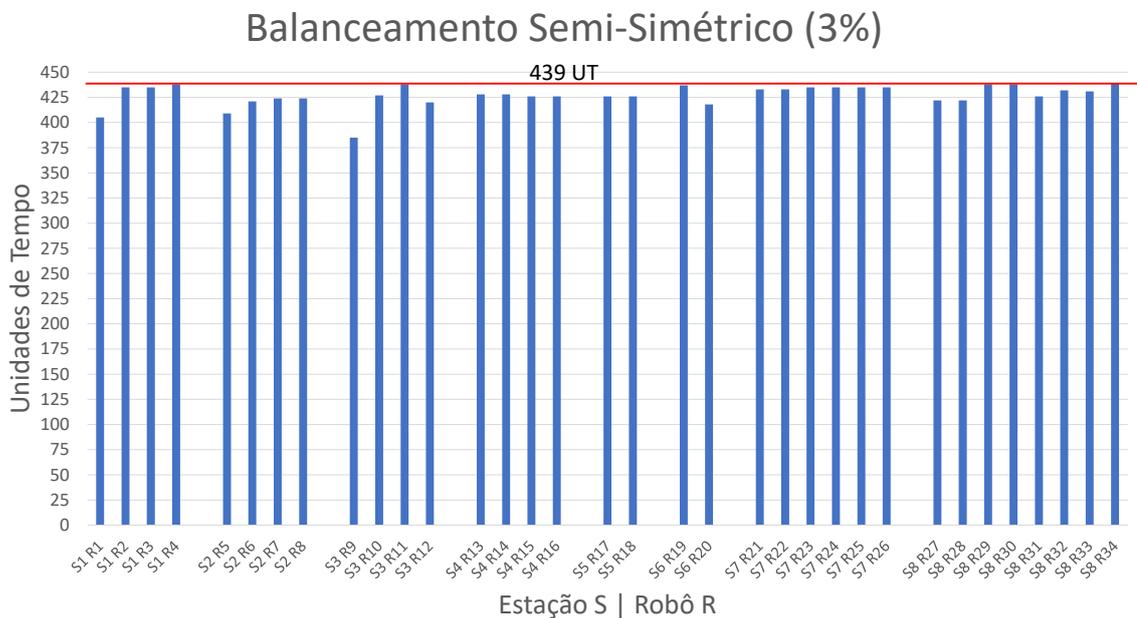
	Completo	Simétrico (3%)	Simétrico (6%)	Simétrico Manual
S1R01	405	405	405	435
S1R02	405	435	405	435
S1R03	424	435	433	444
S1R04	408	438	414	444
S2R05	426	409	409	420
S2R06	433	421	433	441
S2R07	424	424	424	443
S2R08	424	424	424	424
S3R09	406	385	406	415
S3R10	427	427	427	427
S3R11	408	438	438	438
S3R12	390	420	420	420
S4R13	426	428	428	430
S4R14	430	428	428	444
S4R15	426	426	426	426
S4R16	426	426	426	408
S5R17	428	426	426	444
S5R18	426	426	426	444
S6R19	425	437	437	444
S6R20	426	418	437	444
S7R21	435	433	433	441
S7R22	422	433	422	433
S7R23	423	435	435	435
S7R24	435	435	435	435
S7R25	427	435	435	438
S7R26	427	435	416	438
S8R27	433	422	422	425
S8R28	378	422	422	433
S8R29	438	438	438	420
S8R30	438	438	438	438
S8R31	432	426	426	441
S8R32	432	432	432	441
S8R33	431	431	431	431
S8R34	389	439	438	431
TC (u.t.)	438	439	438	444

Quando comparados aos resultados do modelo completo, também apresentados

na Tabela 5.3, observa-se que a metodologia de pós inclusão das assimetrias, descrita na presente subseção, produz respostas mais próximas ao modelo completo e, por esse motivo, essa foi a metodologia abordada no decorrer dos desenvolvimentos e não a apresentada na subseção 5.2.2.1.

Quando a comparação é feita entre as respostas com 3% e 6% de impacto sobre a resposta original, observa-se que a com 6% possui resultados iguais aos encontrados pelo modelo completo, enquanto a resposta com 3% obteve um tempo de ciclo 0.2% superior. Em uma avaliação prática das respostas com 3% e 6%, chegou-se à conclusão que diferença no tempo de ciclo da resposta com impacto de 6% era pouco significativa, e não justificava o impacto causado na simetria da resposta obtida. Portanto, a resposta final escolhida para o modelo semi-simétrico foi a com 3%, a qual causava um ligeiro aumento no tempo de ciclo, mas um menor impacto na assimetria. A referida resposta com 3% pode ser observada na Figura 5.7.

Figura 5.7: Resultado do balanceamento semi-simétrico.

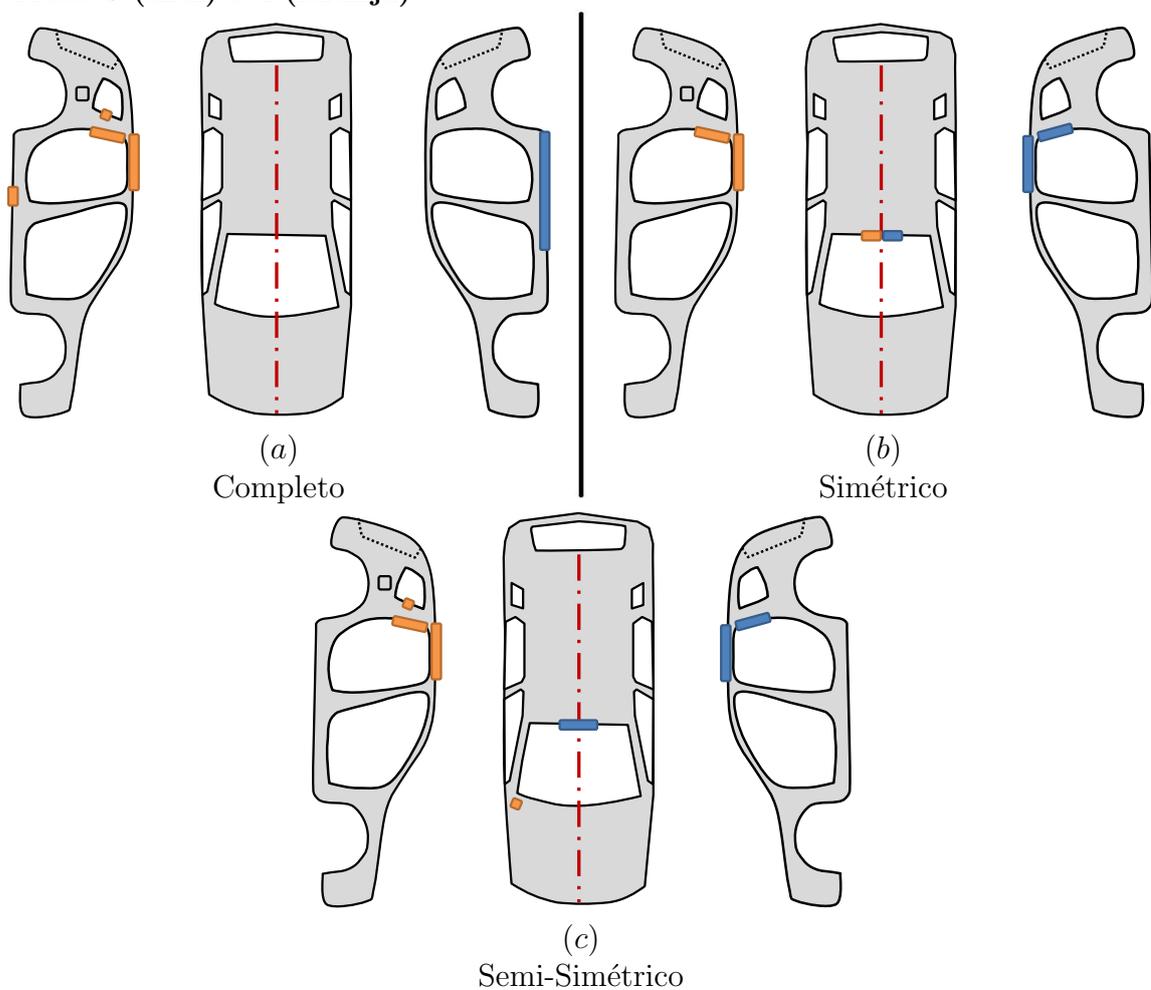


Fonte: Autoria Própria

Em termos da alocação de cada robô, a Figura 5.8 apresenta a resposta dos modelos matemáticos completo e semi-simétrico, com e sem a inclusão de assimetrias. Na

Figura 5.8a, que representa a resposta do modelo completo, é possível notar que não existe uma correlação direta em a resposta do robô 3, cuja distribuição está representada em azul, e o robô 4, com as respectivas tarefas ilustradas em laranja. Já na Figura 5.8b, que ilustra o modelo semi-simétrico sem a inclusão de assimetrias, observa-se o caso oposto, os robôs irmão realizam exatamente as mesmas tarefas. Por fim, a Figura 5.8c, apresenta a resposta final do modelo semi-simétrico para este par de robôs. Neste último caso, a resposta é quase que completamente simétrica. Porém, como no caso real existem assimetrias, estas também encontram-se na resposta ilustrada na Figura 5.8c, mais especificamente nos acessos 1 e 5

Figura 5.8: Comparação entre o modelo completo e o modelo semi-simétrico para os robôs 3 (azul) e 4 (laranja).

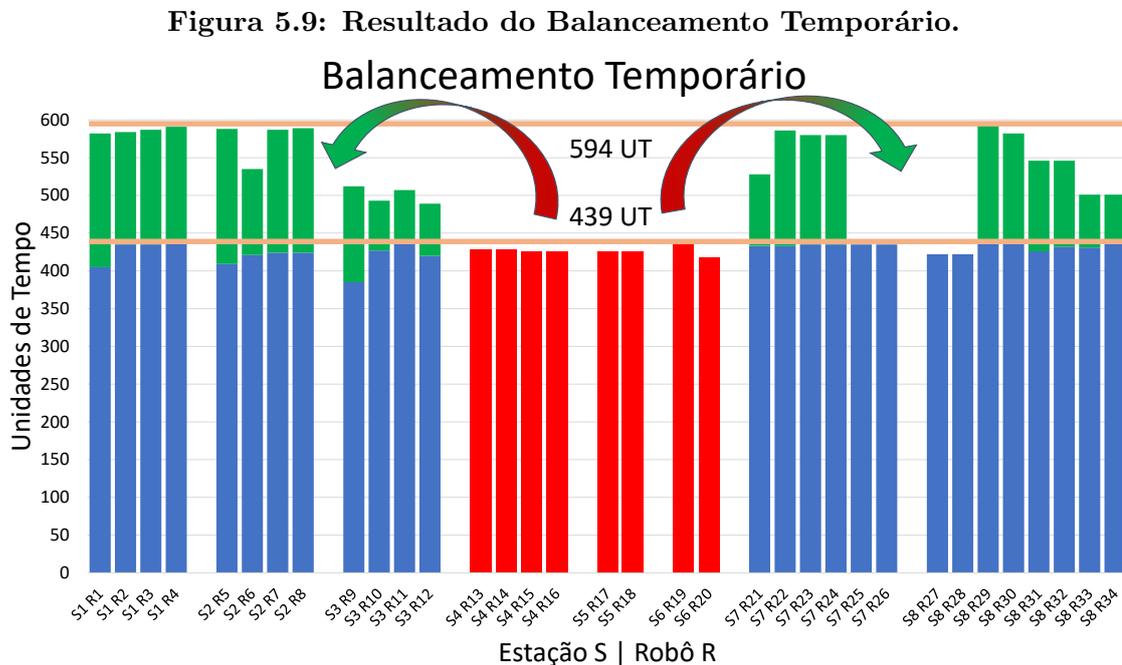


Fonte: Autoria Própria

5.2.3 MODELO DE BALANCEAMENTO TEMPORÁRIO

Conforme apresentado na Figura 3.1 e detalhado nas seções 3.5 e 4.4, a linha de produção em análise deve passar por uma atualização em alguns de seus robôs. Nesta condição temporária, deve ocorrer o remanejamento dos pontos de solda dos robôs em substituição para os demais robôs em operação, comprometendo-se o mínimo possível as questões de balanceamento da linha. Essa situação foi tratada com o uso de um modelo para fazer a redistribuição dos pontos de solda dos robôs que seriam retirados da linha nos robôs que permaneceriam. Essa redistribuição é apenas temporária e não está ligada a um tempo de ciclo alvo. Porém, quanto menor o impacto da redistribuição na linha de produção, melhor.

A Figura 5.9 apresenta os resultados obtidos pelo modelo de balanceamento temporário. Os robôs S4R13 a S6R20, representados pelas barras vermelhas, foram retirados da linha; logo, 8 robôs deixariam de operar na referida análise. Este fato gerou um aumento no tempo de ciclo de 439 unidades de tempo para 594 unidades de tempo.



Fonte: Autoria Própria

Foi dado como entrada ao modelo de balanceamento temporário a resposta encon-

trada pelo modelo semi-simétrico (3%) para todos os robôs que não seriam substituídos. Se analisados o conjunto de barras azuis e vermelhas na Figura 5.9 representam a mesma resposta encontrada na Figura 5.7. Isso era esperado, já que, um dos objetivos do modelo semi-simétrico é evitar retrabalho na execução das trajetórias dos robôs, que ficariam na linha, quando a etapa de substituição for completada. Portanto, uma nova trajetória (ou conjunto de tarefas) poderia apenas ser adicionada ao já existente, garantindo, então, que a trajetória original não seria modificada.

Na Figura 5.9 é possível observar que quase todos os robôs da linha receberam pontos de solda adicionais. O incremento gerado no tempo de ciclo está graficamente representado nos segmentos de barra de cor verde. Contudo, os robôs S7R25 a S8R28 não tiveram mudanças em suas alocações. Tal situação evidencia que alguns robôs possuem alto nível de especificidade. Ou seja, alguns robôs estão acoplados a pinças muito específicas. Essas peças garantem que alguns pontos de solda de difícil acesso sejam factíveis, ao custo de reduzir a capacidade do robô executar diferentes tarefas. Portanto, na resposta original, esses robôs já faziam tudo o que possuíam capacidade de fazer e durante a inclusão das tarefas realizada pelo balanceamento temporário os mesmos não possuíam a capacidade, em termos de acessibilidade, de absorver mais tarefas.

As respostas obtidas foram analisadas por um especialista do sistema, indicando a viabilidade de execução prática das mesmas. Deste modo, o presente trabalho traz contribuições para a obtenção de respostas otimizadas para um estudo de caso de uma linha robótica com condições de simetria sendo levadas em conta (seções 5.2.1 e 5.2.2), além de fornecer a possibilidade de indicar um balanceamento temporário à linha em condições em que alguns dos operadores robóticos estejam ausentes (seção 5.2.3).

O Capítulo 6 a seguir traz as considerações finais do trabalho realizado e aponta direções para futuros desenvolvimentos.

6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação aborda-se o problema de balanceamento de linhas robóticas em uma indústria de manufatura. Faz-se uso de uma abordagem de solução baseada em modelos matemáticos de Programação Linear Inteira Mista. Em particular, consideram-se questões relativas à simetria operacional de robôs que atuam dos lados direito e esquerdo do produto, no caso veículos. Também realizam-se contribuições no sentido de prover respostas otimizadas matematicamente quando alguns robôs da linha devem parar temporariamente sua operação, sem que a linha como um todo seja interrompida, condição denominada de balanceamento temporário.

6.1 OBSERVAÇÕES FINAIS

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura, com os tópicos necessários para o entendimento do contexto do trabalho (objetivo específico 1).

O Capítulo 3 detalha o problema tratado, evidenciando todas as semelhanças e diferenças com o trabalho proposto por Lopes et al. (2017) (objetivos específicos 1 e 2).

No Capítulo 4 os modelos matemáticos foram apresentados, iniciando-se com uma revisão do modelo base (LOPES et al., 2017), passando por algumas alterações realizadas com o objetivo de facilitar a utilização do referido modelo no contexto em análise. Em seguida foram apresentadas as alterações realizadas como o objetivo de possibilitar o tratamento detalhado das características de simetria da linha. Por fim, foram apresentadas restrições e parâmetros inseridos ao modelo base de modo a possibilitar que o modelo obtido conseguisse realocar alguns pontos de solda em uma resposta pré-existente (objetivo específico 3).

No Capítulo 5 foram apresentadas as características do estudo de caso, a meto-

dologia utilizada para a coleta de dados e os resultados encontrados (objetivo específico 4).

Analisando a qualidade da resposta do modelo original e do semi-simétrico, não existem diferenças significativas em termos da qualidade das mesmas, porém, o segundo é capaz de lidar com as características de simetria da linha e necessita de um volume de dados de entrada menor.

Sob a ótica industrial, o modelo semi-simétrico é capaz de gerar respostas similares ao completo, com um menor tempo, de coleta de dados e execução do modelo, e considerando aspectos práticos relevantes, que não eram anteriormente observados. Isto torna esta variante do modelo, inicialmente propostos por Lopes et al. (2017), mais atraiente à indústria e melhora as chances de implementação integral da resposta proposta.

No momento em que esse estudo foi redigido, as respostas ainda não haviam sido implementadas. Desenvolver um novo veículo é uma tarefa trabalhosa, sendo que sua duração excede a janela de tempo existente para a defesa da presente dissertação. Porém, os dados utilizados foram validados em comparação à resposta operacional vigente e, de modo final, os resultados obtidos foram também validados por profissionais experientes da empresa. Isso reflete em um grande nível de confiança na qualidade da resposta sugerida pelo modelo matemático.

6.2 POSSÍVEL CONTINUAÇÃO AO TRABALHO

O modelo de balanceamento temporário também pode ser utilizado para alocações dos robôs em caso de falha, ou seja, pode ser um passo inicial para o desenvolvimento de um modelo que seja capaz de gerar balanceamentos secundários que entrariam em funcionamento no caso de falha em algum dos robôs da linha. Em fato, para modelo simples essa já é uma realidade.

Um trabalho futuro poderia utilizar como base o que foi está implementado para modelo simples e expandir para modelo misto, considerando aspectos como a existência de *buffers*, por exemplo. Adicionalmente, poderia-se considerar a programação necessária para automatizar esse processo, de modo que a linha entre em um “modo degradado” assim que a falha seja identificada. Também é viável pensar em avaliar falhas múltiplas,

ou seja, quando mais de um robô vier a falhar ou deva sofrer manutenções.

REFERÊNCIAS

- ASLANLAR, S. et al. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. **Materials & Design**, Elsevier, v. 29, n. 7, p. 1427–1431, 2008.
- BARNES, T.; PASHBY, I. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part ii - adhesive bonding and mechanical fasteners. **Journal of materials processing technology**, Elsevier, v. 99, n. 1-3, p. 72–79, 2000.
- BATTAÏA, O.; DOLGUI, A. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. **International Journal of Production Economics**, v. 142, n. 2, p. 259–277, abr. 2013. ISSN 09255273.
- BAYBARS, I. A survey of exact algorithms for the simple line balancing problem. **Management Science**, v. 32, p. 909–932, 1986.
- BOWMAN, E. Assembly-line balancing by linear programming. **Operational Research**, v. 8, p. 2016–2032, 1960.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 2, p. 674–693, dez. 2007. ISSN 03772217.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 509–528, fev. 2008. ISSN 09255273.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions. **Production Planning and Control**, Taylor & Francis, v. 20, n. 5, p. 455–471, 2009.
- BUXEY, G. M. Assembly line balancing with multiple stations. **Management Science**, v. 20, p. 1010–1021, 1974.
- DEMIR, L.; TUNALI, S.; ELIYI, D. T. The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 25, n. 3, p. 371–392, 2014.
- DIMITRIADIS, S. G. Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 33, n. 9, p. 2757–2774, 2006.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração de Produção e Operações**. São Paulo: Cengage Learning, 2002.

GOULD, J. Joining aluminum sheet in the automotive industry - a 30 year history. **Weld. J**, v. 91, n. 1, 2012.

HAMIDINEJAD, S.; KOLAHAN, F.; KOKABI, A. The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing. **Materials & Design**, Elsevier, v. 34, p. 759–767, 2012.

IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio**. 2019. Último acesso: 25 de Fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio>>.

KUKA. **KUKA instalações de produção**. 2019. Último acesso: 25 de Fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://www.kuka.com/pt-br>>.

LAPIERRE, S. D.; RUIZ, A. B.; SORIANO, P. Balancing assembly lines: An industrial case study. **Journal of Operational Research Society**, v. 168, p. 589–597, 2004.

LOPES, T. C. et al. Balancing and cyclically sequencing synchronous, asynchronous, and hybrid unpaced assembly lines. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 203, p. 216–224, 2018.

LOPES, T. C. et al. Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. **European Journal of Operational Research**, Elsevier B.V., v. 263, n. 3, p. 1033–1048, 2017.

MICHALOS, G. et al. 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.

MICHELS, A. S. et al. The robotic assembly line design (rald) problem: Model and case studies with practical extensions. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 120, p. 320–333, 2018.

MOLINA, R. G. et al. Balanceamento de uma linha de manufatura robotizada com características simétricas por meio de programação matemática. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2018.

Olds, R. E. **Ransom E. Olds: The Patriarch of Mass Production**. 2019. Último acesso: 08 de Maio de 2019. Disponível em: <<https://www.automotivehalloffame.org/honoree/ransom-e-olds/>>.

PASTOR, R.; FERRER, L. An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 47, n. 11, p. 2943–2959, 2009.

- PATTERSON, J. H.; ALBRACHT, J. J. Assembly-Line Balancing: Zero-One Programming with Fibonacci Search. **Operations Research**, v. 23, n. 1, p. 166–172, 1975. ISSN 0030-364X.
- RUBINOVITZ, J.; BUKCHIN, J. Design and balancing of robotic assembly lines. In: **Proc. of the fourth world conference on robotics research**. Pittsburgh, PA: [s.n.], 1991.
- SALVESON, M. E. The assembly line balancing problem. **The Journal of Industrial Engineering**, v. 6, p. 18–25, 1955.
- SCHOLL, A. **Balancing and sequencing assembly lines**. 2nd. ed. Heidelberg: ed. Physica, 1999.
- SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **Arbeits-Und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena**, v. 21, 2003.
- SCHOLL, A.; BECKER, C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 666–693, 2006.
- SCHOLL, A.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. The assembly line balancing and scheduling problem with sequence-dependent setup times: problem extension, model formulation and efficient heuristics. **OR Spectrum**, n. 35, p. 291–320, 2013.
- Siemens. **Process Simulate**. 2019. Último acesso: 25 de Fevereiro de 2019. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/7457_cm642-80351.pdf>.
- THANGAVELU, S. R.; SHETTY, C. M. Assembly line balancing by zero-one integer programming. **AIIE Transactions**, v. 3, p. 61–68, 1971.
- THOMOPOULOS, N. T. **Assembly line planning and control**. [S.l.]: Springer, 2014.
- WEE, T.; MAGAZINE, M. Assembly line balancing as generalized bin packing. **Operations Research Letters**, v. 1, n. 2, p. 56–58, abr. 1982.
- WHITE, W. W. Comments on a Paper by Bowman. **Operations Research**, v. 9, n. 2, p. 274–276, 1961.
- WILLIAMS, H. **Model Building in Mathematical Programming**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781118506189.