

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS**

DANIEL SCHIBELBAIN

**MÉTODO PARA REDUÇÃO DE TEMPO COMPUTACIONAL E MELHORIA DE
FLEXIBILIDADE DE DEMANDA NO BALANCEAMENTO DE LINHAS DE
SOLDAGEM ROBOTIZADAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

DANIEL SCHIBELBAIN

MÉTODO PARA REDUÇÃO DE TEMPO COMPUTACIONAL E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE DEMANDA NO BALANCEAMENTO DE LINHAS DE SOLDAGEM ROBOTIZADAS

Method for Reducing Computational Time and Improving Demand Flexibility in the Balancing of Robotized Welding Lines

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de concentração: Engenharia de Manufatura, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues.

CURITIBA

2021



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

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba



DANIEL SCHIBELBAIN

**MÉTODO PARA REDUÇÃO DE TEMPO COMPUTACIONAL E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE
DEMANDA NO BALANCEAMENTO DE LINHAS DE SOLDAGEM ROBOTIZADAS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Data de aprovação: 29 de abril de 2021.

Prof. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Leandro Magatão, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Milton Borsato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Paulo Henrique Siqueira, Doutorado - Universidade Federal do Paraná

Ao meu filho, por me ensinar, sem palavras, o que realmente é importante na vida de um ser humano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Milton Polli pela confiança no meu reingresso no programa, ao meu coorientador Prof. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues pelo incentivo e por não deixar de acreditar na minha capacidade e ao Prof. Leandro Magatão por me apresentar os trabalhos por ele orientados anteriormente, que serviram de base para esse estudo.

Agradeço à minha família pela paciência, compreensão e pelo suporte nos momentos difíceis.

“divide ut regnes”
(Napoleão)

RESUMO

Schibelbain, Daniel. **Método para Redução de Tempo Computacional e Melhoria de Flexibilidade de Demanda no Balanceamento de Linhas de Soldagem Robotizadas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 75 páginas, 2021.

Nesse trabalho é proposta uma abordagem para diminuir o tempo computacional utilizado na solução de um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista presente na literatura para o balanceamento de uma linha de manufatura robotizada da indústria automotiva. Para isso, propõe-se dividir o problema inicial em subconjuntos e buscar a otimização de cada um desses grupos, individualmente. A divisão do problema em partes implica uma redução considerável da quantidade de variáveis e restrições em cada grupo. Para verificação do método, foi testado um caso prático da indústria. Como resultado, obteve-se uma redução de aproximadamente 10 vezes do tempo computacional, com a mesma resposta de tempo de ciclo. Além disso, foi realizada uma análise da flexibilidade dos robôs nessa linha de produção para absorver possíveis flutuações de demanda do mercado. Para isso, foram propostos alguns cenários de redução de volume através da diminuição da quantidade de robôs. Foram analisados casos em que os robôs possuíam diferentes capacidades de acessibilidade às regiões de soldagem. Como resultado, verificou-se que robôs com maior flexibilidade possuem impacto na diminuição do tempo de ciclo da linha até duas vezes maior em comparação àqueles com ferramentas de solda muito específicas.

Palavras-chave: Redução Tempo Computacional, Balanceamento de Linhas de Produção, Flutuações de Demanda de Mercado.

ABSTRACT

Schibelbain, Daniel. **Method for Reducing Computational Time and Improving Demand Flexibility in the Balancing of Robotized Welding Lines.** Master of Science Dissertation. Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, The Federal University of Technology - Paraná, Curitiba, Brazil, 75 pages, 2021.

In this work, an alternative approach is proposed to decrease the computational time expended to reach the solution of a mathematical model in Mixed-Integer Linear Programming present in the literature to perform the production balancing of a robotic manufacturing line in the automotive industry. For this, it is proposed to divide the initial problem into subsets and seek the optimization of each one of these groups, individually. Dividing the problem into parts implies a considerable reduction in the number of variables and restrictions in each group. To verify the method, a practical case from the industry was tested. As a result, a reduction of approximately 10 times in computational time was obtained, with the same cycle time response. In addition, an analysis of the flexibility of the robots in this production line was carried out to absorb possible fluctuations in market demand. For that, some scenarios of volume reduction were proposed by reducing the number of robots. Cases were analyzed in which the robots had different accessibility capabilities to the welding regions. As a result, it has been found that robots with greater flexibility have up to twice the impact on the cycle time of the production line compared to those with very specific welding capabilities.

Keywords: Computational Time Reduction, Assembly Line Balancing, Market Demand Fluctuations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema básico de um sistema de manufatura	16
Figura 2.2 - Fluxo esquemático de uma linha de produção robotizada	17
Figura 2.3 - Fluxograma do processo de estampagem	19
Figura 2.4 - Fluxo esquemático de uma linha de produção de carrocerias	20
Figura 2.5 - Processo de soldagem a ponto por resistência	22
Figura 2.6 - Equipamento de soldagem a ponto por resistência	22
Figura 2.7 - Exemplo de linha de soldagem robotizada	23
Figura 2.8 - Ocupação das estações de trabalho de uma linha de produção	24
Figura 3.1 - Representação da linha de produção em estudo.....	28
Figura 3.2 - Representação dos limites de eixo de um robô	30
Figura 3.3 - Colisão de robôs atuando na mesma região de solda	31
Figura 3.4 - Representação esquemática dos pontos de solda	32
Figura 3.5 - Representação esquemática das regiões de solda	32
Figura 4.1 - Representação esquemática dos acessos de solda	38
Figura 4.2 - Macrorregiões de interferência.....	40
Figura 4.3 - Ciclo de adjacências	48
Figura 4.4 - Método para execução do balanceamento parcial.....	51
Figura 5.1 - Identificação das acessibilidades	53
Figura 5.2 - Esquema de definição das regiões de solda.....	54
Figura 5.3 - Separação do veículo em regiões.....	54
Figura 5.4 - <i>Process Simulate</i> , ambiente virtual de simulação	56
Figura 5.5 - Comparação entre os tempos de ciclo real e aproximado	57
Figura 5.6 - Propostas para a divisão da linha de produção em grupos	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Conjuntos e tuplas usados no modelo de base.....	36
Tabela 4.2 - Parâmetros de ocorrência, controle de tempo e interferência.....	37
Tabela 4.3 - Conjuntos de variáveis e seus significados.....	42
Tabela 5.1 - Resultados iniciais fornecidos pelo modelo completo e balanceamento parcial.....	60
Tabela 5.2 - Comparativo da quantidade de restrições e variáveis para o 1º ciclo de balanceamento parcial	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 - Acessibilidades dos robôs às regiões de solda	55
Quadro 5.2 - Análise das médias de pontos de solda por robô para as duas propostas de divisão da linha analisadas.....	59
Quadro 5.3 - Estratificação dos maiores tempos de ciclo para o 1º balanceamento parcial.....	61
Quadro 5.4 - Análise das regiões de solda para o robô de maior tempo de ciclo	62
Quadro 5.5 - Resultados finais fornecidos pelo modelo completo e balanceamento parcial.....	62
Quadro 5.6 - Resultados de limites superior, inferior, <i>gap</i> de integralidade e tempos computacionais fornecidos pelo modelo completo e balanceamento parcial	63
Quadro 5.7 - Comparação entre quantidade de restrições e variáveis para o modelo completo e balanceamento parcial.....	64
Quadro 5.8 - Quantidade de regiões de solda acessadas por cada robô na linha de produção	65
Quadro 5.9 - Tempo de ciclo, quantidade de mudanças de pontos de solda necessárias e volume de produção para os cenários estudados	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivos Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 LINHAS DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	16
2.1.1 Características Gerais	16
2.1.2 Considerações sobre a Indústria Automotiva	18
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM	21
2.3 O PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO	24
3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	27
3.1 A LINHA DE PRODUÇÃO – CONCEITOS BÁSICOS	28
3.2 CONJUNTO DE RESTRIÇÕES	29
4 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA	34
4.1 FUNÇÃO OBJETIVO, PARÂMETROS E TUPLAS	34
4.1.1 Função Objetivo	34
4.1.2 Tuplas e Parâmetros.....	35
4.1.3 Acessibilidade	37
4.1.4 Controle de Movimentação dos Robôs	38
4.1.5 Controle de Interferências entre os Robôs	39
4.1.6 Demais Parâmetros	40
4.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO	41
4.3 RESTRIÇÕES.....	43
4.3.1 Ocorrência dos Pontos de Solda	43
4.3.2 Tempo de Ciclo.....	44
4.3.3 Cruzamentos e Disputas de Espaço.....	49
4.3.4 Método para o Balanceamento Parcial	50
5 RESULTADOS - CASO PRÁTICO	53
5.1 DADOS DE ENTRADA	53
5.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	57
5.2.1 Modelo de Balanceamento Parcial – Divisão do Problema	58
5.2.2 Estudo de Alteração da Quantidade de Robôs – Novos Cenários.....	64
6 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O problema de balanceamento das linhas de produção é um tema relevante devido ao impacto na produtividade da indústria, através da busca pelo melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, seja para investir no aumento de capacidade ou mesmo a maneira mais eficiente de preparar a linha para uma redução de volume. Dados da *International Federation of Robotics* (IFR, 2020), mostram a importância do mercado de automação industrial através da inclusão de robôs, com um crescimento anual em vendas médio de 8% entre 2014 e 2019 nas Américas (mesmo com a retração de 13% apresentada em 2019).

Nesse contexto de otimização de processos, três aspectos importantes precisam ser avaliados: *i)* o tempo computacional necessário, *ii)* a flexibilidade na geração e teste de novos cenários, e *iii)* a qualidade das modificações propostas na linha de produção. Em Lopes et al. (2017), foi proposto um modelo matemático para o balanceamento desse tipo de linha de produção. O trabalho de Molina (2019) apresentou uma contribuição a esse modelo matemático através do uso das relações de simetria existentes. Como sequência, o presente trabalho visa contribuir ainda mais na simplificação dessa redistribuição de tarefas, através da divisão e solução do problema em partes. O objetivo é que o tempo computacional seja menor devido à segmentação do problema (separação das variáveis, restrições, dados de entrada...). Esta redução permitirá que possam ser realizadas mais iterações e, com isso, avaliadas mais soluções num mesmo intervalo de tempo.

Alguns estudos têm sido realizados no intuito de contribuir para a redução do tempo computacional em problemas utilizando a Programação Linear Inteira Mista, como mostra o trabalho de Asfora *et al.* (2020), onde encontrou-se uma redução significativa, da ordem de 98%, em comparação à solução anteriormente apresentada para aquele tipo de problema. Outra abordagem foi realizada por Gonzales *et al.* (2020), onde foi proposta uma combinação entre métodos meta-heurísticos e exatos, através da divisão do problema em duas subdivisões, organizadas de acordo com a natureza das variáveis de decisão (discretas vs. contínuas). Outro fator relacionado ao tema é a eficiência dos *solvers* disponíveis no mercado, como CPLEX e Gurobi, que também foi abordado por Gonzales *et al.* (2020), onde resultados melhores foram apresentados pelo *software* CPLEX.

Na revisão da literatura relacionada ao tema de balanceamento de linhas de produção robotizadas, apresentada por Chutima (2020), pode-se verificar a originalidade e representatividade da pesquisa realizada por Lopes *et al.* (2017), que serviu de base para outros trabalhos e que ainda tem potencial para ser mais explorada.

Além disso, diante do cenário incerto dos últimos meses, devido aos impactos da pandemia do novo coronavírus, este trabalho apresenta algumas contribuições às tomadas de decisão para absorver alterações de demanda de volume de produção provenientes do mercado consumidor. Decisões estratégicas, como fechar um turno de produção ou até mesmo transferir toda a produção de um veículo para outro país, devem ser pautadas em análises que forneçam vários cenários e alternativas, nem sempre intuitivamente observados.

O interesse é buscar aproximar o modelo matemático do problema real e tornar seu uso o mais “amigável” possível, para que possa efetivamente trazer resultados práticos. Há um vasto campo de aprendizado e otimização a ser explorado, aproximando os pesquisadores dos profissionais da indústria. Os primeiros, com o aporte dos estudos e tendências mais recentes do meio acadêmico, através da coleta criteriosa de dados de entrada, tradução desses dados e proposta de possíveis soluções para melhoria de performance da indústria. Os últimos, orientando a pesquisa de forma a buscar alternativas que realmente sejam aplicáveis e possam trazer ganhos na prática.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do problema de balanceamento de linhas de produção em estudo nesse trabalho é minimizar o tempo de ciclo de produção. Nesse intuito é proposta uma nova abordagem ao modelo matemático usando Programação Linear Inteira Mista para o balanceamento de uma linha de manufatura robotizada apresentado por Molina (2019). Para isso, propõe-se dividir o problema inicial em subconjuntos e buscar a otimização de cada uma dessas partes, comparando-se os resultados aos obtidos pelo modelo utilizado por Molina (2019). Além disso, propõe-se considerar a alteração na quantidade de robôs nessa linha de produção para absorver possíveis flutuações de demanda de mercado, tanto positivas quanto negativas.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

1. Disponibilizar um modelo matemático capaz de propor soluções otimizadas para o problema, a partir dos parâmetros de entrada e restrições encontradas;
2. Verificar a possibilidade de obter resultados similares ou melhores que Molina (2019) em um menor tempo computacional;
3. Analisar o impacto no tempo de ciclo de alterações na quantidade de robôs, por meio de alguns cenários propostos, oriundos de alterações de demanda de produção do mercado;
4. Deseja-se também analisar e propor alternativas para reduzir a quantidade de modificações necessárias na linha de produção. Com isso, o tempo de intervenção em alterações na programação dos robôs será reduzido e, por conseguinte o tempo de linha de produção parada também.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em Molina (2019), há a possibilidade de se obter a solução ótima deste problema de balanceamento. Porém, não há a garantia de que esta solução ótima será obtida em tempo computacional satisfatório. Por exemplo, para testar o impacto da inserção ou remoção de tarefas numa estação robotizada, esse teste pode ter um tempo computacional significativo de várias horas ou até mesmo dias. A proposta desse trabalho é viabilizar que vários testes possam ser realizados dentro de um período de tempo aceitável.

Como o custo de mão de obra alocada à área de Engenharia de Processos numa indústria automotiva é significativo, a redução no tempo de computacional (tempo de CPU) para obter a solução ótima (ou quase-ótima) torna mais eficiente a análise de ganho de produtividade.

Além disso, o estudo da alteração da quantidade de robôs na linha de produção pode fornecer dados relevantes para a tomada de decisão de quais tipos de

robôs comprar, no caso de aumento de demanda de mercado e também de qual configuração da linha seria mais eficiente no caso de redução de volume.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está organizada da seguinte maneira: no Capítulo 2 são revisados alguns conceitos básicos da literatura, relacionados ao tema proposto; na sequência, no Capítulo 3, é feita a caracterização mais detalhada dos problemas a serem tratados; no Capítulo 4, é apresentada a modelagem matemática presente na literatura e suas adaptações para o contexto desse trabalho; a seguir, no Capítulo 5, é discutido o caso prático e os resultados da implementação do modelo matemático; finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão da literatura está dividida nas seguintes seções:

- Descrição de Linhas Produtivas e abordagem sobre as linhas de produção da indústria automotiva (carroceria, estamparia, pintura e montagem final);
- Descrição do Processo de Soldagem na Indústria Automotiva;
- O problema do Balanceamento de linhas de produção.

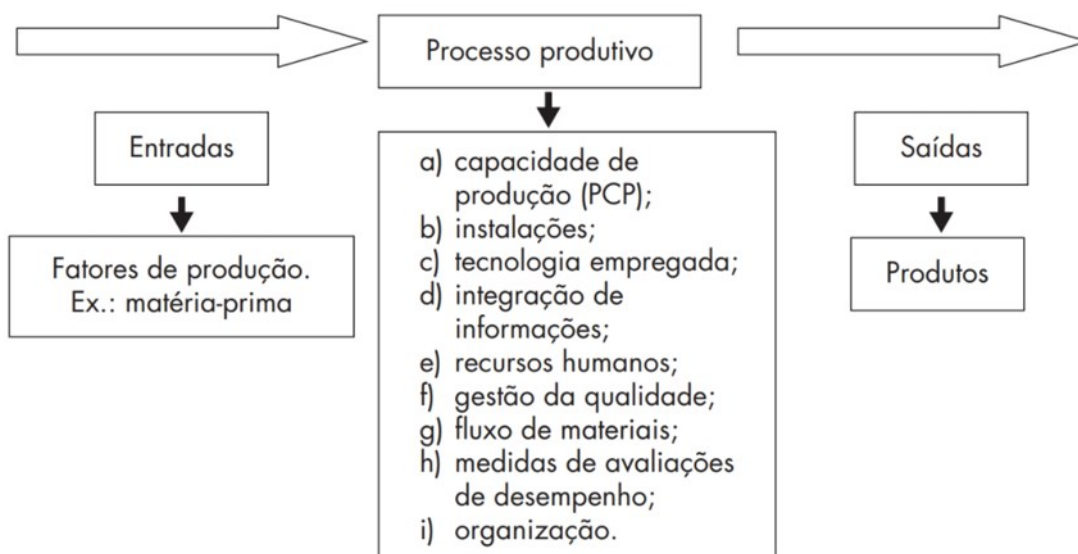
2.1 LINHAS DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Nesta seção é apresentada uma descrição de Linhas Produtivas e, também, a revisão da literatura recente sobre linhas de produção da indústria automotiva (carroceria, estamparia, pintura e montagem final).

2.1.1 Características Gerais

Uma linha de produção baseia-se na transformação das matérias-primas (entradas) por meio da aplicação de diversos processos produtivos e recursos até a obtenção do produto final, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Esquema básico de um sistema de manufatura

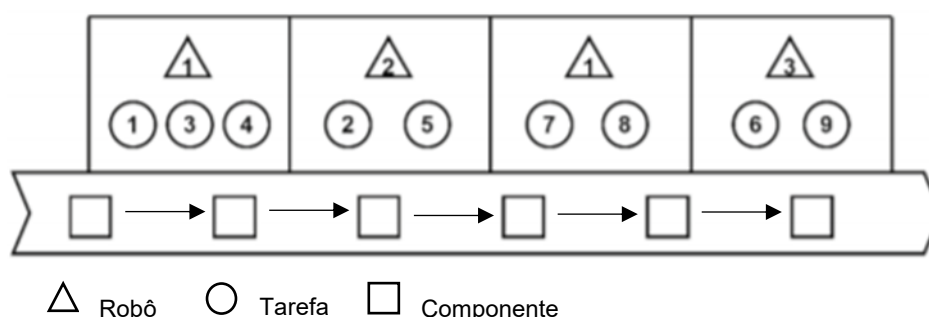


Fonte: Lira (2017)

Esse processo produtivo tem sofrido evoluções ao longo do tempo e se enfatizou no intuito de obter a melhor performance possível, isto é, aumentar a produtividade e diminuir os custos. Para isso, ocorreu a segmentação em etapas, separadas de acordo com sua similaridade, técnicas de base, duração, entre outros.

Segundo Boysen et al. (2007) e Sun et al. 2020, uma linha de produção consiste em uma série de estações de trabalho, ligadas entre si por um sistema de movimentação, onde são realizadas tarefas específicas para cada modelo de produto, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Fluxo Esquemático de uma linha de produção robotizada.



Fonte: Sun (2020) adaptado

O esquema mostrado na figura anterior representa o sistema de produção conhecido como flow shop, onde o layout, sequenciamento e instalações são concebidos de acordo com o fluxo do produto, sendo usualmente encontrado na indústria automobilística atual (PINEDO, 2016). Cada estação de trabalho possui um set específico de tarefas a serem realizadas (que podem variar de acordo com o modelo a ser produzido), caracterizada por um tempo operacional padrão – o chamado “Tempo de Ciclo”.

Segundo Groover (2017) e Lopes et al. (2020), as linhas de produção podem ser classificadas de acordo com o tipo de transporte (mecanizado) entre as estações de trabalho, sendo usadas três classes principais:

- Contínuas – são aquelas em que as peças se movem à velocidade constante e ininterruptamente (salvo sob intervenção, saturação ou *input* de segurança). São mais comuns em linhas manuais onde os operadores podem se mover para acompanhar a peça e realizar as operações;

- Síncronas – têm como característica principal a movimentação simultânea (sincronizada). Para evitar perdas significativas de produtividade, o tempo de ciclo entre as estações deve ser similar, com mínimas variações. Devido a essa característica, têm aplicabilidade maior em linhas automatizadas;
- Assíncronas – cada peça se move de modo independente das demais, assim que seu ciclo tiver terminado naquele posto de trabalho. Seu funcionamento está normalmente associado ao conceito de filas ou *buffers* entre as estações - isso permite que haja uma certa quantidade de posições vagas à frente para a movimentação. Esse tipo de sistema é aplicado tanto em linhas manuais quanto automatizadas;
- Híbridas – são linhas de produção que usam dois ou mais tipos de sistemas de movimentação combinados (LOPES *et al*, 2018).

Com relação à diversidade de modelos, segundo Boysen (2009), Groover (2017) e Molina (2019), as linhas de produção podem ser classificadas em:

- Linha de Modelo Único (ou simples) – apenas um único modelo é produzido, sem variações;
- Linha de Modelo em Lote – os modelos são produzidos em lotes, com necessidade de *setup* (modificações na configuração da linha e/ou equipamentos) entre os lotes de produção;
- Linha de Modelo Misto – existe similaridade entre os recursos usados pelos modelos e, por isso, eles podem ser produzidos ao mesmo tempo na linha de fabricação, sem necessidade de parar para ajustar a configuração.

A linha de produção que é objeto do presente estudo pode ser descrita como assíncrona, de modelo misto. Ou seja, são postos de trabalho (estações de solda), com alguns postos vagos entre elas (*buffers*) e com movimentação independente.

2.1.2 Considerações sobre a Indústria Automotiva

Na indústria automotiva, as fábricas normalmente se dividem em grandes unidades de produção constituídas de acordo com sua etapa principal no processo:

Estamparia, Carroceria, Pintura, Montagem, entre outros (MICHALOS, 2010).

No Departamento de Estamparia, as bobinas de aço provenientes das indústrias siderúrgicas são transformadas em peças metálicas para a composição das carrocerias dos veículos, de acordo com o fluxograma ilustrado pela Figura 2.3. Esse processo ocorre por meio das ferramentas de estampo (daí a denominação Estamparia), que são grandes prensas com capacidade de exercer toneladas de pressão para a conformação mecânica desse material.

No processo de prensagem, é necessário separar em etapas a transformação do aço até atingir o design final do produto a fim de evitar trincas ou fissuras no material. Para isso, as prensas são normalmente dispostas em linha, de acordo com sua capacidade de pressão, dimensões e etapa no ciclo de produção.

Figura 2.3 - Fluxograma do processo de estampagem.



Fonte: Metal e Forma (2020)

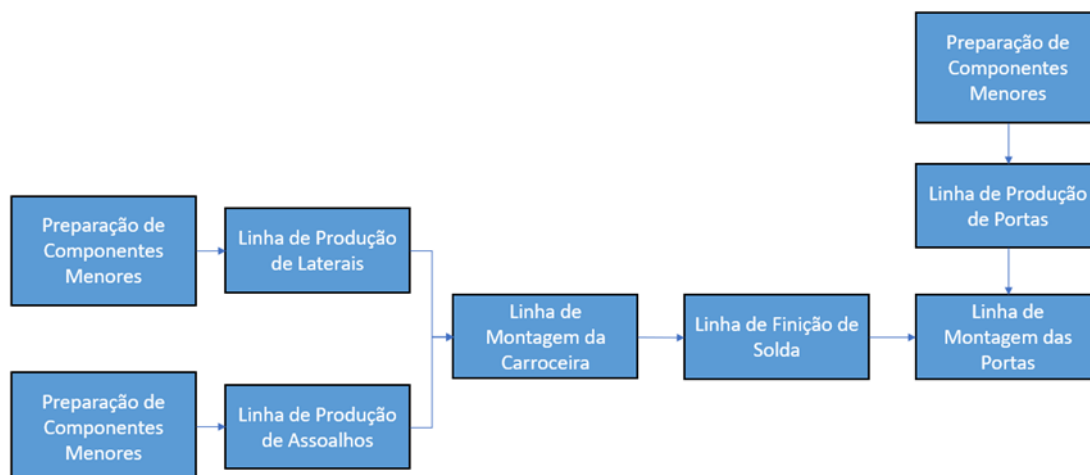
Normalmente, somente peças com maiores dimensões (painéis de portas, laterais, assoalhos) ou que podem sofrer deformações em transporte a grandes distâncias (o teto dos veículos, por exemplo) são estampadas in house, ou seja, internamente na fábrica. O restante dos componentes metálicos é produzido e disponibilizado por fornecedores externos.

Após a estamparia, o processo seguinte no fluxo produtivo é a fabricação das carrocerias. Trata-se da união dos componentes metálicos, majoritariamente por soldagem (há outras técnicas como colagem, rebiteagem, prensagem (clinch), que não são objeto de estudo desse trabalho).

O departamento de Carroceria (ou Armação – como também é conhecido em algumas Montadoras) é composto de várias linhas de produção que se unem em uma

Linha Final para a soldagem completa do veículo. O esquema a seguir ilustra esse fluxo de produção.

Figura 2.4 - Fluxo Esquemático de uma linha de produção de carrocerias.



Fonte: Autoria própria

Há várias estações de trabalho que executam pequenas tarefas como a soldagem de componentes mais simples, que alimentam as linhas de produção principais: Laterais (também chamado Bodyside), Assoalhos (Floor Main) e Portas (Closures). As laterais do veículo são soldadas com os assoalhos e o teto para realizar o fechamento da carroceria, que segue para a linha Final (Respot em algumas Montadoras), onde são aplicados todos os pontos de solda necessários (HAGEMANN, 2020). A seguir, é realizada a montagem das portas e, após o controle de qualidade, o veículo avança para a próxima etapa – Pintura. (O processo de produção de carrocerias será posteriormente abordado em mais detalhes no Capítulo 3).

No Departamento de Pintura são aplicadas a proteção anticorrosão, tintas e vernizes, além das vedações para impedir a entrada d'água nos veículos (LOZAR, 2020). Inicialmente, as carrocerias passam por alguns banhos de imersão com componentes desengordurantes e desengraxantes, para deixar a superfície livre de impurezas. Na sequência, é aplicado um componente de proteção anticorrosivo. Dependendo da composição do material utilizado, faz-se necessária a passagem dos veículos por estufas, onde permanecem aquecidos até a completa “cura” desse material.

A vedação da carroceria, comumente, é realizada por meio da aplicação de uma cola adesiva (conhecida no meio automotivo como Mastic ou Mastique) que pode

ser feita manualmente ou em processo automatizado (aqui também, normalmente, é necessária a passagem por estufas até a completa cura do material). Finalmente, os veículos recebem a aplicação das tintas e vernizes, onde a utilização de robôs é amplamente disseminada.

A etapa seguinte no fluxo de produção de um automóvel é a passagem pela Linha de Montagem (Trim & Chassis em algumas Montadoras). Como ocorre no Departamento de Carroceria, a Montagem também é subdividida em várias linhas de produção, constituídas de acordo com os componentes a serem montados e as regiões do veículo.

Uma possível configuração inicia-se com a montagem dos componentes internos à cabine, como painel de instrumentos, forração, comandos das portas, entre outros. A seguir, ocorre a elevação do veículo para a montagem dos elementos que ficam sob o veículo, como tubulação de freio e demais fluidos. Na sequência ocorre a junção do sistema de eixos, transmissão e motor, além da montagem dos bancos e rodas.

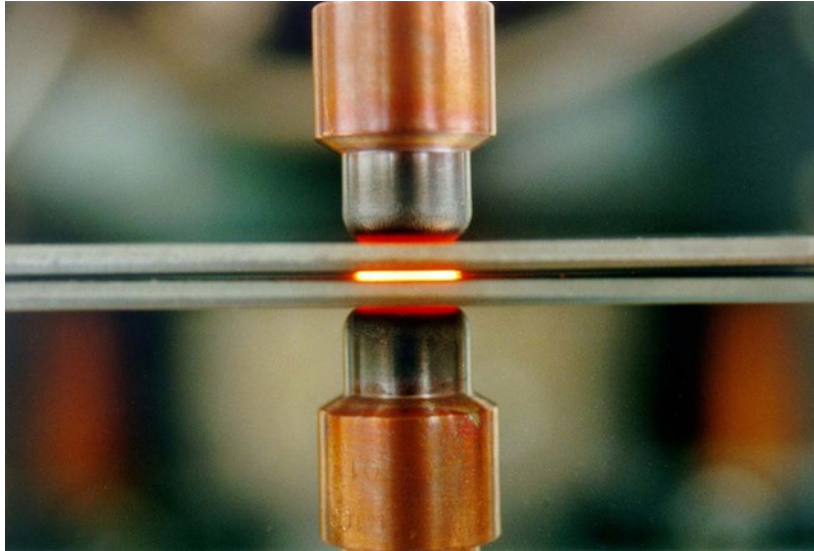
Após a ligação da bateria são realizados todos os ajustes e testes elétricos para assegurar o correto funcionamento do veículo, além da checagem de estanqueidade e demais controles de qualidade.

Uma característica importante dessa etapa na produção de um veículo é a grande diversidade de peças e modelos a serem utilizados (AGETHEN, 2016), o que torna o problema de layout e balanceamento de fluxo de produção muito desafiador. Além disso, a implementação de sistemas anti-erros (os chamados poka-yokes) é imprescindível para evitar não-conformidades que podem gerar riscos de segurança e a necessidade de recalls.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

Na indústria automobilística, é largamente utilizado o processo de soldagem a pontos por resistência. Segundo Marques (2017), a solda é obtida na região das peças colocada entre um par de eletrodos através da passagem de corrente elétrica (Efeito Joule), gerando fusão dos materiais, conforme mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Processo de soldagem a ponto por resistência.



Fonte: Aro (2020)

Os equipamentos utilizados para realizar essa operação são chamados de pinças de solda, conforme exemplificado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Equipamento de soldagem a ponto por resistência.



Fonte: *Direct Industry* (2020)

As pinças de solda podem ser operadas manualmente ou por robôs. A localização dos pontos a serem soldados é feita por meio de guias para a soldagem manual e para a solda robotizada a trajetória é programada por meio do sistema de coordenadas. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de linha de soldagem robotizada.

Figura 2.7 - Exemplo de linha de soldagem robotizada.



Fonte: *Libération* (2016)

Os parâmetros iniciais para o problema são: tipo de robô, tipo de pinça, a quantidade e coordenadas dos pontos de solda e a disposição atual dos robôs na linha de produção.

Historicamente, a distribuição dos pontos de solda para um novo modelo de veículo é realizada de forma empírica por similaridade com projetos anteriores e de acordo com as restrições físicas de acessibilidade, dependendo em grande parte das escolhas e experiência do programador dos robôs.

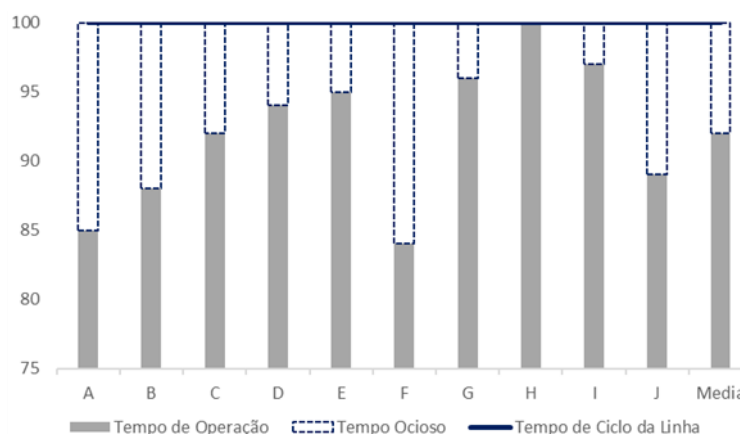
Existem softwares comerciais, como Process Simulate (Siemens Process Simulate, 2021), que fornecem uma primeira proposta de trajetória para os robôs, sendo que a primeira solução fornecida será sempre a de menor deslocamento para realizar os pontos de solda apresentados. Porém, por se tratar de peças com geometria complexa (RIGHETTO, 2005), dificilmente será possível aplicar essa solução na maioria dos casos práticos, devido, principalmente, ao conjunto de restrições apresentado. Esse conjunto de restrições representa basicamente as interferências mecânicas entre as peças a serem soldadas e o equipamento de solda.

2.3 O PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO

Um grande desafio da indústria é minimizar as diferenças entre os tempos operacionais das estações de trabalho de uma linha de produção para, com isso, otimizar a utilização da mão-de-obra e maquinário existente e, por conseguinte, sua produtividade. Por isso, a temática do balanceamento torna-se relevante como objeto de estudo.

Para reforçar a importância do balanceamento, o gráfico apresentado na Figura 2.8 representa o percentual de tempo efetivo operacional e ocioso em uma linha de produção flow shop hipotética, com tempo de ciclo de 100 unidades de tempo (ut). Para as linhas de produção em série, o tempo de ciclo é definido pelo posto de trabalho mais carregado, ou seja, aquele com maior tempo operacional, independentemente de as demais estações finalizarem suas tarefas antes.

Figura 2.8 - Ocupação das estações de trabalho de uma linha de produção.



Fonte: Autoria própria

Pela Figura 2.8, nota-se que existem lacunas de capacidade produtiva não aproveitada devido à diferença de balanceamento entre as estações de trabalho. Essa capacidade ociosa poderia ser utilizada para diminuir o tempo de ciclo total da linha (no exemplo em questão, em torno de 8%) ou mesmo no acréscimo de mais tarefas para as estações.

Esse tipo de problema deu origem ao chamado problema de balanceamento de linhas de montagem (ALBP – Assembly Line Balancing Problem), apresentado pela primeira vez por Salveson (1955). Na sequência, Jackson (1956) abordou os conceitos de indivisibilidade das tarefas e relações de precedência. O primeiro

estabelece que uma tarefa é o menor conjunto de atividades a ser considerado para o balanceamento, não podendo ser particionado. Já as relações de precedência representam as restrições temporais que condicionam a realização de determinadas tarefas à execução anterior de outras, limitando as possíveis soluções de acordo com as características do produto / linha de produção. Na sequência, Bowman (1960) propôs uma formulação em Programação Linear Inteira Mista para a solução desse problema, que posteriormente foi aperfeiçoada por White (1961). Esse problema também foi amplamente abordado por Scholl (1999), Becker e Scholl (2006), Scholl e Becker (2006), Boysen et al. 2007, Battaia e Dolgui (2013), Sikora et al. (2015), Sikora et al. (2017) e Lopes et al. (2020).

Segundo Baybars (1986), uma linha de produção pode ser considerada balanceada se a soma dos tempos ociosos de suas estações de trabalho for a menor possível. Teoricamente, uma linha de produção perfeitamente balanceada seria aquela em que os tempos operacionais de todas as estações de trabalho fossem exatamente iguais. Infelizmente, isso não é possível na maioria dos casos.

Algumas hipóteses simplificadoras foram propostas por Baybars (1986) ao ALBP, dando origem ao chamado Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem de Modelo Simples (SALBP – Simple Assembly Line Balancing Problem):

- 1) Todos os parâmetros de entrada são determinísticos e conhecidos;
- 2) As tarefas são indivisíveis e não podem ser repartidas entre as estações;
- 3) As tarefas não podem ser executadas em qualquer ordem e devem respeitar as relações de precedência para o problema;
- 4) Todas as tarefas devem ser executadas;
- 5) Todas as estações possuem as mesmas características;
- 6) O tempo de execução das tarefas é constante, independente da ordem em que forem executadas;
- 7) Qualquer tarefa pode ser executada em qualquer estação;
- 8) A linha de produção é em série (uma estação após a outra);
- 9) A linha é de Modelo Simples;
- 10) O tempo de ciclo é um parâmetro de entrada.

Os problemas do tipo SALBP podem ser divididos em quatro categorias (SCHOLL e BECKER, 2006), de acordo com a função objetivo: i) SALBP-1, quando o tempo de ciclo é dado e o objetivo é minimizar o número de estações; ii) SALBP-2,

quando o número de estações é dado e o objetivo é minimizar o tempo de ciclo; iii) SALBP-E, o mais abrangente, onde o objetivo é minimizar simultaneamente tempo de ciclo e quantidade de estações e iiiii) SALBP-F, quando o número de estações e o tempo de ciclo são dados e o objetivo é provar que existe solução factível para esses dados de entrada.

Algumas considerações adicionais relacionadas ao problema proposto são as de que os robôs possuem diferentes capacidades de acesso às tarefas, ou seja, existe um conjunto específico de pontos de solda que cada robô é capaz de executar (SCHOLL et al., 2010). Isso está ligado à escolha de ferramentas, que tem impacto significativo nos custos de uma instalação (BUKSHIN e TZUR, 2000). Outro fator de impacto no problema é que os robôs podem apresentar diferentes velocidades (RUBINOVITZ e BUKSHIN, 1991).

Devido às restrições impostas por essas hipóteses simplificadoras, nem sempre problemas do tipo SALBP podem descrever de maneira satisfatórias as linhas de produção reais. Por isso, algumas generalizações e combinações dessas hipóteses são consideradas nos Problemas de Balanceamento de Linhas de Montagem Generalizados (GALBP – General Assembly Line Balancing Problem). Entre elas, podem-se destacar: estações de trabalho paralelas, múltiplos operadores, seleção de ferramentas e a consideração de tempos improdutivos, entre outros. (BECKER & SCHOLL, 2006)

Nesse capítulo, vimos que as diversas etapas do processo produtivo apresentam suas características próprias e interfaces entre elas. Especificamente com relação à soldagem, os conceitos de distribuição de pontos de solda e programação de trajetórias de robôs são fundamentais para o entendimento e modelagem matemática do problema. Na sequência, esses conceitos serão utilizados para a caracterização da linha de produção que é objeto de estudo desse trabalho.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O desbalanceamento entre as estações de uma linha de produção implica impreterivelmente no desperdício de recursos, sejam eles humanos, máquinas, robôs, insumos, entre outros. Esse desperdício é oriundo da inatividade de estações de trabalho onde uma parte do tempo disponível para operação não é utilizada (BOYSEN et al., 2007; BATTAÏA e DOLGUI, 2013).

Essa capacidade ociosa poderia ser aproveitada na realização de mais tarefas, provenientes das estações com maiores tempos de ciclo, o que faria com que o tempo de ciclo total da linha pudesse ser diminuído, aumentando sua performance, sem a necessidade de grandes investimentos.

Outra oportunidade é redistribuir as tarefas de determinada estação entre as demais, com capacidade ociosa, e, com isso, eliminar essa estação da linha de produção. Os recursos provenientes dessa otimização podem ser aproveitados em outra parte do processo industrial. Entretanto, quando se avalia a possibilidade de realizar qualquer alteração na distribuição das operações na linha de produção, é fundamental mensurar o tempo necessário, além dos recursos e riscos associados.

Qualquer alteração na distribuição de pontos de solda implica na necessidade de disponibilidade da linha de produção para que possam ser realizadas a programação de parâmetros de solda e trajetória de robôs, além das validações e testes necessários.

Esse tipo de modificação, na maioria das vezes, deve ser realizado fora do horário produtivo, em intervalos de produção, normalmente muito reduzidos. Nas linhas de produção da indústria automotiva, onde muitas vezes são produzidos múltiplos modelos, a checagem de uma nova programação torna-se um trabalho significativamente oneroso, porque implica diversos testes de trajetórias para eliminar possíveis condições de colisão em todos os equipamentos envolvidos, com todos os modelos e trajetórias utilizadas. Além das trajetórias de produção, existem trajetórias de manutenção e setup que também precisam ser avaliadas.

Além das etapas citadas anteriormente, a validação da qualidade de solda faz-se necessária, haja vista que os veículos produzidos serão posteriormente finalizados e vendidos para o cliente. Essa validação requer ensaios destrutivos e não-destrutivos (MARQUES, 2017) que também demandam tempo e recursos preciosos da indústria.

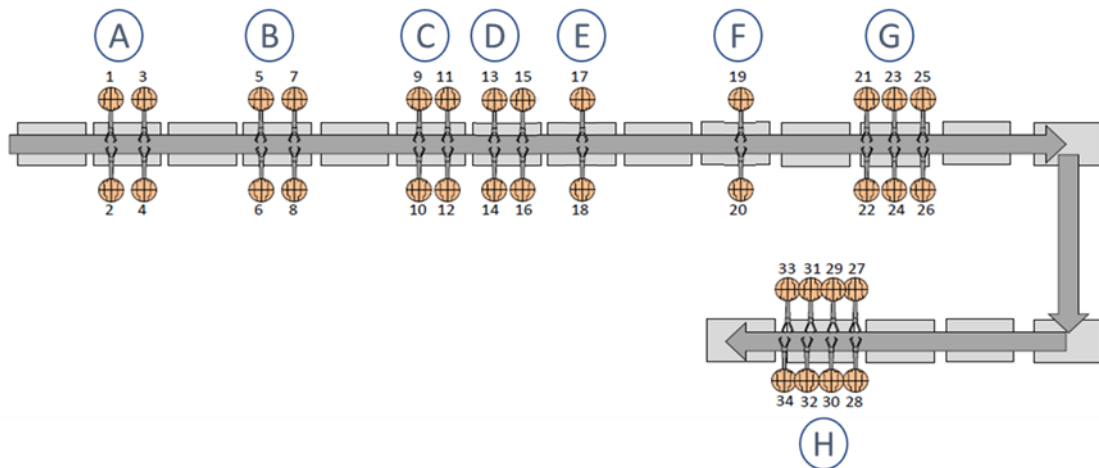
Outro aspecto importante é que essa divisão da linha em partes menores permite que esses trechos sejam avaliados independentemente, tornando possível a coleta de dados e compilação dessa parte da linha isoladamente, simplificando de maneira significativa seu estudo e a posterior implementação das melhorias.

Além disso, ao invés de buscar uma solução melhorada com possíveis trocas de tarefas em toda a linha de produção, o universo de busca será fracionado, fazendo com que inicialmente sejam testadas soluções apenas no interior de cada segmento avaliado. Pode-se comparar a eficácia desse balanceamento fragmentado com a solução do problema total para analisar a viabilidade de ambas, seus benefícios e o quanto onerosa é a implementação na prática.

3.1 A LINHA DE PRODUÇÃO – CONCEITOS BÁSICOS

A linha de produção em estudo é composta por trinta e quatro robôs, distribuídos em oito estações de solda, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Representação da linha de produção em estudo.



Fonte: Molina (2019) adaptado

É importante ressaltar algumas características dessa linha de produção, que devem ser observadas para a delimitação do problema. A primeira delas é de que tanto as estações de solda quanto os buffers (estoques) já estão alocados e são considerados como dados de entrada do problema, não sendo tratadas nesse trabalho possíveis alterações dessa configuração.

A quantidade, posição e tipo de robôs / pinças de solda instalados também são considerados dados iniciais que não podem ser alterados no problema de balanceamento parcial. A mudança na quantidade de robôs somente será permitida no segundo conjunto de ensaios desse trabalho, onde serão realizadas análises sobre aspectos relacionados à acessibilidade dos robôs e flexibilidade da linha de produção.

Outra consideração importante é de que não há relação de precedência entre as tarefas (pontos de solda) a serem executadas. Isso se deve ao fato de que nessa etapa do processo de produção o veículo já apresenta rigidez estrutural suficiente para que não ocorram deformações nem movimentação relativa entre seus componentes, não sendo necessário estabelecer uma sequência de pontos de solda.

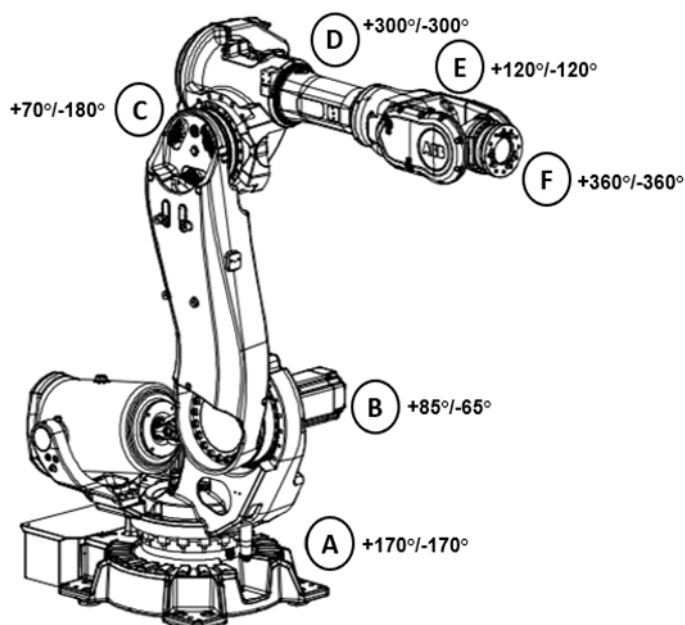
Trata-se, como dito anteriormente, de uma linha de produção com tipo de movimentação assíncrona entre as estações – isto é, a passagem de um veículo de uma estação à outra ou ao buffer seguinte independe das demais. Esse tempo de movimentação entre estações é considerado fixo e constante em toda a linha de produção.

Apesar de, na prática, tratar-se de uma linha de manufatura de modelo misto (mais de um tipo de produto sendo fabricado ao mesmo tempo), a similaridade entre a distribuição e quantidade de tarefas e tempo de ciclo das estações permite, com boa aproximação, tratar o problema como de uma linha de modelo simples – mesma consideração realizada por Lopes et al. (2017) e Molina (2019).

3.2 CONJUNTO DE RESTRIÇÕES

Uma das restrições mais básicas a ser observada está relacionada à quantidade de tarefas a ser executada por cada robô, o que tem influência direta no seu tempo de ciclo. Conforme estabelecido na seção anterior, a distância relativa entre robôs e veículos é fixa (não é permitido mover os robôs nem os veículos de posição). Com isso, existe uma limitação física de acesso do equipamento às posições onde devem ser executados os pontos de solda. Além disso, mesmo que a distância permita o acesso, existe uma limitação de movimentação dos eixos dos robôs, relacionado às suas características construtivas. Isso faz com que determinadas posições relativas entre esses eixos não possam ser alcançadas fisicamente, o que é conhecido como Limite de Eixo dos robôs (ABB, 2020). A Figura 3.2 apresenta uma representação esquemática de um robô com a indicação de seus limites de eixo.

Figura 3.2 - Representação dos limites de eixos de um robô.



Fonte: Abb (2020) adaptado

Mesmo que haja proximidade suficiente entre robô e veículo e que não ocorra restrição de limite de eixo, pode haver restrições impostas pelas próprias características geométricas dos componentes do veículo, como, por exemplo, a solda em cavidades ou locais estreitos. Por isso, existe uma diversidade de tipos de pinças de solda instaladas na linha, com variados formatos e tamanhos, para evitar colisões com a carroceria e obter a perpendicularidade necessária para garantir a qualidade da solda, conforme abordado no Capítulo 2. Sendo assim, não é possível que todos os conjuntos robô/pinça tenham capacidade de realizar qualquer ponto de solda indiscriminadamente. Torna-se, então, necessário estabelecer, para cada robô, um conjunto de pontos de solda possíveis de execução.

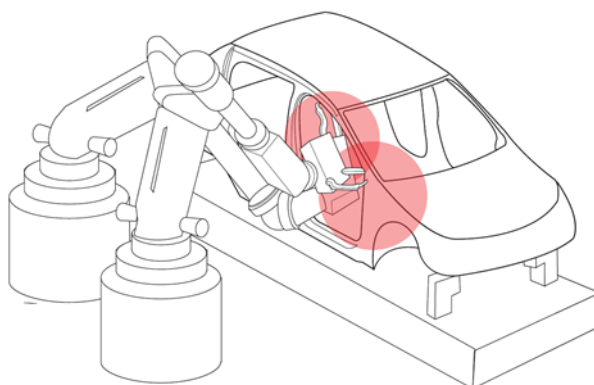
Outro fator de interesse é que numa linha de produção podem existir robôs com diferentes velocidades. Alguns podem ser mais lentos por serem de uma geração mais antiga ou mesmo devido ao peso do equipamento de solda do qual são portadores. Essa diferença deve ser considerada na modelagem do problema.

Existem outras limitações relacionadas à espessura das chapas metálicas versus capacidade de solda das pinças que no presente trabalho não foram

consideradas relevantes, mas que em determinados problemas tem influência e podem ser objeto de estudos posteriores para tornar o modelo ainda mais abrangente.

Até agora, foram observadas apenas restrições relacionadas a cada robô isoladamente. Entretanto, como pode-se observar na linha de produção em questão, dificilmente um robô trabalhará isolado em uma estação de trabalho – vide a estação de solda H, onde há quatro robôs trabalhando simultaneamente em cada lado do veículo. Assim sendo, é necessário estabelecer condições de restrição ao acesso de dois ou mais robôs de forma simultânea em uma mesma região para minimizar o risco de colisões, durante a execução das trajetórias. Normalmente impõe-se uma condição de espera – enquanto um robô trabalha naquela região, o outro aguarda para se aproximar. Esse tempo ocioso não é negligenciável e deve também ser considerado na formulação do problema. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de colisão entre robôs atuando numa mesma região.

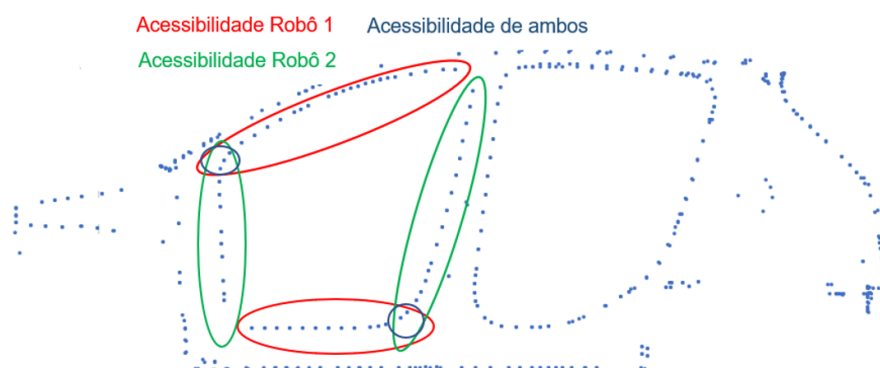
Figura 3.3 - Colisão de robôs atuando na mesma região de solda.



Fonte: Lopes *et al.* (2017)

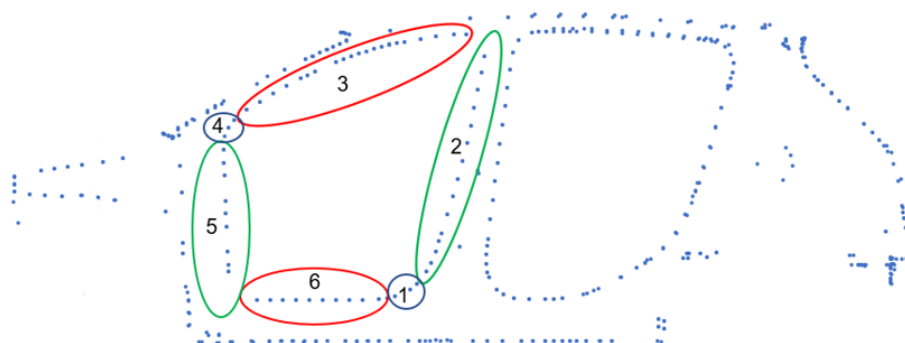
Para a modelagem do problema, Lopes *et al.* (2017) agruparam os pontos de solda de acordo com a acessibilidade de cada robô em conjuntos denominados Regiões. Pela Figura 3.4 pode-se verificar os pontos de solda circulos em vermelho que são passíveis de ser realizados pelo robô 1. De maneira semelhante, os pontos circulos em verde podem ser efetuados pelo robô 2. Nota-se também que existem pontos de solda que podem ser efetuados tanto pelo robô 1 quanto pelo robô 2, destacados em azul. Cada um desses conjuntos de pontos de solda será daqui em diante denominados como uma Região, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.4 - Representação esquemática dos pontos de solda



Fonte: Autoria própria

Figura 3.5 - Representação esquemática das regiões de solda.



Fonte: Autoria própria

Note que as regiões 1 e 4, na Figura 3.5, foram criadas devido à sobreposição de acessibilidade dos robôs 1 e 2. Essa discriminação é necessária para permitir explorar soluções com ambos os robôs nessas regiões.

Conforme apresentado por Lopes et al. (2017), o tempo de solda pode ser dividido entre a movimentação do robô de um ponto ao próximo e o tempo de soldagem propriamente dito. Pode-se verificar na Figura 3.5 que as regiões 1 e 2, 2 e 3 e as subsequentes possuem uma interface em seus limites, o que permite que não haja necessidade de grandes deslocamentos ou reorientação de eixos caso um mesmo robô esteja efetuando a solda em ambas as regiões.

Os conceitos abordados nesse capítulo, referentes à Regiões e Acessibilidade, serão amplamente utilizados na sequência, para a modelagem matemática do problema.

4 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA

Nesse capítulo, será descrita a modelagem matemática do problema proposto. Trata-se de uma revisão dos conceitos abordados por Lopes et al. (2017) com a introdução das modificações necessárias para o balanceamento parcial da linha de produção e a consideração de alteração na quantidade de robôs. Na seção 4.1 será apresentada a função objetivo, os parâmetros e tuplas. Na sequência, serão apresentadas as variáveis de decisão, na seção 4.2. Por último, na seção 4.3, será discutido o conjunto de restrições.

4.1 FUNÇÃO OBJETIVO, PARÂMETROS E TUPLAS

4.1.1 Função Objetivo

O caso prático estudado nesse trabalho é de uma linha de produção já instalada e operacional, onde procura-se diminuir seu tempo de ciclo, seja para acrescentar mais tarefas, aumentar o volume de produção ou mesmo preservar a vida útil dos equipamentos. Para isso, propõe-se dividir a linha de produção em i conjuntos de estações de trabalho e resolver a função objetivo para cada um desses conjuntos. Essa abordagem é baseada nos conceitos apresentados por Lopes et al. (2017), porém com a divisão do problema em partes, espera-se obter um menor tempo computacional.

Além disso, propõe-se mensurar o impacto no tempo de ciclo ocasionado pela redução ou aumento da quantidade de robôs, oriunda, por exemplo, da necessidade de uma alteração de volumes de produção. Outros problemas podem ser estudados como a redução de investimento em equipamentos, maximizar a quantidade de pontos de solda para um dado um tempo de ciclo, reduzir o número de estações de solda, entre outros, que não fazem parte do escopo desse trabalho.

A função objetivo é dada por

$$\text{Minimizar } Z_i = vCT_i \quad \forall i \in I \quad (4.1)$$

onde o tempo de ciclo da linha de produção (vCT_i) corresponde ao máximo tempo

de ciclo dos i grupos de estações. E o tempo de ciclo de uma estação é dado pelo maior tempo de operação entre os robôs que compõem essa estação de trabalho, o que pode ser descrito pela inequação 5.2

$$vCT_i \geq vCTW_\omega \quad \forall i \in I, \omega \in W \quad (4.2)$$

4.1.2 Tuplas e Parâmetros

Uma estratégia que permite simplificar a modelagem do problema é o conceito de Tuplas, que será amplamente utilizado na sequência do trabalho.

Esse conceito foi utilizado por Hillier e Liebermann (2015) para a resolução de um problema de minimização do custo de transporte de produtos dado um conjunto de n origens e m destinos. Devido à definição do problema, alguns destinos somente poderiam ser alcançados por um pequeno subconjunto de origens. Para introduzir essa restrição no modelo matemático, há, a priori, duas possibilidades:

- A primeira seria atribuir um custo muito expressivo para as rotas “proibidas”, fazendo com que estas fossem significativamente menos atrativas na solução do problema. Entretanto todas essas rotas seriam analisadas, mesmo sendo ineficazes, utilizando tempo computacional para isso.
- A segunda alternativa seria a consideração de que todas as rotas “proibidas” teriam o valor das variáveis zero, o que implica na adição de mais uma condição de restrição ao modelo.

Adote-se que os pares origem / destino factíveis (chamados Tuplas) sejam definidos como parâmetros de entrada do problema e formem um conjunto. O espaço de busca da função objetivo seria limitado aos valores pertencentes a esse conjunto de Tuplas, o que elimina a necessidade de avaliar soluções sabidamente ineficazes ou adicionar mais restrições à formulação matemática. Segundo Sikora, Lopes e Magatão (2015), a modelagem com Tuplas pode conduzir a melhores resultados computacionais.

Dependendo das características do problema, os parâmetros e dados de entrada apresentam valores reais positivos, como o tempo de ciclo, valores inteiros positivos, como a quantidade de pontos de solda, vetores inteiros para as relações de precedência e acessibilidade, entre outros.

Tabela 4.1 - Conjuntos e Tuplas usados no modelo de base.

Conjunto	Tuplas	Significado
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 pertence à estação de solda s
WRA	(w, r, a)	Indica que o robô w é capaz de acessar a região r através do acesso a
WA	(w, a)	Indica que o robô w é capaz 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 pode fazer uso da adjacência entre as regiões r_1 e r_2 através do acesso a
WAA	(w, a_1, a_2)	Indica que o robô w pode utilizar a 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 possui capacidade de atuar no ciclo de regiões cr
WCA	(w, ca)	Indica que o robô w possui capacidade de atuar no ciclo de regiões ca
WEM	(w, em)	Indica que o robô w pode acessar a macrorregião com disputa de espaço em
WCM	(w, cm)	Indica que o robô w pode acessar a macrorregião de cruzamento cm
EMR	(em, r)	Indica que a região r pertence à macrorregião de disputa de espaço em
CMR	(cm, r)	Indica que a região r pertence à macrorregião de cruzamento cm
$WMWM$	(w_1, m_1, w_2, m_2)	Indica que o robô w_1 não é capaz de acessar a macrorregião de cruzamento m_1 ao mesmo tempo em que o robô w_2 está acessando a macrorregião de cruzamento m_2
EA	a	Indica que o acesso a controla a restrição de disputa de espaço

Fonte: Molina (2019)

A partir desse momento, todos esses conjuntos de valores serão identificados como Tuplas, adotando-se a mesma notação utilizada por Lopes et al. (2017) e Molina (2019). As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os conjuntos de Tuplas utilizados na formulação do modelo de base apresentado por Lopes et al. (2017) e Molina (2019).

Para melhor visualização dos dados, os parâmetros serão representados por letras maiúsculas e as variáveis por letras minúsculas. Assim, a letra R representa as

regiões, A os acessos, S indica as estações de solda, W os robôs, C os ciclos, T refere-se ao tempo, N às quantidades e M às macrorregiões.

O significado detalhado e sua utilização serão discutidos nas seções seguintes. Além das tuplas apresentadas, existem outros parâmetros numéricos como o tempo, número de pontos de solda e velocidades, que são indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros de ocorrência, controle de tempo e interferência.

Parâmetro	Conjunto	Tupla	Significado da Parâmetro
T_s	-	-	Tempo de transferência de peças entre as estações de solda s
N_r	R	r	Número de pontos de solda em uma região r
T_r	R	r	Tempo de soldagem para os pontos da região r
T_w	W	w	Tempo de soldagem para o robô w
V_w	W	w	Velocidade do robô w
T_{movR}	-	-	Tempo de movimentação entre regiões
T_{movA}	-	-	Tempo de movimentação entre acessos
T_{adjR}	-	-	Ganho de tempo devido à adjacência entre regiões
T_{adjA}	-	-	Ganho de tempo devido à adjacência entre acessos
U_p	-	-	Limite superior de pontos de solda por robô para regiões com disputa de espaço
D_p	-	-	Decréscimo na quantidade de pontos por robô em regiões com disputa de espaço

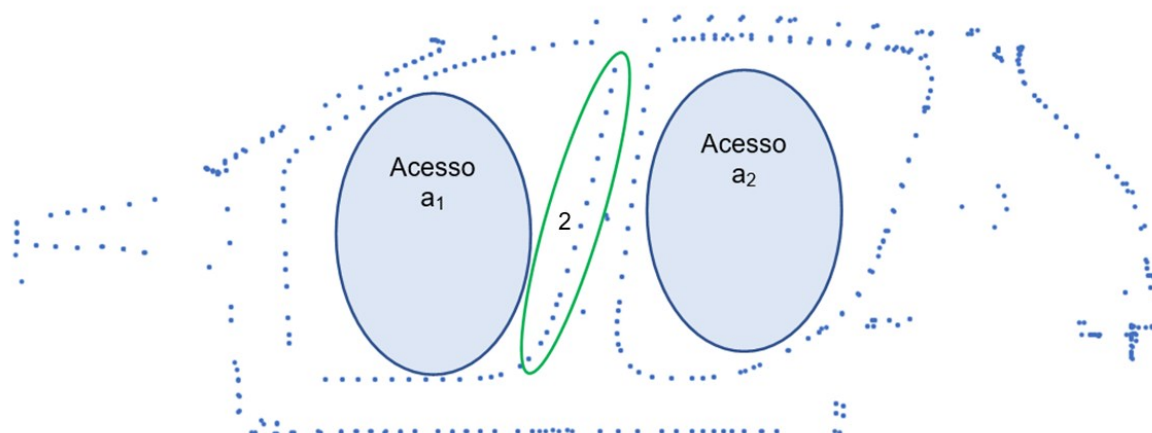
Fonte: Molina (2019)

4.1.3 Acessibilidade

A acessibilidade às regiões de solda é definida principalmente pela distância dos robôs à região em questão, limite de eixo (acesso) e interferência física do robô com o veículo. Nesse modelo, dois conjuntos de Tuplas são usados para descrever quais regiões os robôs podem acessar e de que maneira.

Para acessar a região de solda 2 da Figura 4.1, nota-se que é possível utilizar a porta dianteira e a porta traseira para execução dos pontos de solda, dependendo obviamente das demais restrições – alcance do robô, formato da pinça, entre outros.

Figura 4.1 - Representação esquemática dos acessos de solda.



Fonte: Autoria própria

Assim sendo, um determinado robô pode fazer uso do acesso a_1 ou do acesso a_2 para realizar operações de solda na região 2. A representação matemática é feita pelo conjunto WA de tuplas (w, a) que descreve quais acessos a cada robô w é capaz de utilizar para alcançar as regiões de solda. Essa informação será utilizada para o cálculo do tempo de movimentação entre regiões, utilizando o conceito das regiões adjacentes.

Mas ainda é necessário definir em quais regiões os robôs podem efetivamente realizar a soldagem, respeitando o conjunto de restrições anteriormente citado. Para isso, faz-se uso do conjunto WRA de Tuplas (w, r, a) onde se define quais regiões r determinado robô w pode acessar, utilizando os acessos a .

Obviamente não faz sentido considerar acessibilidade a robôs que não possuem capacidade de soldagem em nenhuma região que pode ser alcançada por aquele determinado acesso, então, para cada conjunto de Tuplas (w, a) sempre haverá um correspondente conjunto (w, r, a) .

4.1.4 Controle de Movimentação dos Robôs

Como mencionado anteriormente, é necessário mensurar a quantidade de movimentações entre regiões que um robô executa durante sua trajetória, considerando as adjacências e necessidade de uso de um ou mais acessos – o que implica um tempo de movimentação maior.

O conjunto RR de Tuplas (r_1, r_2) descreve quais regiões r_1 e r_2 são adjacentes uma à outra. Entretanto, é necessário eliminar a possibilidade de ocorrência de algumas inconsistências que podem conduzir a erros na solução do problema, tais como considerar em duplicidade uma adjacência (r_1, r_2) e (r_2, r_1) , além da adjacência de uma região com ela mesma (r_1, r_1) , o que não tem significado prático. Para isso, a restrição $(r_2 > r_1)$ é aplicada para todas as regiões em RR .

Na sequência, é necessário definir o conjunto $WRRA$ de Tuplas (w, r_1, r_2, a) que descreve de quais adjacências (r_1, r_2) o robô w pode se beneficiar utilizando o acesso a . Essa definição é necessária porque no caso de um robô acessar duas regiões de solda adjacentes por acessos diferentes, não há decréscimo nenhum de tempo de movimentação a ser considerado. Além disso, existe a possibilidade de, mesmo sendo duas regiões adjacentes, um determinado robô não poder se beneficiar dessa adjacência devido às restrições geométricas, por exemplo. Por isso é necessário considerar essa informação na preparação do modelo.

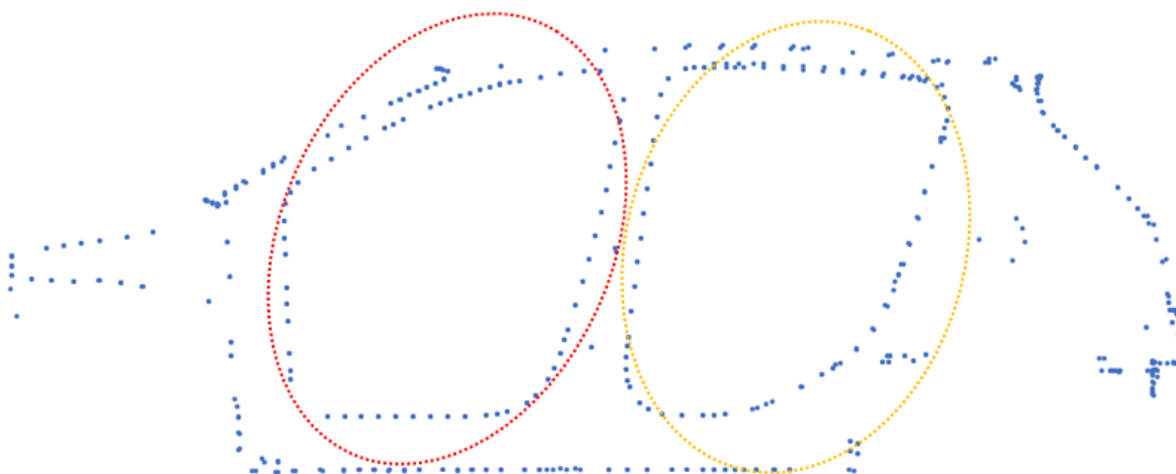
O conjunto CR de Tuplas (c, r) descreve quais regiões r formam o ciclo de regiões c . Esse conjunto é utilizado para evitar possíveis erros na quantidade de adjacências a ser computado e será usado em uma das condições de restrição no próximo capítulo.

De maneira análoga à definição das adjacências entre regiões, é necessário definir as adjacências entre acessos, através do conjunto WAA de Tuplas (w, a_1, a_2) , descrevendo de quais adjacências entre os acessos a_1 e a_2 o robô w pode se beneficiar.

4.1.5 Controle de Interferências entre os Robôs

Para criação das restrições de interferência entre os robôs são utilizadas as definições de acessos e macrorregiões. É necessário avaliar quais acessos os robôs podem fazer uso para trabalhar em determinada macrorregião para delimitar as possíveis interferências entre eles. A Figura 4.2 apresenta um exemplo de macrorregiões de solda.

Figura 4.2 - Macrorregiões de interferência



Fonte: Autoria própria

O conjunto EMR de tuplas (em, r) descreve quais regiões apresentam disputa de espaço entre as macrorregiões.

Além dos parâmetros já mencionados, é necessário definir a quantidade máxima de pontos de solda que um robô pode executar em um acesso, caso trabalhe sem interferência de outro robô Up e o decréscimo a essa quantidade caso haja disputa de espaço Dp . Na prática, esses valores são usados para mensurar a perda associada à disputa de espaço com dois robôs trabalhando ao mesmo tempo.

Com relação à restrição de cruzamento entre robôs, o parâmetro de controle é o conjunto EMC de tuplas (em, c) , o qual indica quais regiões fazem parte da macrorregião de cruzamento. Em complemento, a tupla $WMWM$ indica as combinações entre robôs e as respectivas macrorregiões passíveis de cruzamento - obviamente robôs localizados dentro da mesma estação de solda e do mesmo lado da linha de produção. Além disso, os conjuntos WEM e WCM contêm os robôs que podem trabalhar em regiões com disputa de espaço e com possibilidade de cruzamento. Esses conjuntos são necessários para a definição das variáveis para as restrições de interferência.

4.1.6 Demais Parâmetros

Em complemento às definições anteriores, existem mais alguns parâmetros que serão utilizados para a modelagem do problema. O grupo de todas as estações da linha produção é designado por S . R é o conjunto das regiões, assim como W é o conjunto dos robôs. Além disso, a quantidade de pontos de solda por região é definida pelo parâmetro Nr , com um tempo de solda Tr , definido de acordo com as características de espessura de chapa, principalmente. De maneira similar, cada robô tem um tempo de solda T_w , relacionado ao tempo de abertura/fechamento da pinça e à potência do transformador de solda, entre outros fatores. Além disso, a velocidade de cada robô é definida por V_w - isto porque pode haver uma diversidade de modelos de robôs, mais antigos ou mais modernos, com velocidades diferentes.

Com relação à duração da movimentação entre regiões é usado o parâmetro T_{movR} . Assim como o parâmetro T_{movA} é usado para definir o tempo de movimentação entre acessos.

Não se pode esquecer de considerar os decréscimos na movimentação entre regiões e acessos adjacentes, considerados por T_{adjA} e T_{adjR} , respectivamente. O tempo de movimentação dos veículos entre estações é definido por TS .

4.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO

A resposta dos modelos de otimização está fundamentada na escolha das variáveis de decisão, que devem estar diretamente ligadas ao que está sendo otimizado e fornecer alternativas para se aproximar da solução ótima.

Um modelo de balanceamento em programação linear inteira mista é composto de variáveis de diferentes tipos. Na modelagem proposta são usados três tipos de variáveis, definidas por Williams (2013) como:

- Variáveis Reais – apresentam valores contínuos, principalmente usadas para os parâmetros de tempo e de velocidades;
- Variáveis Inteiras – possuem valores inteiros positivos e representam quantidades que não podem ser fracionadas, como um ponto de solda – já que não existe “meio” ponto de solda;
- Variáveis Binárias – usadas para decisões do tipo sim ou não, retornam o valor 1, caso afirmativo ou o valor 0, caso contrário. Por exemplo, são

utilizadas para definir se um robô pode realizar pontos de solda através de um acesso específico.

A notação usada para identificar as variáveis foi mantida do trabalho original (LOPES et al., 2017; MOLINA, 2019). O tipo da variável é identificado pela sua primeira letra, sendo b utilizado para variáveis binárias, n para variáveis inteiras e v para variáveis reais. A Tabela 4.3 apresenta o conjunto de variáveis desse problema, seu tipo e significado.

O principal objetivo do modelo é encontrar a distribuição de pontos de solda que possibilite se aproximar do menor tempo de ciclo na linha de produção. Por isso, a principal decisão é quantos pontos de solda cada robô irá aplicar, em cada região e via qual acesso. Assim, a principal variável de decisão é $nWRA$. As demais variáveis estão ligadas de maneira direta ou indireta à essa variável (SIKORA et al., 2017). Mas, para calcular quantos pontos de solda cada robô deve aplicar, é necessário definir através da variável binária $bWRA$ em quais regiões e acessos os robôs podem atuar.

Tabela 4.3 - Conjuntos de variáveis e seus significados.

Variável	Tupla	Significado da Variável
vCT_i	-	Tempo de Ciclo do grupo i
$vCTW$	w	Tempo de ciclo do robô w
nMR	w	Número de movimentos entre regiões realizado pelo robô w
nMA	w	Número de movimentos entre acessos realizado pelo robô w
bWA	(w, a)	Variável binária que define se o robô w usa o acesso a
$nWRA$	(w, r, a)	Número de pontos de solda realizados pelo robô w na região r através do acesso a
$bWRA$	(w, r, a)	Variável que indica se o robô w realiza algum ponto de solda na região r através do acesso a
$bWRRR$	(w, r_1, r_2, a)	Binária que indica que o robô w utiliza a adjacência entre as regiões r_1 e r_2 através do acesso a
$bWAA$	(w, a_1, a_2)	Binária que indica que o robô w utiliza a 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, cm)	Binária que indica que o robô w efetua pontos de solda em uma região com interferência por cruzamento cm

Fonte: Molina (2019) adaptado

Os demais conjuntos de variáveis respondem a questões similares, porém, se referindo ao uso dos acessos pelos robôs, onde a variável bWA é definida para cada tupla no conjunto WA .

Há duas variáveis inteiras para contagem das movimentações dos robôs: nMR para movimentos entre regiões e nMA para movimentos entre acessos. A consideração dessas movimentações é fundamental para se chegar a um tempo de ciclo representativo da condição real. Quanto mais movimentos o robô fizer, maior será sua trajetória e o tempo necessário. Em contrapartida, as movimentações devem ter um decréscimo no caso de o robô fazer uso das adjacências, conforme mencionado anteriormente. Para isso, as variáveis binárias $bWRR$ e $bWAA$ definem de quais adjacências entre regiões e acessos, respectivamente, o robô W pode se beneficiar em sua trajetória.

Foram definidas as variáveis binárias $bWEM$ e $bWCM$ para delimitar as possíveis interferências por disputa de espaço e cruzamento, que devem ser contabilizadas como uma penalização ao tempo de ciclo. O tempo de ciclo é representado pela variável real positiva vCT_i .

4.3 RESTRIÇÕES

Com as variáveis de decisão definidas, é necessário aplicar as restrições ao modelo para aproximá-lo da condição real da linha de produção. As restrições apresentadas aqui são as originalmente propostas no modelo de base de Lopes et al (2017). Foram definidos três tipos de restrições: i) a primeira de que todos os pontos de solda têm que ser realizados; ii) restrições ligadas ao tempo de solda e velocidades dos robôs e suas movimentações entre regiões e adjacências e iii) as restrições de interferência para evitar soluções infactíveis fisicamente, respeitando as distribuições dos robôs pelas estações de trabalho.

4.3.1 Ocorrência dos Pontos de Solda

Essa restrição é utilizada para garantir que todos os pontos de solda propostos no problema sejam considerados na solução. Isso implica que para cada região r a soma dos pontos efetuados deve ser igual à contagem total de pontos daquela referida

região. As restrições de acessibilidade estabelecem que apenas robôs que podem acessar determinada região podem efetuar pontos de solda nela. Para garantir essa condição, é usada a tupla WRA . A equação 4.3 define essa restrição em termos matemáticos:

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

4.3.2 Tempo de Ciclo

Como mencionado anteriormente, o tempo de ciclo da linha de produção em estudo (que é considerada como de Modelo Simples) é dado pelo tempo de ciclo de sua estação de trabalho mais carregada, que, por sua vez, é ditado pelo tempo de ciclo de seu robô mais carregado. A inequação 4.4 apresenta a formulação matemática para definir esse tempo de ciclo, baseada nos tempos de solda, movimentações e adjacências entre regiões e acessos.

$$\begin{aligned} vCTW_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)} + \\ & + nMR_w \cdot \frac{T_{mov R}}{V_w} + \\ & + nMA_w \cdot \frac{T_{mov A}}{V_w} - \\ & - \frac{T_{adj R}}{V_w} \cdot \sum_{(w,r_1,r_2,a) \in WRRR} bWRRR_{(w,r_1,r_2,a)} - \\ & - \frac{T_{adj A}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \in WAA} bWAA_{(w,a_1,a_2)} + \\ & + T_s \quad \forall (w,s) \in WS \end{aligned} \quad (4.4)$$

O primeiro termo dessa inequação ($\sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)}$) contabiliza o tempo utilizado pelos robôs para a realização dos pontos de solda, que é composto pela soma do tempo do robô mais o tempo efetivo de solda multiplicado pela quantidade de pontos efetuados.

O segundo termo ($nMR_w \cdot \frac{T_{movR}}{V_w}$) representa o tempo gasto em movimentações entre regiões pelo robô. O quociente representa a velocidade do robô, que pode variar dependendo do fabricante, modelo e estado de conservação.

Na sequência, de maneira análoga ao termo anterior, é contabilizado o tempo de movimentação entre os acessos realizado pelo robô, representado pelo termo ($nMA_w \cdot \frac{T_{movA}}{V_w}$).

A partir daí, devem ser considerados os decréscimos aos tempos de movimentação entre regiões e acessos adjacentes, isso porque o conceito de adjacência implica em tempos de movimentação menores, haja vista a proximidade entre essas regiões e acessos. Os termos

$$\left(\frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{(w,r_1,r_2,a) \in WRRR} bWRRR_{(w,r_1,r_2,a)}\right)$$

e

$$\left(\frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \in WAA} bWAA_{(w,a_1,a_2)}\right)$$

representam a consideração das adjacências entre regiões e acessos, respectivamente.

Finalmente, o termo (T_s) é utilizado para representar o tempo de entrada e saída dos veículos das estações de solda, que pode variar de uma estação para outra.

Para calcular o tempo de ciclo, nota-se pela inequação 4.4 que, além de somar o tempo necessário para a soldagem, através da quantidade de pontos de solda efetuados, é necessário considerar as movimentações dos robôs. Essa formulação matemática é complexa, devido às diversas amplitudes de movimentos e restrições associadas. Para mensurar esses movimentos, deve-se antes delimitar em quais regiões e acessos cada robô pode atuar. Isso é feito através dos conjuntos de variáveis binárias $bWRA$ e bWA . Essas variáveis são controladas através das restrições apresentadas pelas inequações 4.5 e 4.6.

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

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

O princípio utilizado para a restrição representada pela inequação 4.5 é o de que se ao menos um ponto de solda é realizado em determinada região pelo robô W , então a variável $bWRA$ deve assumir o valor um (afirmativo), assim ocorrendo caso o segundo termo dessa inequação seja maior do que zero.

A inequação 4.6 utiliza esse mesmo princípio, apresentando a consideração de que se a variável $bWRA$ possui valor um, implica que o robô W pode utilizar o acesso A . Assim, a variável bWA terá valor zero caso a variável $bWRA$ possua valor zero e terá valor um caso a variável $bWRA$ apresente o mesmo valor.

A partir dessas definições, pode-se proceder à contagem da quantidade de movimentações que o robô executa na trajetória em análise. Para isso, serão utilizadas as variáveis nMR_w e nMA_w , para contar os movimentos entre regiões e acessos, respectivamente.

A partir do princípio de que cada robô acessa ao menos uma região para executar a soldagem, a quantidade de movimentações entre regiões será igual à quantidade de regiões visitadas menos um. Assim, se um robô solda pontos em duas regiões, realizará um movimento entre regiões (para se deslocar da primeira para a segunda região de solda). A equação 4.7 apresenta a formulação matemática dessa contagem.

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

De maneira similar, a contagem da quantidade de movimentos entre acessos é dada pela equação 4.8.

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

Para a sequência do cálculo do tempo de ciclo pela inequação 4.4, é necessário definir de quais adjacências entre regiões e acessos o robô W pode se

beneficiar durante a execução da trajetória em estudo. Para isso, são estabelecidas as inequações 4.9 e 4.10.

$$bWRA_{(w,r_1,r_2,a)} \leq bWRA_{(w,r_1,a)} \quad \forall (w, r_1, r_2, a) \in WRA \quad (4.9)$$

$$bWRA_{(w,r_1,r_2,a)} \leq bWRA_{(w,r_2,a)} \quad \forall (w, r_1, r_2, a) \in WRA$$

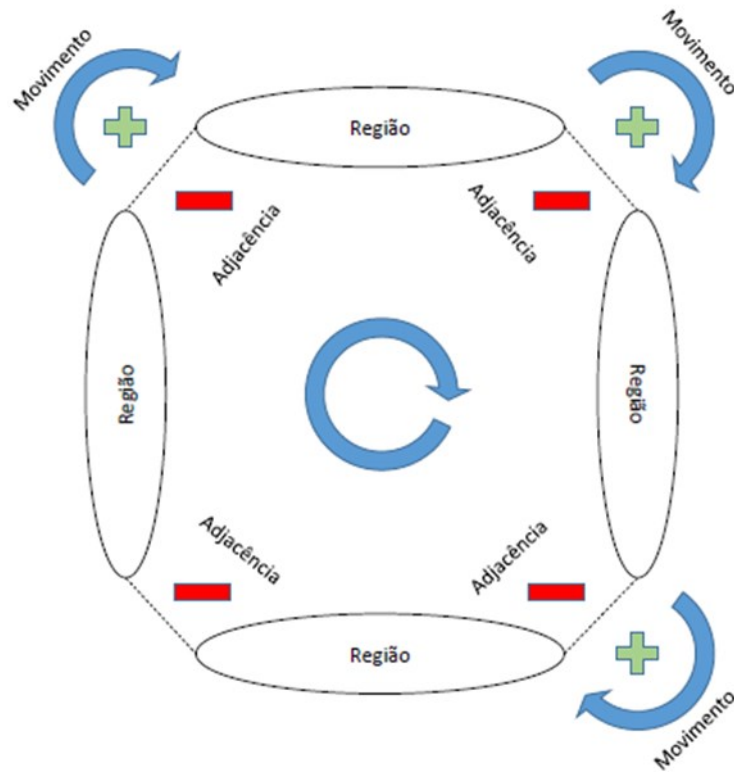
Note que as inequações 4.9 conseguem traduzir para a linguagem matemática a condição real da linha de produção, já que a adjacência somente será considerada se ambas as inequações apresentarem o valor um, ou seja, se o robô W estiver efetivamente realizando pontos de solda nas regiões r_1 e r_2 , consideradas adjacentes na definição do problema. Da mesma forma, a adjacência entre acessos é considerada pelas inequações 4.10.

$$bWAA_{(w,a_1,a_2)} \leq bWAA_{(w,a_1)} \quad \forall (w, a_1, a_2) \in WAA \quad (4.10)$$

$$bWAA_{(w,a_1,a_2)} \leq bWAA_{(w,a_2)} \quad \forall (w, a_1, a_2) \in WAA$$

Entretanto, deve-se ter atenção para evitar possíveis incoerências na contagem dessas adjacências, tanto entre regiões quanto entre acessos. Pode haver uma contagem em duplicidade no caso específico em que um robô inicia sua trajetória em uma região e termina seu ciclo em uma região que possui adjacência com a primeira, no caso de todas as regiões intermediárias acessadas também possuírem adjacência entre si (MOLINA, 2019). A Figura 4.3 ilustra essa possível condição: caso um robô atue nas quatro regiões de solda, deve se beneficiar das três adjacências entre elas, já que realiza três movimentos entre regiões, porém, a última adjacência não deve ser considerada.

Figura 4.3 - Ciclo de adjacências.



Fonte: Molina (2019)

Para isso, são estabelecidas mais duas restrições relacionadas ao número máximo de adjacências das quais um robô pode se beneficiar em um ciclo de adjacências, dadas pelas equações 4.11 e 4.12.

$$\sum_{\substack{(c,r_1) \in CR \\ (c,r_2) \in CR \\ (w,r_1,r_2,a) \in WRA}} bWRA_{(w,r_1,r_2,a)} \leq -1 + \sum_{(c,r) \in CR} 1 \quad \forall (w,c) \in WCR \quad (4.11)$$

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

Ainda com relação às adjacências, deve-se limitar o uso de adjacência entre regiões pelo mesmo robô, utilizando o mesmo acesso, a um, isso para evitar uma

possível duplicidade nessa contagem que ocasionaria um tempo de ciclo menor que o real. Nesse mesmo sentido, é necessário garantir que para cada região podem ser consideradas no máximo duas adjacências por robô, haja vista que cada robô executa uma única trajetória durante seu ciclo de produção para cada modelo de produto. Essas duas restrições são modeladas pelas inequações 4.13 e 4.14.

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

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

4.3.3 Cruzamentos e Disputas de Espaço

Esse conjunto de restrições permite evitar que a resposta dada pelo modelo apresente uma condição que na prática não seja possível implementar, seja devido ao risco de colisão entre robôs no caso dos cruzamentos, seja pela limitação de movimentos ocasionada pela proximidade física entre robôs atuando na região, ao mesmo tempo. Para isso, foram estabelecidas as inequações 4.15 e 4.16, apresentadas a seguir.

No caso de cruzamentos entre robôs, a inequação 4.15 estabelece, de maneira restritiva, que para os pares de robôs e macrorregiões de cruzamento (w_1, m_1) e (w_2, m_2) somente será permitido o acesso de um robô de cada vez, eliminando assim a possibilidade de cruzamento entre eles.

$$bWCM_{(w_1,m_1)} + bWCM_{(w_2,m_2)} \leq 1 \quad \forall (w_1, m_1, w_2, m_2) \in WMWM \quad (4.15)$$

Com relação às disputas de espaço, caso haja mais de um robô atuando ao mesmo tempo através do mesmo acesso, é aplicada uma limitação na quantidade de

pontos de solda que cada um pode executar. Para isso, são utilizados os parâmetros U_p e D_p . O primeiro representa a quantidade de pontos que o robô pode efetuar caso haja a condição de disputa de espaço. Em acréscimo, o parâmetro D_p estabelece um incremento nesse valor caso essa restrição não exista. Essa limitação permite um sequenciamento das tarefas de cada robô. A formulação dessa restrição é apresentada pela inequação 4.16.

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

$$\forall (a \in EA), (s \in S) \quad (4.16)$$

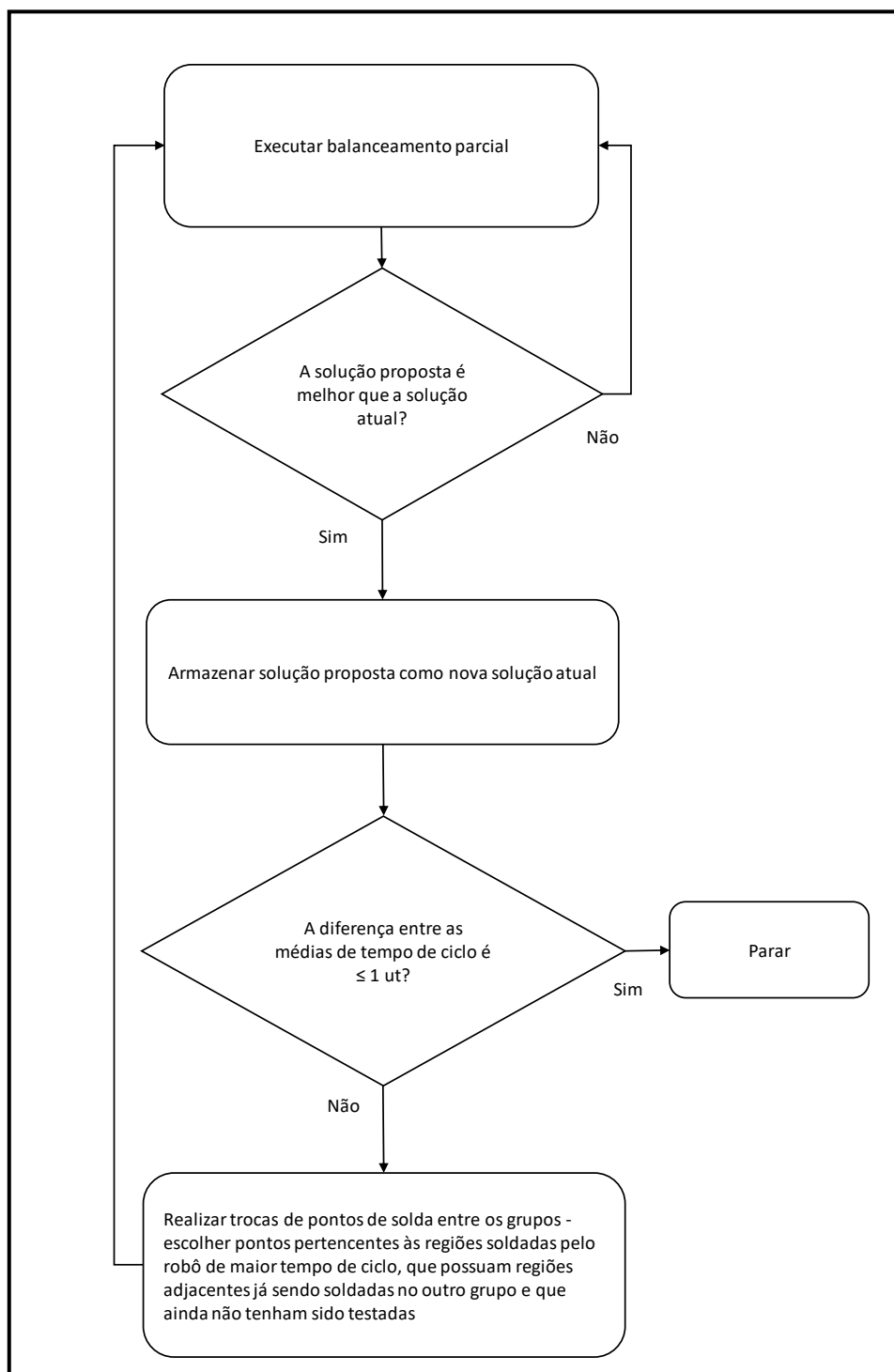
4.3.4 Método para o Balanceamento Parcial

O método proposto para o balanceamento parcial pode ser descrito pelo fluxograma apresentado na figura 4.4.

A primeira premissa para definição dos grupos é de que uma estação de solda deve permanecer indivisível independentemente de qual grupo venha a fazer parte. Isso se deve à necessidade de considerar as interferências por disputa de espaço e cruzamento que ocorrem entre robôs atuando na mesma estação de solda. Caso isso não fosse considerado, o modelo poderia encontrar soluções que na prática não poderiam ser implementadas.

Para analisar a coerência da divisão em grupos, propôs-se comparar a média de pontos de solda por robô em cada grupo. Essa comparação faz sentido devido à linha de produção apresentar apenas uma técnica de soldagem - solda a ponto por resistência - e possuir a mesma característica (soldagem final dos veículos - Respot). Devido às características da linha de produção, como o conjunto de restrições, regiões e ferramentas de solda mais específicas em alguns casos, robôs com características e alcance diversos, entre outros, utilizar a diferença de tempo de ciclo individualmente entre os robôs mais carregados de cada grupo, como critério de parada, pode induzir a respostas muito distantes da otimalidade ou, no outro extremo, a valores inatingíveis. Na tentativa de eliminar essa dificuldade, propõe-se utilizar o valor médio de tempo de ciclo por robô em cada grupo como critério de parada. Esse valor é obtido através da média dos tempos de ciclo dos robôs nos grupos.

Figura 4.4 – Método para execução do balanceamento parcial.



Fonte: Autoria própria

Enquanto o critério de parada não for alcançado, as trocas de pontos de solda entre os grupos representam uma busca orientada a partir dos robôs de maior tempo

de ciclo. A proposta é identificar as regiões que estão sendo soldadas por esses robôs e realizar uma busca nas vizinhanças dessas regiões de possíveis pontos a serem transferidos no intuito de encontrar um melhor balanceamento. Sua aplicação prática será discutida em maiores detalhes no capítulo 5.

5. RESULTADOS - CASO PRÁTICO

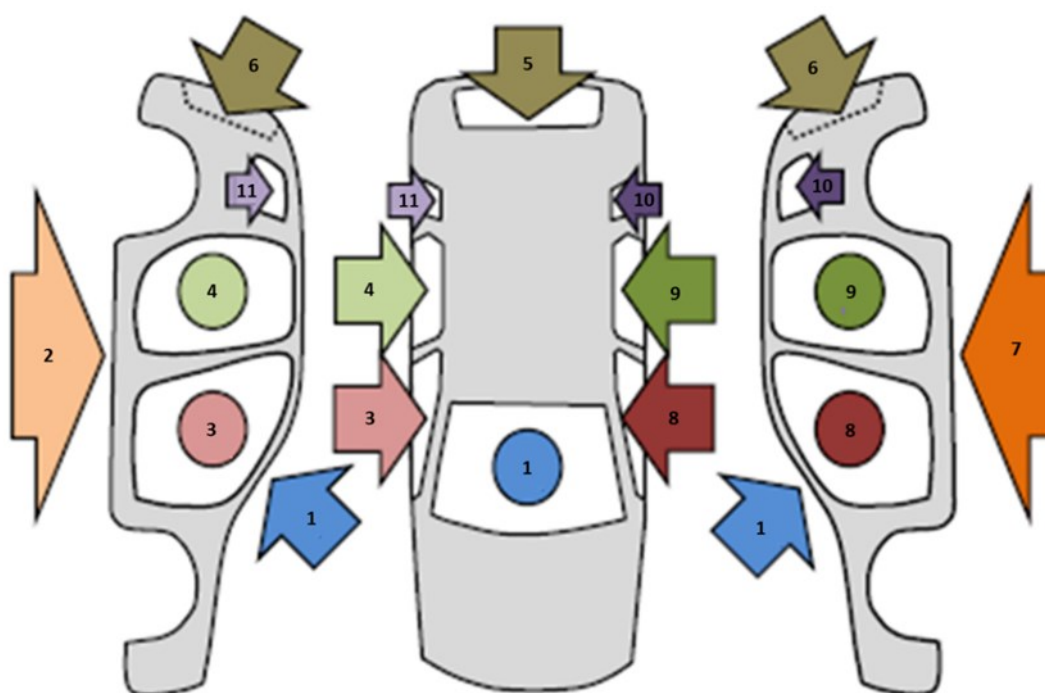
No Capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação prática dos conceitos abordados nos capítulos anteriores.

5.1 DADOS DE ENTRADA

Para o estudo de um caso real na indústria automotiva, foram utilizados os parâmetros, restrições e alocação dos pontos de solda de um determinado modelo de veículo distribuídos em um conjunto de 34 robôs, inicialmente estabelecidos por Molina (2019). Note que a quantidade de pontos de solda é um parâmetro fixo e que a solução deve considerar sua realização na totalidade, nesse caso quatrocentos e trinta e seis pontos.

A definição dos acessos de solda foi reformulada de acordo com o ilustrado na Figura 5.1. Isso porque, nesse trabalho, está sendo considerada a distribuição completa das tarefas, sem abordar os aspectos de simetria, já discutidos em trabalhos anteriores.

Figura 5.1 - Identificação das acessibilidades.

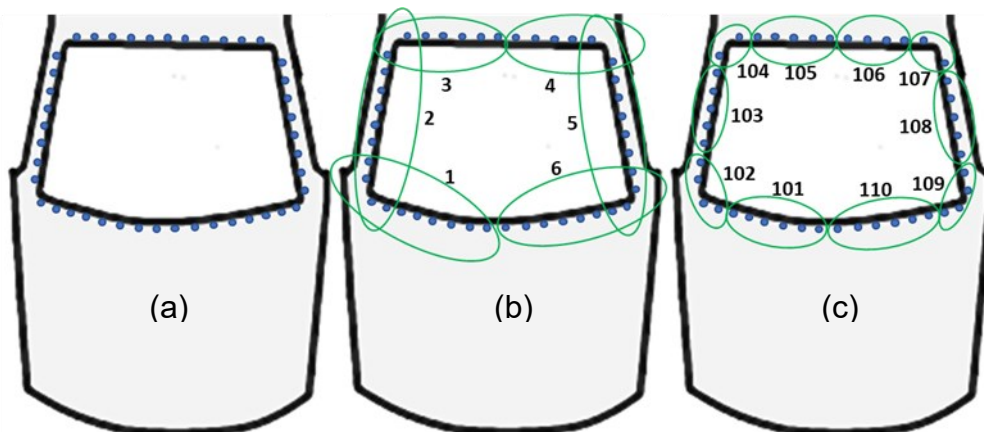


Fonte: Molina (2019) adaptado

Nota-se que cada um desses acessos permite o alcance de uma ou mais regiões de solda. Uma observação importante é que o tempo de movimentação entre os acessos não é uma constante, depende não só da distância entre eles mas também da geometria da região (RIGHETTO, 2005), que pode apresentar obstáculos à livre movimentação. A consideração dessa diferença é realizada no modelo através das adjacências, definidas de maneira empírica.

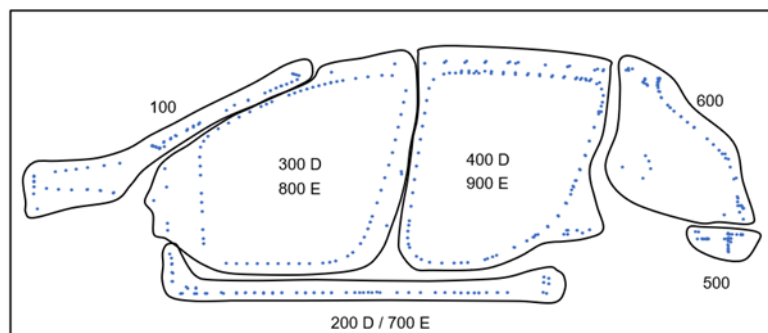
Por sua vez, as regiões de solda foram definidas com base nas características de proximidade e continuidade natural para realização dos pontos. A Figura 5.2 demonstra esquematicamente a definição das regiões de solda para o para-brisa. Na Figura 5.3 temos a expansão desse conceito representada aqui pela lateral esquerda de um veículo, mas que também é válida para a parte direita.

Figura 5.2 - Esquema de definição das regiões de solda: (a) Pontos de solda (b) Acessibilidade dos robôs 1 à 6 (c) Regiões de solda resultantes.



Fonte: Autoria própria

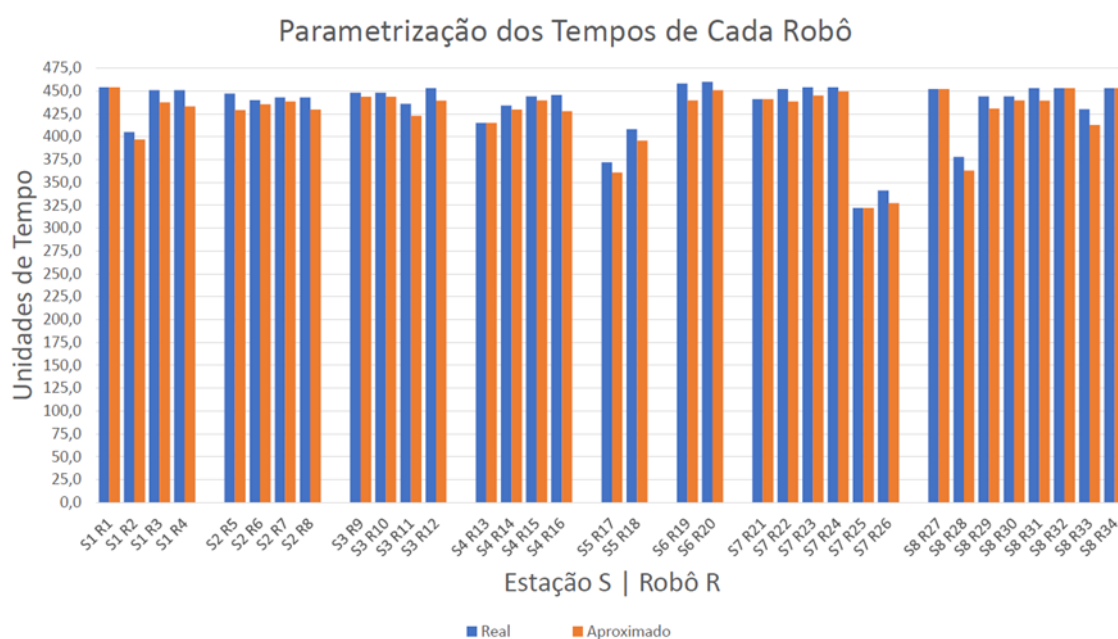
Figura 5.3 - Separação do veículo em regiões.



Fonte: Autoria própria

Com relação aos parâmetros de tempo de movimentações, tempo de solda e velocidades, foram coletados dados reais da linha de produção, através de filmagem. Esses dados foram inseridos no modelo e os resultados comparados aos valores reais da linha, apresentando valores iguais ou muito próximos (MOLINA, 2019), conforme ilustrado na Figura 5.5. A parametrização foi realizada de forma levemente conservadora, como pode-se observar pelos tempos aproximados, que são ligeiramente inferiores aos tempos reais da linha.

Figura 5.5 - Comparação entre os tempos de ciclo real e aproximado.



Fonte: Molina (2019)

5.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Os resultados podem ser divididos em duas seções. Primeiramente, na seção 5.2.1 será abordado o experimento de divisão da linha de produção em partes e seus resultados. Na segunda parte desse capítulo, serão apresentados os ensaios e impactos no tempo de ciclo da linha de produção com a retirada e acréscimo de robôs.

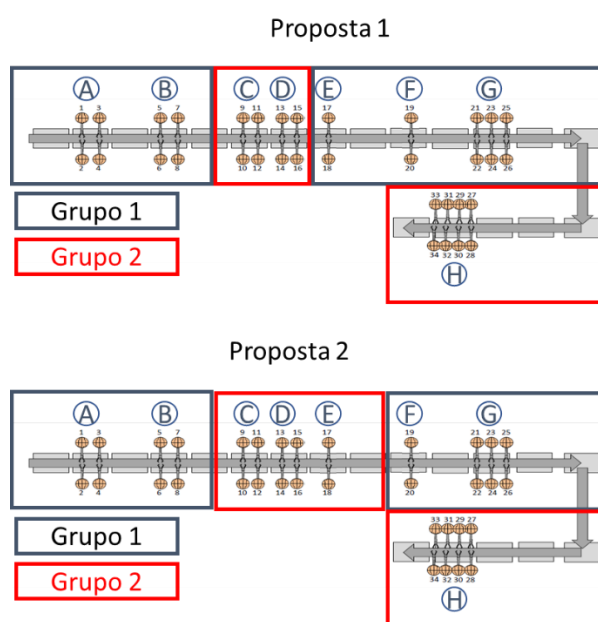
Para a implementação do modelo matemático foi utilizado o software IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio (IBM,2019) em um computador com processador Intel core i3-8130U (2.4 GHz) e 4 Gigabytes de memória RAM.

5.2.1 Modelo de Balanceamento Parcial – Divisão do Problema

Para a quantidade de estações de solda (oito) e robôs (trinta e quatro) apresentados, optou-se em dividir a linha de produção em dois grupos. A divisão em três ou mais partes, nesse caso, faria com que cada grupo tivesse uma quantidade muito limitada de robôs – no caso da divisão em três grupos, cada grupo normalmente teria de dez a doze robôs, obedecendo a distribuição desses robôs pelas estações de solda. Isso limitaria muito as possibilidades de trocas de pontos entre os robôs e, por conseguinte, a melhoria do tempo de ciclo.

A partir disso, foram analisadas duas propostas para a criação de grupos com dezoito e dezesseis robôs, na busca de uma divisão proporcional, como mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Propostas para a divisão da linha de produção em grupos.



Fonte: Autoria própria

O quadro 5.2 apresenta os resultados para as duas propostas analisadas. Pode-se verificar que a segunda proposta apresenta uma distribuição mais coerente devido à menor diferença (Δ) entre as médias de pontos de solda por robô, sendo por isso a escolhida. Esse parâmetro de comparação é usado na indústria para obter-se uma estimativa inicial do balanceamento entre as estações de solda.

Quadro 5.2 - Análise das médias de pontos de solda por robô para as duas propostas de divisão da linha analisadas.

Proposta 1				
	Robôs	Pontos de Solda	Pontos de Solda / Robô	Δ Grupo 1 x Grupo 2
Grupo 1	18	240	13,33	1,08
Grupo 2	16	196	12,25	
Total	34	436	12,82	
Proposta 2				
	Robôs	Pontos de Solda	Pontos de Solda / Robô	Δ Grupo 1 x Grupo 2
Grupo 1	16	206	12,88	0,10
Grupo 2	18	230	12,78	
Total	34	436	12,82	

Como o objetivo do trabalho é a diminuição do tempo computacional, optou-se por estabelecer um limite de tempo de execução de 60 segundos para o modelo de balanceamento parcial. Para efeito de comparação da qualidade da resposta, o modelo completo será executado com o mesmo parâmetro de limite de tempo proposto por Molina (2019) que é de 3600 segundos.

A primeira resposta fornecida pelo software é apresentada na Tabela 5.1, onde são indicados:

- Limite Superior (LS) – melhor tempo de ciclo fornecido pelo modelo para o problema de balanceamento proposto, em unidades de tempo, até atingir o limite de tempo de execução ou a otimalidade ($GAP = 0\%$);
- Limite Inferior (LI) – melhor solução relaxada (desconsiderando as restrições de integralidade do problema), ou seja, consideram-se soluções com variáveis de decisão não-inteiras;
- *GAP* – diferença percentual entre a solução proposta pelo modelo e a melhor solução relaxada;
- Tempo (s) – tempo computacional utilizado.

Pode-se observar a partir dos resultados da tabela 5.1 que o limite superior fornecido pelo modelo de balanceamento parcial é 47 unidades de tempo maior do que a resposta fornecida pelo modelo completo, o que representa uma diferença de 10,16%. Isso indica a existência de um desbalanceamento entre os grupos que necessita ser resolvida através de trocas de pontos de solda entre eles, conforme descrito no método proposto.

Tabela 5.1 - Resultados iniciais fornecidos pelo Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

	LS	LI	Média CT	GAP	Tempo (s)
Modelo Completo	411	385	399	6,33%	3600
Grupo 1	405	405	393	0%	1,019
Grupo 2	458	458	423	0%	0,935

Os GAP's nulos apresentados pelos modelos parciais indicam que, para aqueles conjuntos de dados de entrada analisados, o modelo chega à prova de otimalidade. Contudo, a partir das respostas obtidas, vê-se que ainda serão necessários mais ciclos de balanceamento até chegar-se a uma resposta aceitável, de acordo com o critério de parada estabelecido. Uma comparação direta com o GAP de integralidade do modelo completo não faz sentido porque os dados analisados nos modelos (quantidade de robôs, pontos de solda, variáveis, restrições, entre outros) não são os mesmos. Mais adiante serão realizadas algumas considerações pertinentes a esse tema, a partir das respostas finais dos modelos de balanceamento parciais.

Com relação ao tempo computacional, pode-se verificar que o modelo parcial apresentou valores da ordem de 1 segundo, enquanto o modelo completo chegou ao limite de tempo de execução máximo proposto, em torno de 3600 segundos. Uma das possíveis razões está relacionada à quantidade de variáveis e restrições analisadas em cada caso, conforme descrito na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Comparativo da quantidade de restrições e variáveis para o 1º ciclo de balanceamento parcial.

	Restrições (R)	Variáveis (V)	ΔR	ΔV
Modelo Completo	5836	1860	-	-
Grupo 1	2916	562	49,97%	30,22%
Grupo 2	3092	671	52,98%	36,08%

Observa-se que a divisão do problema em duas partes fez com que o número de restrições analisadas em cada uma delas seja aproximadamente a metade do modelo completo. As variáveis também apresentaram redução, da ordem de 33%, o que fez com que a quantidade de possíveis soluções a serem analisadas diminuísse de maneira significativa, tendo reflexo no tempo computacional.

Como o critério de parada não foi alcançado, é necessário realizar um novo ciclo de balanceamento parcial. Para isso, é necessário analisar os resultados de tempo de ciclo por robô. O Quadro 5.3 apresenta os robôs com os três maiores tempos de ciclo de cada grupo.

Nota-se que o robô 14 tem o maior tempo de ciclo entre todos, apesar de realizar apenas 11 pontos de solda, número inferior ao robô 30, por exemplo, que realiza 17 pontos de solda em um tempo de ciclo ligeiramente inferior. Isso ocorre porque o robô 14 tem necessidade de utilizar dois acessos (4 e 6) para realizar sua trajetória, enquanto o robô 30 utiliza apenas o acesso 3 (o tempo necessário para o deslocamento entre acessos é aproximadamente o mesmo para a realização de dois a três pontos de solda). Além disso, o robô 14 está alocado na estação G, que possui mais cinco robôs (vide Figura 5.5), sendo que o robô 16, que está localizado imediatamente ao seu lado, executa pontos na região 403, gerando tempo de espera devido à restrição por disputa de espaço.

Quadro 5.3 – Estratificação dos maiores tempos de ciclo para o 1º balanceamento parcial.

Grupo 1					Grupo 2				
Robô	Tempo de Ciclo	Região	Acesso	Qtde de Pontos	Robô	Tempo de Ciclo	Região	Acesso	Qtde de Pontos
19	405	701	7	3	14	457,5	206	6	2
		702	7	12			404	4	5
							407	4	4
23	405	710	7	2	10	457	1001	4	4
		905	9	5			1002	4	5
		907	9	4			1004	10	2
							1006	10	1
2	405	207	6	5	30	456	302	3	3
							606	6	8
		306	3	11					
							307	3	1

Para escolher quais tarefas têm maior potencial de transferência para o outro grupo, deve-se iniciar a busca na vizinhança das regiões onde o robô de maior tempo de ciclo está atuando. A partir do Quadro 5.4 pode-se verificar que as regiões 206 e 404 possuem ao menos uma região adjacente que já está sendo soldada no outro grupo e, por isso, atendem essa condição e devem ser testadas. Essa análise e verificação da melhoria ou não do resultado foi realizada sucessivamente até que o critério de parada fosse atingido.

Quadro 5.4 - Análise das regiões de solda para o robô de maior tempo de ciclo.

Região	Grupo 1	Grupo 2	Região	Grupo 1	Grupo 2
201	14	0	305	2	0
202	0	11	306	0	11
203	0	4	307	0	1
205	0	3	308	3	0
206	0	2	309	0	4
207	5	0	310	0	3
209	3	0	402	2	0
210	2	0	403	0	2
211	6	0	404	0	5
301	0	7	405	5	0
302	0	14	407	0	4
303	0	2	409	0	12
304	0	2	501	6	0

O resultado está ilustrado no Quadro 5.5, onde: CT_i representa o tempo de ciclo para cada grupo ou para o modelo completo e \overline{CT}_i representa a média dos tempos de ciclo dos robôs que compõem o i -ésimo grupo ou o modelo completo.

Quadro 5.5 - Resultados finais fornecidos pelo Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

Ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8
Modelo Completo	CT_c	411	-	-	-	-	-	-	-
	\overline{CT}_c	399	-	-	-	-	-	-	-
Grupo 1	CT_1	405	416	416	405	405	408	405	405
	\overline{CT}_1	393	404	403	397	396	398	397	397
Grupo 2	CT_2	458	408	414	432	427	428	411	411
	\overline{CT}_2	423	393	401	415	406	407	399	397
Critério de Parada	$\Delta\overline{CT}_{12}$	30	11	2	18	10	9	2	0

Pode-se observar que os resultados obtidos pelo modelo de balanceamento parcial e pelo modelo completo foram os mesmos, 411 unidades de tempo, conforme destacado em negrito na tabela. Nota-se, ainda, que as médias de tempos de ciclo entre os dois grupos do balanceamento parcial ficaram iguais e ligeiramente inferiores à média dos tempos de ciclo do modelo completo. Isso indica que a resposta fornecida pelo modelo de balanceamento parcial é mais eficiente, haja vista que consegue realizar a mesma quantidade de tarefas com uma menor taxa de ocupação dos robôs. A explicação prática para isso é que, na resposta de balanceamento parcial, há menos

movimentações ou tempos de espera desnecessárias dos robôs, ou seja, menos operações que não agregam valor efetivo ao veículo. Essa diferença, ainda que pouco significativa, é suficiente para, caso haja interesse, incluir mais tarefas nessa linha de manufatura, como, por exemplo, dois pontos de solda a mais, sem afetar o tempo de ciclo da linha.

Pelo Quadro 5.5 ainda, percebe-se que no ensaio 4 houve uma tendência de aumento do tempo de ciclo no grupo 2. Isso ocorreu porque foi proposta a região 109 para transferência de pontos (Quadro 5.1). Essa região possui apenas os robôs 12 e 28, com ferramentas mais específicas, capazes de soldá-la no grupo 2, o que gerou um desbalanceamento ainda maior entre os grupos devido à quantidade restrita de possibilidades.

Com relação aos tempos computacionais, limites superior e inferior e Gap de integralidade, o Quadro 5.6 mostra o comparativo entre os métodos.

Quadro 5.6 - Resultados de limites superior, inferior, gap de integralidade e tempos computacionais fornecidos pelo Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

Ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
Modelo Completo	<i>LS</i>	411	-		-	-	-	-	-	-
	<i>LI</i>	385	-		-	-	-	-	-	-
	<i>GAP</i>	6,33%	-		-	-	-	-	-	-
	Tempo	3600	-		-	-	-	-	-	3600
Grupo 1	<i>LS</i>	405	416	414	405	405	416	405	405	-
	<i>LI</i>	405	405	405	405	405	413	405	405	-
	<i>GAP</i>	0	2,64%	2,14%	0	0	0,74%	0	0	
	Tempo	1,019	60,13	61,03	0,979	1,889	60,12	26,40	2,318	213,89
Grupo 2	<i>LS</i>	458	408	427	432	427	428	411	411	-
	<i>LI</i>	458	408	425	432	427	428	411	411	-
	<i>GAP</i>	0	0	0,47%	0	0	0	0	0	-
	Tempo	0,935	2,307	60,13	34,97	3,071	4,601	4,803	1,193	112,01

A partir do Quadro 5.6, pode-se verificar que o somatório do tempo computacional dispendido no método de balanceamento parcial foi muito inferior ao utilizado na resolução do modelo completo até sua interrupção (3600 s), o que é um dos objetivos propostos para esse trabalho. Há uma possível correlação com a diminuição na quantidade de restrições e variáveis analisadas em cada grupo, apresentada no Quadro 5.7.

Com relação aos GAP's de integralidade, apenas em quatro ensaios a otimalidade não foi alcançada dentro do limite de tempo de execução estabelecido. Entretanto, quando executados até a otimalidade, os ensaios 2 e 5 do grupo 1 não

tiveram nenhuma evolução de resposta de tempo de ciclo. Isso indica, como já apontado por Molina (2019), uma dificuldade de convergência do modelo.

Pode-se constatar no Quadro 5.7, que a tendência apresentada no primeiro ensaio, no Quadro 5.3, se manteve: a quantidade de restrições nos grupos de balanceamento parcial ficou em torno da metade em comparação com o modelo completo, enquanto, para as variáveis, a redução foi de aproximadamente dois terços.

Quadro 5.7 - Comparação entre quantidade de restrições e variáveis para o Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

Ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Δ
Modelo Completo	Restrições	5836	-	-	-	-	-	-	-	5836	-
	Variáveis	1860	-	-	-	-	-	-	-	1860	-
Grupo 1	Restrições	2916	2977	2977	2960	2977	2977	2977	2948	2964	50,79%
	Variáveis	562	588	588	581	588	588	588	576	583	31,34%
Grupo 2	Restrições	3092	3059	3059	3042	3067	3059	3042	3086	3060	52,43%
	Variáveis	671	657	657	649	662	657	649	668	658	35,38%

5.2.2 Estudo de Alteração da Quantidade de Robôs – Novos Cenários

Na seção anterior, verificou-se que, no quarto ensaio de balanceamento parcial, houve uma piora do resultado devido a uma proposta de alteração em robôs com equipamentos com características e dimensões diferenciadas dos demais. Não há dúvida de que esses robôs são necessários para essa linha de manufatura, entretanto, quando se analisa a possibilidade de expandir ou diminuir o volume de produção, através da mudança no tempo de ciclo, qual o impacto desse tipo de robô? No caso da necessidade de acréscimo de mais dois ou quatro robôs, por exemplo, qual o impacto do tipo de robô a ser acrescentado? É melhor acrescentar robôs com capacidade de soldar diversas regiões ou aqueles capazes de soldar as regiões mais específicas do veículo, que atualmente possuem poucos robôs aptos a soldá-las? Essas considerações podem levar a ganhos significativos em investimentos e nem sempre são analisadas com a profundidade necessária.

Outro fator que tem influência na decisão de realizar alterações em linhas de produção já operacionais é a quantidade de modificações versus ganho efetivo. Cada mudança de pontos entre robôs necessita ser validada com ensaios de solda e verificação de trajetórias que têm seu custo e tempo necessário para implementação.

Em casos extremos, a necessidade de uma quantidade muito expressiva de modificações pode até mesmo inviabilizar sua execução.

Para estudar esses impactos, propõe-se realizar ensaios alterando a quantidade de robôs da linha de produção, gerando-se novos cenários de produção, porém, mantendo as mesmas características do veículo estudado, ou seja, a mesma quantidade de pontos de solda, acessos, regiões e outros.

Para iniciar essa análise, é necessário mensurar a quantidade de regiões de solda que cada robô é capaz de acessar. Para isso, os dados apresentados anteriormente no Quadro 5.1 foram resumidos no Quadro 5.8, apresentada a seguir.

Quadro 5.8 - Quantidade de regiões de solda acessadas por cada robô na linha de produção

Robô	Quantidade de Regiões	Robô	Quantidade de Regiões
1	27	18	21
2	28	19	23
3	26	20	23
4	26	21	9
5	8	22	9
6	10	23	20
7	13	24	20
8	13	25	7
9	6	26	7
10	5	27	3
11	6	28	3
12	5	29	10
13	31	30	10
14	32	31	5
15	16	32	5
16	15	33	6
17	21	34	7

Pode-se verificar que os robôs 13 e 14 são os que possuem acesso à maior quantidade de regiões de solda na linha de produção, sendo por isso considerados com maior flexibilidade. Em contrapartida, os robôs 27 e 28 apresentam comportamento oposto, já que têm capacidade de soldar apenas três regiões, devido às suas ferramentas de solda muito específicas. A partir dessas informações foram propostos ensaios, com a retirada de dois, quatro e oito robôs da linha de produção, com os resultados apresentados no Quadro 5.9.

Comparando-se nos ensaios 1 e 2 os robôs com maior e menor flexibilidade na linha de produção, percebe-se uma diferença de 25 unidades de tempo, o que

representa 5,52% no tempo de ciclo. Isso significa que, no caso da necessidade de retirada de dois robôs da linha, se forem escolhidos os robôs 13 e 14, haverá uma perda de volume de produção de 5,52% diretamente associada à essa escolha.

Quadro 5.9 - Tempo de ciclo, quantidade de mudanças de pontos de solda necessárias e volume de produção para os cenários estudados.

	Ensaio	CT	Nº de Alterações	Volume (pçs/h)*
0	Condição Inicial	411	-	87,59
1	Retirar os robôs 13 e 14	453	47	79,47
2	Retirar os robôs 27 e 28	428	46	84,21
3	Retirar os robôs 27, 28, 29 e 30	453	73	79,47
4	Retirar os robôs 5, 6, 7, 8, 27, 28, 29 e 30	518	117	69,57

* sem considerar as perdas por manutenção, panes, *setup* e demais.

De maneira semelhante, pode-se verificar, através dos ensaios 1 e 3, que o impacto da retirada dos robôs 13 e 14 no tempo de ciclo e, por consequência, no volume de produção, é o mesmo da retirada dos robôs 27, 28, 29 e 30. Isso se deve ao fato de que os quatro robôs do ensaio 3 estão entre os que possuem capacidade de acessar menos regiões do veículo. Nessa comparação, quatro robôs ao invés de dois poderiam ser reaproveitados, por exemplo, na realização de outras tarefas na própria linha de produção ou até mesmo ser realocados em outros fluxos produtivos. Há diversas oportunidades de ganho de performance, qualidade e ergonomia na robotização de algumas operações.

Além disso, comparando os ensaios 1 e 4, pode-se verificar que o acréscimo de tempo de ciclo com a retirada de oito robôs no ensaio 4 foi de apenas 12,55% em comparação com o ensaio 1. Pode-se verificar pelo Quadro 5.7 que os componentes do ensaio 4 são robôs que estão entre os que têm menos regiões de solda acessíveis.

Por outro lado, com relação à quantidade de mudanças de pontos de solda, observa-se uma diferença de 36% entre os ensaios 1 e 3, para um mesmo tempo de ciclo. Essa diferença é ainda maior entre os ensaios 1 e 4, da ordem de 60%. Obviamente, é esperado que, quanto mais robôs forem retirados, maior será a quantidade de modificações associadas na linha de produção. No caso de uma redução de volume temporária, por exemplo, torna-se mais interessante, do ponto de vista da quantidade de modificações de pontos de solda, intervir nos robôs 13 e 14.

Com esse resultado, pode-se afirmar que, para o balanceamento da linha de produção em estudo, robôs com maior flexibilidade possuem impacto significativamente mais expressivo.

Sob outro ponto de vista, essa análise também pode ser utilizada para otimizar o investimento necessário no projeto de um novo veículo ou expansão da linha de produção. Tendo em vista o custo de um robô industrial, em torno de US\$ 68.500,00 (FOLHA, 2018), a possibilidade de economia gerada com a melhor escolha do tipo de robô a ser implementado tem acentuada relevância.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi discutida a temática do balanceamento de linhas de produção robotizadas na indústria automotiva. Nesse contexto de otimização de processos, três aspectos importantes precisam ser avaliados: i) o tempo computacional necessário, ii) a flexibilidade na geração e teste de novos cenários, e iii) a qualidade das modificações propostas na linha de produção.

A primeira contribuição desse trabalho é de que houve um ganho significativo no tempo computacional em comparação ao modelo disponível na literatura, sem prejuízo da qualidade da resposta apresentada. Esse ganho está relacionado à diminuição do conjunto de variáveis e restrições a serem observados quando o problema é fracionado. O critério de parada mostrou-se eficaz e possibilitou uma comparação relevante sobre a qualidade das respostas obtidas.

No Capítulo 2 realizou-se a revisão da literatura, que serviu de base para o entendimento dos capítulos seguintes. A seguir, no Capítulo 3, o problema de balanceamento proposto foi discutido mais detalhadamente. No Capítulo 4, foi realizada uma revisão do modelo matemático presente na literatura e foram propostas modificações no intuito de melhorar o tempo computacional necessário (objetivo específico 1). Esse modelo foi testado no estudo de caso apresentado na Capítulo 5, onde foram apresentadas a metodologia utilizada e os resultados obtidos (objetivos específicos 2, 3 e 4).

Outra contribuição a ser enfatizada é de que, através da análise de cenários propostos, foi possível observar o impacto decorrente nos tempos de ciclo de robôs com características diversas em relação à capacidade de acesso às regiões de solda. Assim, foi possível analisar a potencial flexibilidade da abordagem proposta na geração e teste de novos cenários em linhas de produção robotizadas.

Como oportunidade para trabalhos futuros, pode-se estudar o impacto dos diferentes tipos de ferramentas de solda no balanceamento da linha de produção. Como apresentado, há ferramentas muito específicas, com acesso limitado à algumas regiões do veículo, e outras com características mais abrangentes, que podem acessar diversas partes do veículo. Também existem limitações relacionadas à espessura das chapas metálicas versus capacidade de solda das pinças, que também podem ser consideradas. Pode-se propor algumas trocas de equipamentos de solda

(até mesmo incluindo novos tipos de pinças, ainda não existentes nessa linha de produção) e verificar as alterações no balanceamento.

Além disso, outra oportunidade é adaptar o conceito desse modelo matemático para utilização em outras linhas de produção, com diferentes características, expandindo sua aplicabilidade.

Finalmente, podem ser estudados outros problemas como a redução de investimento em equipamentos, maximização da quantidade de pontos de solda para um dado um tempo de ciclo, redução do número de estações de solda, entre outros.

REFERÊNCIAS

ABB, **Product Specification IRB 6640**. 2020. Disponível em: <https://library.e.abb.com/> Acesso em: 07/12/2020.

AGETHEN, Phillip; OTTO, Michael; MENGEL, Stefan *et al.* Using Marker-less Motion Capture Systems for Walk Path Analysis in Paced Assembly Flow Lines. **6th CIRP Conference on Learning Factories (CLF)**, v. 54, p. 152-157, 2016.

ASFORA, Beatriz A.; BANFI, Jacopo; CAMPBELL, Mark. Mixed-Integer Linear Programming Models for Multi-Robot Non-Adversarial Search. **IEE Robotics and Automation Letters**, v. 5, p. 6805-6812, Out. 2020.

ARO, **ARO Plate**, 2020. Disponível em: <<https://www.rijdam.nl/uw-leverancier/aro-plate/>> _Acesso em: 28/10/2020.

BATTAÏA, Olga; DOLGUI, Alexandre. 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, Ilker. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. **Management Science**, v. 32, n. 8, p. 909–932, 1986.

BECKER, Christian; SCHOLL, Armin. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 694–715, 2006. ISSN 03772217.

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. Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions. **Production Planning and Control**, Taylor & Francis, v. 20, n. 5, p. 455 - 471, 2009.

BOWMAN, E. H. Assembly-Line Balancing by Linear Programming. **Operations Research**, v. 8, n. 3, p. 385–389, 1960.

BUKCHIN, Joseph; TZUR, Michal. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. **IIE Transactions**, v. 32, p. 585–598, 2000.

CHUTIMA, Parames. A comprehensive review of robotic assembly line balancing problem. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2020. DOI: 10.1007/s10845-020-01641-7.

DIRECT INDUSTRY. **Robotic spot welding clamp 3G**, 2020. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/prod/aro/product-8013-579515.html>> Acesso em: 28/10/20.

FOLHA. Brazil Ranks Bottom in Industrial Automation Ranking. **Folha de São Paulo**. 08/07/2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/internacional/en/business/2018/08/1978053-brazil-ranks-bottom-in-industrial-automation-ranking.shtml>> Acesso em 09/12/2020.

GONZÁLEZ, Martín; LÓPEZ-ESPÍN, Jose J. e APARICIO, Juan. A Parallel Algorithm for Matheuristics: A Comparison of Optimization Solvers. **MDPI Electronics: High-Performance Computer Architectures and Applications**, v. 9, set. 2020.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da moderna manufatura : versão SI**, v. 2, p. 454, 5. ed., LTC, 2017.

HAGEMANN, Simon e STARK, Rainer. An optimal algorithm for the robotic assembly system design problem: An industrial case study. **Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 31, p. 500-511, 2020.

HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 10 ed., Mc Graw Hill, 2015.

IFR (International Federation of Robotics), 2020. **Executive Summary World Robotics 2020 – Industrial Robots**. Disponível em: <<https://ifr.org/free-downloads/>> Acesso em: 17/02/2021.

JACKSON, J R. A computing procedure for a line balancing problem. **Management Science**, v. 2, n. 3, p. 261–271, 1956.

LOZAR, VIKTOR; ABDULAJ, FILIP; OPETUK, TIHOMIR *et al.* Application of Semi-Analytical Methods in Production Systems Engineering: Serial Lines **TEHNICKI GLASNIK-TECHNICAL JOURNAL**. v.14, p. 360-364, ed. 3, set. 2020.

LIBERATION. Dans les usines chinoises, les robots roulent des mécaniques. **Liberation**, 19/12/2016. Disponível em: <https://www.liberation.fr/futurs/2016/12/9/dans-les-usines-chinoises-les-robots-roulent-des-mecaniques_1536332> Acesso em: 14/09/2020.

LIRA, Valdemir Martins. **Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros** [livro eletrônico] p. 26, Blucher, 2017.

LOPES, T. C. *et al.* Balancing a Robotic Spot-Welding Manufacturing Line: An Industrial Case Study. **European Journal of Operational Research**, Vol. 203, p. 216-224, 2017.

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

LOPES, Thiago Canto; PASTRE, Giuliano Vidal; MICHELS, Adalberto Sato; MAGATÃO, Leandro. Flexible Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem: Model, Heuristic Procedure, and Lower Bounds for Line Length Minimization. **Omega**, v. 95, p. 102063, 2020.

MARQUES, P. V., Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Elsevier, 4^a ed., 2017.

METAL E FORMA, **Conformação de Chapas**. 2020. Disponível em: <<http://metal-e-forma.blogspot.com/p/conformacao-de-chapas.html>> Acesso em: 11/11/2020.

MICHALOS, G. *et al.* Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for an exible and adaptive approach. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 81-91, 2010.

MOLINA, R. G., **Contribuições para o Balanceamento de uma Linha de Manufatura Robotizada por meio de Programação Matemática**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

PINEDO, Michael L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. 5^a ed. Springer, 2016. p. 670, ISBN 978-3-319-26578-0.

RIGHETTO, Jefferson, **Construção Funcional: Uma abordagem do desenvolvimento de componentes individuais da carroceria, com foco no veículo completo, integrando o produto, o processo e a manufatura**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante), Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RUBINOVITZ, J; BUKCHIN, J. Design and balancing of robotic assembly lines. In: **Proceedings 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.

SIEMENS Process Simulate. **Process Simulate Manufacturing process verification in powerful 3D environment**, 2021. Disponível em: <[https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/7457_tcm642-80351 .pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/7457_tcm642-80351.pdf)> Acesso em: 25/01/2021.

SCHOLL, Armin. **Balancing and sequencing assembly lines**. 2nd. ed. Heidelberg: ed. Physica, 1999.

SCHOLL, Armin; BECKER, Christian. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 666–693, fev. 2006.

SCHOLL, Armin; FLIEDNER, Malte; BOYSEN, Nils. ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 3, p.688–701, feb 2010. ISSN 0377-2217.

SIKORA, C. G. S., LOPES T. C. e MAGATÃO, L. Variable Sets Reduction for Assembly Line Balancing Problem: MILP Model and Case Studies. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p 166-176, 2015.

SIKORA, C. G. S., LOPES, T. C., SCHIBELBAIN, D. e MAGATÃO, L. Integer based formulation for the simple assembly line balancing problem with multiple identical tasks. **Computers & Industrial Engineering**, v. 104, p. 134-144, 2017.

SUN, BQ.; WANG, L. An estimation of distribution algorithm with branch-and-bound based knowledge for robotic assembly line balancing **Complex & Intelligent Systems**. Jun. 2020.

WHITE, W W. Comments on a Paper by Bowman. **Operations Research**, v. 9, p. 274–276, 1961.

WILLIAMS, H. **Model Building in Mathematical Programming**. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781118506189.