BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MANUFATURA ROBOTIZADA COM CARACTERÍSTICAS SIMÉTRICAS POR MEIO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Rafael Gobbi Molina[1], **Thiago Cantos Lopes**[1],
Luiz Carlos de Abreu Rodrigues[2], **Leandro Magatão**[1]
Universidade tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI
[2]Departamento Acadêmico de Mecânica - DAMEC
Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, Paraná, Brasil, 80230-901
rafaelmolina@alunos.utfpr.edu.br,
thiagolopes@alunos.utfpr.edu.br, lcar@utfpr.edu.br,
magatao@utfpr.edu.br

RESUMO

A produção em massa na indústria automotiva depende do uso eficaz de suas linhas de produção. Neste trabalho é apresentado um estudo de caso baseado nas condições reais de operação de uma indústria automotiva. A linha estudada conta com 26 robôs simetricamente posicionados que devem efetuar mais de 450 pontos de solda nos diferentes veículos em produção. Foram realizadas adaptações em um modelo de Programação Linear Inteira Mista, proposto por Lopes et al. [2017], de forma a torná-lo capaz de utilizar os fatores de simetria presentes na linha de produção estudada e aprimorar a qualidade das respostas obtidas. O estudo de caso foi aplicado à versão da literatura e à versão proposta do modelo e os resultados encontrados pela nova versão do modelo obtiveram um tempo de ciclo até 4% melhor do que os encontrados pelo modelo original, mantendo-se o tempo computacional para ambos os casos.

PALAVRAS CHAVE. Balanceamento de linhas de montagem, Linha de solda robotizada, Programação linear inteira mista.

ABSTRACT

Mass production in the automotive industry depends on the effective use of its production lines. This paper presents a case study based on a real operating condition of an automotive industry. The line studied has 26 symmetrically positioned robots that have to perform more than 450 welding points in the different vehicles in production. Adaptations were made in a Mixed Integer Linear Programming model present by Lopes et al. [2017], in order to make it able to use the symmetric factors presented in the studied production line and improve the quality of the obtained answers. The case study was applied on the literature version and the proposed version of the model. With the same computational time the results found by the new version of the model obtained a cycle time up to 4% better than those found by the original model.

KEYWORDS. Assembly line balancing, Robotic spot welding line, Mixed integer linear programing.

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

1. Introdução

Linhas de manufatura, operando em um sistema de produção orientado ao produto (*flow shop*), se tornaram uma ferramenta indispensável para setores que demandam uma produção em larga escala, como o caso a indústria automotiva. Segundo Scholl [1999] esse sistema produtivo possui como vantagem uma alta capacidade produtiva, um fluxo simples das peças e uma grande especialização dos trabalhadores como resultado gerado pela divisão do trabalho. Os componentes que devem ser montados são movimentados por estações de trabalho organizadas de modo sequencial, sendo essas estações responsáveis por tarefas específicas do processo produtivo. Tais características possibilitam o uso de sistemas automáticos, ou o emprego de robôs.

Os processos empregados pela indústria automotiva podem ser divididos em quatro etapas básicas: estamparia, carroceria, pintura e montagem [Michalos et al., 2010]. Cada uma dessas etapas deve ser cuidadosamente dimensionada de modo que o ritmo produtivo desejado pela companhia possa ser atingido. Logo, um bom controle do tempo de ciclo é um fator essencial em todos os estágios de produção [Raj et al., 2016].

Em uma linha de manufatura as estações de trabalho se auto limitam, ou seja, um estação só pode desempenhar suas atividades quando receber a peça oriunda da estação anterior. O gargalo do sistema produtivo é dado pela estação que possuir o maior tempo de ciclo. Por esse motivo, um balanceamento uniforme das atividades de uma linha de produção é desejável, tendo em vista que minimiza tempos ociosos gerados pela estação gargalo [Scholl, 1999].

Obter a melhor distribuição de tarefas é o objetivo do problema de balanceamento de linhas de montagem (ALBP - *Assembly Line Balancing Problem*), que foi inicialmente proposto por Salveson [1955]. Posteriormente, Baybars [1986] compilou as informações disponíveis na época sobre o tema de balanceamento de linhas de manufatura e propôs duas possíveis classificações: o problema de balanceamento de linhas de montagem simples (*SALBP - Simple Assembly Line Balancing Problem*) e o problema geral de balanceamento de linhas de montagem (*GALBP - General Assembly Line Balancing Problem*). Ainda, segundo Wee e Magazine [1982], ALBP se enquadra como um problema não polinomial difícil, já que se trata de uma generalização do problema de empacotamento. Uma revisão mais recente de trabalhos em balanceamento de linhas produtivas foi apresentada por Battaïa e Dolgui [2013].

O balanceamento de linhas de montagem robotizadas (RALBP - *Robotic Assembly Line Balancing Problem*) foi inicialmente proposto por Rubinovitz e Bukchin [1991]. No setor automotivo é comum encontrar linhas de montagem robotizadas com múltiplos robôs por estação, o que de acordo com Dimitriadis [2006], pode trazer algumas vantagens, como uma quantidade menor de estações de trabalho, linhas de produção de menor comprimento e um custo de manipulação de peça menor. Em contrapartida, estações com múltiplos robôs requerem uma preocupação com a trajetória e sequenciamento das atividades entre os robôs com o objetivo de evitar interferências.

Lopes et al. [2017] apresentou uma formulação em Programação Linear Inteira Mista para o problema de balanceamento de pontos de solda em uma linha de produção robotizada composta por estações de trabalho com múltiplos operadores robóticos. Esta formulação engloba condições de interferência e disputa de espaço entre os robôs. Além disso, esse modelo faz uso de restrições para medir de forma aproximada os tempos de movimentação e ocupação dos robôs dentro de uma região do veículo. O sequenciamento final da trajetória efetuada por cada robô é determinado por simulação 3D.

Este artigo apresenta uma adaptação do modelo proposto por Lopes et al. [2017]. As adaptações propostas permitem ao modelo fazer uso das características de simetria, presentes no estudo de caso que aqui será apresentado, para diminuir a quantidade de pontos de solda que devem ser considerados pelo modelo. Em adição a isso, essa abordagem atenderá uma diretriz da indústria em análise, que prioriza respostas onde os robôs do lado direito da linha realizam operações similares às dos seus pares do lado oposto. Tal simetria nas operações possibilita que os programas que controlam as operações dos robôs do lado direito da linha possam ser parcialmente espelhados para

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

os robôs do lado esquerdo, facilitando assim a implementação da resposta do modelo matemático no chão de fábrica.

Há alguns casos, contudo, em que sabidamente não é possível atingir uma simetria exata entre os robôs. Por exemplo, tarefas associadas ao tanque de combustível ocorrem apenas de um dos lados do carro. Portanto, é necessário que a resposta permita essas assimetrias onde preciso, mas é desejável que a resposta final seja tão simétrica quanto possível. Desta forma, as alterações propostas ao modelo o tornam semi-simétrico. Reitera-se que o estudo de caso foi focado em um problema específico de uma indústria do setor automobilístico, contudo, a característica semi-simétrica de operação em linhas robóticas está presente em diversas empresas do setor automotivo, o que torna a aplicação realizada extensível a vários cenários industriais similares.

O artigo está estruturado da seguinte forma: A seção 2 apresenta uma breve definição do problema; A seção 3 apresenta as modificações que foram realizadas no modelo proposto por Lopes et al. [2017]; A seção 4 apresenta um estudo de caso real da indústria e os resultados obtidos; A seção 5 resume os resultado obtidos por esse trabalho.

2. Definição do Problema

Segundo Falkenauer [2005], um trabalho de otimização de linhas de manufatura pode ser abordado com foco no balanceamento das tarefas que devem ser realizadas em cada modelo de produto ou com foco em mudanças no projeto de *layout* da própria linha. O problema proposto por esse artigo insere-se na primeira opção, tendo em vista que, deseja-se distribuir um conjunto de pontos de solda a um conjunto de robôs de forma a minimizar o tempo de ciclo da linha, ou seja, pretende-se balancear as tarefas da linha.

A linha de solda robotizada em análise aplica pontos de solda por resistência [Aslanlar et al., 2008] e algumas características inerentes ao processo de solda em uso devem ser respeitadas. Por exemplo, a geometria das peças, das pinças de solda e a posição dos robôs em relação à carroceria do veículo impedem que todos os pontos de solda sejam acessíveis por todas as ferramentas de solda acopladas aos robôs, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2. Portanto, aspectos referentes à capacidade de um robô realizar um conjunto de pontos de solda precisam ser considerados. Em adição a isso, no balanceamento de linhas de produção, as operações de solda devem ser feitas dentro de um tempo de ciclo pré determinado, onde incluí-se dentro do tempo de ciclo o tempo específico de solda, os tempos de posicionamento, de movimentação entre os pontos de solda e os tempos de manipulação de peça. Por fim, a indústria automotiva geralmente faz uso de múltiplos robôs trabalhando simultaneamente em uma mesma estação, o que pode acarretar em disputas de espaço ou interferências, conforme exemplificado nas Figuras 3 e 4.

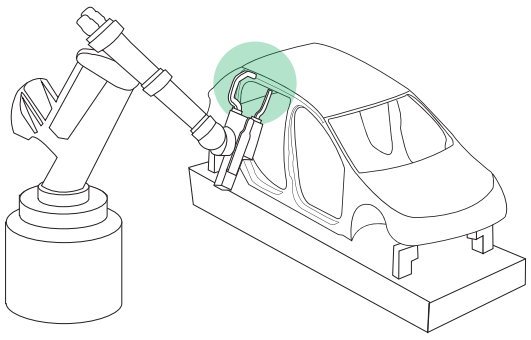


Figura 1: Ponto de solda acessível pelo conjunto robô/ferramenta de solda. Fonte: [Lopes et al., 2017]

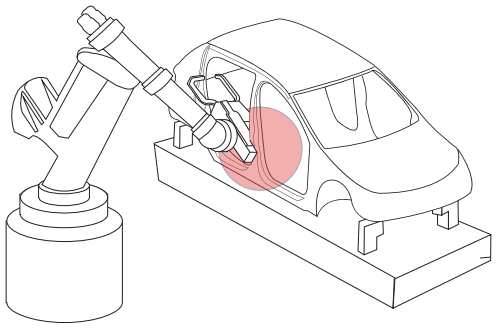


Figura 2: Ponto de solda Inacessível pelo conjunto robô/ferramenta de solda. Fonte: [Lopes et al., 2017]

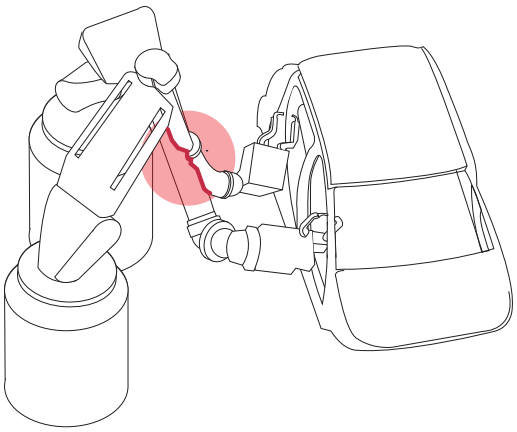


Figura 3: Condição de interferência gerada pelo cruzamento dos braços entre dois robôs de uma estação . Fonte: [Lopes et al., 2017]

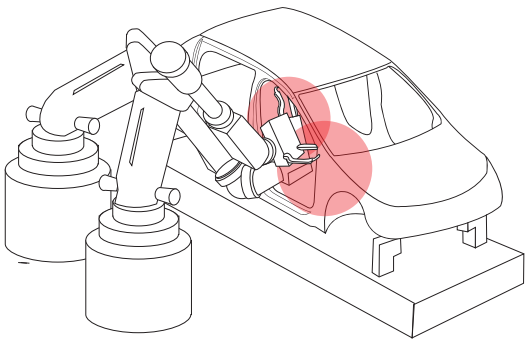


Figura 4: Condição de disputa de espaço observada quando dois robôs atuam em uma mesma região do veículo, neste caso na porta dianteira direita. Fonte: [Lopes et al., 2017]

Por estar inserido no mesmo contexto indústrial que foi apresentado por Lopes et al. [2017] todas as hipóteses e características ali apresentadas continuam sendo consideradas e são as seguintes:

H0 Restrição de ocorrência - Um conjunto de pontos de solda devem se realizados;

H1 Restrição de Alocação -A alocação dos pontos deve respeitar as restrições de acessibilidade que estão associadas com as ferramentas e posições dos robôs;

H2 Parâmetros dependentes dos robôs - Os robôs não têm a mesma velocidade devido a diferenças de modelo, tamanho e ferramenta de solda acoplada ao mesmo;

H3 Tempo de ciclo é influenciado pelos tempos de movimentação - O tempo de ciclo de cada robô não é determinado pela soma simples de tarefas realizadas: Tempos de manipulação de peças, solda, movimentação e posicionamento da ferramenta de solda devem ser considerados;

H4 Múltiplas posições de solda - alguns pontos podem ser acessados por mais de uma posição;

H5 Restrições de interferência - Estações podem conter mais de um robô e os mesmos não podem colidir entre si quando realizam as tarefas;

H6 Parâmetros de Solda - Tempos de solda e acessibilidades são conhecidas;

H7 *Layout* fixo - O número, posição e ferramentas de solda acopladas a cada robô são conhecidas e fixadas a um *layout* pré-definido;

H8 Não existem relações de precedência - A ordem de execução dos pontos de solda não é importante no setor considerado.

Em adição às hipóteses apresentadas(H0 a H8), deve-se considerar que devido a aspectos da geometria da carroceria do veículo, a maioria dos pontos existentes em um dos lados da carroceria tem o seu equivalente no lado oposto. Os pontos que possuírem um oposto idêntico, localizado em uma posição geométrica da carroceria do veículo que permita que as restrições de disputa de espaço sejam desconsideradas, terão o seu oposto retirado do processo de otimização. Posteriormente, o ponto retirado será recolocado na resposta via pós processamento.

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

Os pontos de solda que não podem ser considerados como simétricos, como por exemplo, os pontos da região do tanque de combustível, que existem apenas em um dos lados veículo, continuarão sendo abordados sem as considerações de simetria.

3. Modelo

O modelo apresentado nesse trabalho faz uso das mesmas restrições apresentadas por Lopes et al. [2017]. Adicionalmente, as restrições apresentadas nas expressões 2 a 6 foram incluídas. Essas restrições adicionais foram propostas com o intuito de controle dos aspectos simétricos do problema. Portanto, todas as hipóteses apresentadas por Lopes et al. [2017] para a elaboração do modelo continuam válidas, sendo as principais:

S1 - Os robôs estão fixos em uma estação, com suas propriedades e parâmetros (velocidade, ferramentas, posição e capacidade) conhecidos;

S2 - Os pontos de solda encontram-se agrupados em regiões, conforme ilustrado na Figura 5, sendo que, todos os pontos de uma região estão localizados de acordo com suas posições geométricas em relação ao veículo e necessitam da mesma quantidade de tempo para serem efetuados;

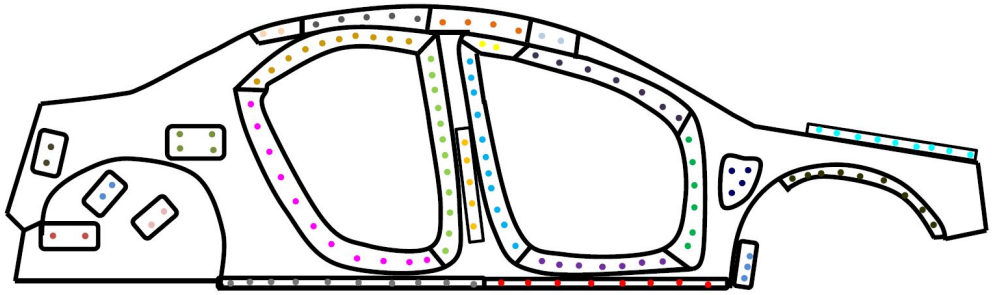


Figura 5: Exemplo de como os pontos de solda são agrupados em regiões. Fonte: Lopes et al. [2017]

S3 - Os tempos de movimentação são contabilizados pela soma de dois tempos. O primeiro tempo é o de movimento entre duas regiões de solda e é igual para qualquer movimentação entre regiões. O veículo foi subdivido em vários acessos. Na Figura 6 ilustra-se os acessos da porta dianteira e traseira, e caso exista a movimentação da região de um acesso para uma região de outro acesso o tempo de movimentação entre esses acessos deve ser adicionado ao tempo de movimentação puramente entre regiões. Se uma região ou acesso estiver próxima o suficiente de outra região ou acesso, o tempo de movimentação entre regiões pode ser parcialmente desconsiderado, o que foi chamado de adjacência;

S4 - O sequenciamento não é feito como parte do modelo. A sequência final das atividades é definida no pós-processamento. Contabiliza-se apenas o número de pontos de solda realizados, assim como o número de movimentações realizadas entre as regiões de solda.

3.1. Conceitos Gerais

A linha de produção em estudo tem seus robôs distribuídos simetricamente entre o lado direito e esquerdo, conforme apresentado na Figura 7. De forma a simplificar a modelagem, todos os robôs localizados no lado direito receberam como identificação números pares e todos os robôs do lado esquerdo números ímpares.

Adicionalmente às considerações anteriores, as regiões de solda foram separadas em dois grupos, simétricas e não simétricas. As regiões foram consideradas não simétricas por dois motivos: Primeiro, se a região não tiver um par equivalente, como é o caso do tanque de combustível;

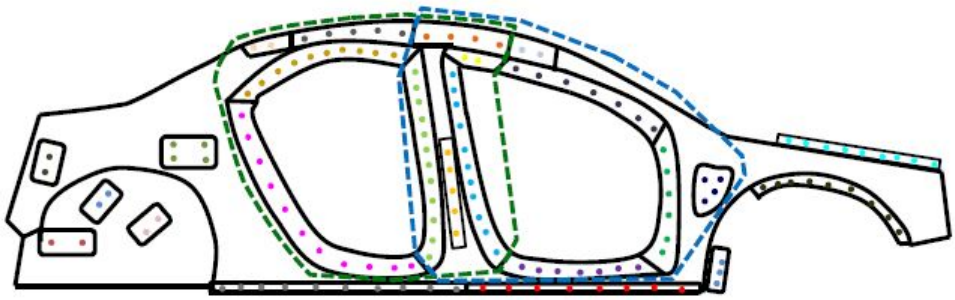


Figura 6: Exemplo de como as regiões de solda são agrupadas por acessos do veículo, neste caso a porta dianteira e traseira do lado direito. Fonte: Lopes et al. [2017]

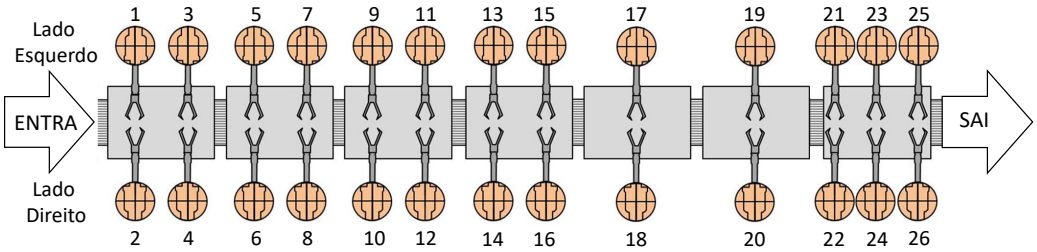


Figura 7: *Layout* simplificado da linha de produção analisada no estudo de caso.

Segundo, se ela se encontrar em uma parte do veículo em que seja necessário considerar explicitamente as restrições de disputa de espaço e cruzamento entre robôs do lado direito e esquerdo da linha, como é o caso das regiões que se encontram no porta-malas do veículo.

3.2. Parâmetros e Variáveis

Com o objetivo de diferenciar o que é um conjunto de parâmetros de um conjunto de variáveis, o segundo caso iniciará com uma letra minúscula, sendo v para variáveis inteira e reais e b para variáveis binárias. Conjuntos de tuplas foram utilizados para definir uma coleção discreta de variáveis, a interpretação de cada um desses conjuntos encontra-se na Tabela 1. As variáveis do modelo, o conjunto de tuplas em qual ela está baseada e suas interpretações encontram-se na Tabela 2. Por fim, algumas restrições necessitam de parâmetros adicionais para o correto controle sobre a ocorrência e o tempo de ciclo, esses parâmetros estão listados na Tabela 3

Tabela 1: Conjuntos e tuplas utilizados no modelo.

Conjunto	Tuplas	Descrição e significado de cada conjunto de tuplas
S	s	Intervalo do conjunto de estações
R_{sim}	r_{sim}	Intervalo do conjunto de regiões simétricas
R_{nsim}	r_{nsim}	Intervalo do conjunto de regiões não simétricas
W	w	Intervalo do conjunto de robôs
WRA	(w, r, a)	Indica que o robô w é capaz de acessar a região r pelo acesso a
$RRadj$	(r_1, r_2)	indica que as regiões r_1 e r_2 são adjacentes
$WRRadj$	(w, r_1, r_2, a)	indica que o robô w é capaz de utilizar a adjacência entre r_1 e r_2 pelo acesso a
$WAAadj$	(w, a_1, a_2)	Indica que o robô w pode utilizar a adjacência entre os acessos a_1 e a_2

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

Tabela 2: Variáveis e seus respectivos significados.

Variável	Conjunto	Tupla	Descrição e significado de cada variável
vCT	-	-	Tempo de ciclo da linha
$vCTW$	W	w	Tempo de ciclo do robô w
$vCTD$	W	w	Tempo de trabalho do robô w nas regiões não simétricas
$vCTF$	W	w	Tempo de trabalho do robô w nas regiões simétricas
$vNMA$	W	w	Número de movimentos entre acessos realizados pelo robô w
bWR	WRA	(w, r, a)	Booleana que controla se o robô w acessa a região r pelo acesso a
$vWRA$	WRA	(w, r, a)	Número de pontos de soldas efetuados pelo robô w na região r pelo acesso a
$bWRA$	WRA	(w, r, a)	Booleana que indica que o robô w realiza algum ponto de solda na região r pelo acesso a
$bWRRadj$	$WRRadj$	(w, r_1, r_2, a)	Booleana que indica que o robô w utiliza adjacência entre as regiões r_1 e r_2 pelo acesso a
$bWAAadj$	$WAAadj$	(w, a_1, a_2)	Booleana que indica que o robô w utiliza adjacência entre os acessos a_1 e a_2

3.3. Restrições de Simetria

O modelo original contava com três tipos básicos de restrições: restrição de ocorrência, que implica que todos os pontos de solda devem ser efetuados; restrições de controle de tempo, que buscavam determinar o tempo de ciclo de cada robô; restrições de interferência, que buscavam impedir respostas com risco de colisão entre robôs. As restrições de interferência e ocorrência não foram alteradas e podem ser encontradas em Lopes et al. [2017]. A maioria das restrições de controle de tempo também estão iguais, com exceção de uma, que será aqui apresentada na forma de um quarto tipo de restrição, a de controle de simetria.

O controle de simetria foi realizado a partir do controle do tempo de ciclo de cada robô ($vCTW$). Basicamente, a variável $vCTW$, que originalmente era controlada pela Inequação 1 foi separada em duas outras, a $vCTD$ (Inequação 2) que controla as operações realizadas nas regiões não simétricas e a $vCTF$ (Inequação 3) que controla as operações realizadas nas regiões simétricas, juntamente com os tempos de movimentação entre acessos.

$$
\begin{aligned}
vCTW_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} (T_w + T_r) \cdot vWRA_{(w,r,a)} + \\
& + \frac{T_{MovR}}{V_w} \cdot \left(\sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} bWR_{(w,r,a)} - 1 \right) + \\
& + T_s - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRR_{adj} \\ r \in R}} bWRRadj_{(w,r_1,r_2,a)} + \\
& + T_{movA} \cdot \frac{vNMA}{V_w} - \frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2)\ \epsilon\ WAA_{adj}} vWAAadj_{(w,a_1,a_2)} \\
& \qquad \forall\ w\ \epsilon\ W
\end{aligned}
\tag{1}
$$

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

Tabela 3: Parâmetros de ocorrência e controle de tempo

Parâmetro	Conjunto	Tupla	Significado
T_w	W	w	Tempo associado à movimentação de cada robô para cada ponto de solda dentro de uma região
T_r	R	r	Duração de cada ponto de solda em uma região
T_s	-	-	Tempo fixo associado à preparação da estação
T_{movR}	-	-	Tempo de movimentação entre duas regiões
T_{adjR}	-	-	Tempo ganho por adjacência entre regiões
V_w	-	-	Velocidade relativa de cada robô
T_{movA}	-	-	Tempo de movimentação entre dois acessos
T_{adjA}	-	-	Tempo ganho por adjacência entre acessos

O controle do tempo que um robô passa realizando operações de solda em regiões não simétricas ($vCTD$) é feito pela Inequação 2. O tempo é definido pelo tempo que um robô passa realizando pontos de solda dentro de uma região, adicionado do tempo de movimentação entre regiões que se encontram no mesmo acesso (T_{movR} multiplicado de soma de movimentações entre regiões) e decrescido o tempo ganho por possíveis de regiões adjacências utilizadas entre regiões (T_{adjR}).

$$vCTD_w \geq \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} (T_w + T_r) \cdot vWRA_{(w,r,a)} + \frac{T_{movR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} bWR_{(w,r,a)} - \\ - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRRadj \\ r \in R_{nsim}}} bWRRadj_{(w,r_1,r_2,a)} \quad \forall\, w \,\epsilon\, W \tag{2}$$

O controle do tempo que um robô passa realizando operações de solda em regiões simétricas ($vCTF$) é feito pela Inequação 3. O tempo é definido pelo tempo que um robô passa realizando pontos de solda dentro de uma região, adicionado do tempo de movimentação entre regiões que se encontram no mesmo acesso (T_{movR} multiplicado pela soma das movimentações entre regiões), do tempo de movimentação entre acessos (T_{movA} multiplicado pela soma das movimentações entre acessos), do tempo de preparação da estação (T_s) e decrescido do tempo ganho por possíveis adjacências utilizadas entre regiões e acessos (T_{adjR} e T_{adjA}).

Considerou-se que apenas os robôs pares podem trabalhar nas regiões simétricas ($w \; mod \; 2 = 0$, Expressão 3). Essa consideração elimina parte das soluções factíveis do modelo apresentado por Lopes et al. [2017], porém, possibilita que uma quantidade menor de robôs e pontos de solda sejam avaliados pelo modelo matemático, viabilizando a obtenção de respostas computacionais em um tempo computacional relativamente menor.

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

$$
\begin{aligned}
vCTF_w \geq & \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} (T_w + T_r) \cdot vWRA_{(w,r,a)} \\
& + \frac{T_{movR}}{V_w} \cdot \left(\sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R_{nsim}}} bWR_{(w,r,a)} - 1 \right) + \\
& + T_s - \frac{T_{adjR}}{V_w} \cdot \sum_{\substack{(w,r_1,r_2,a) \in WRR_{adj} \\ r \in R_{nsim}}} bWRRadj_{(w,r_1,r_2,a)} + \\
& + T_{movA} \cdot \frac{vNMA}{V_w} - \frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \, \epsilon \, WAA_{adj}} vWAAadj_{(w,a_1,a_2)} \\
& \qquad \forall \, w \, \epsilon \, W \;\mid\; w \, mod \, 2 = 0
\end{aligned}
\tag{3}
$$

As operações feitas na região simétrica pelos robôs do lado esquerdo não são consideradas pela Inequação 3. No entanto, para a resposta ser consistente e implementável, o tempo que esses robôs precisam para trabalhar nessas regiões deve ser considerado. Portanto, na Equação 4 é explicitado que o tempo que um robô do lado esquerdo passa realizando operações na região simétrica deve ser igual ao tempo que um robô do lado direito faz isso.

$$
vCTF_w = vCTF_{w+1} \quad \forall \, w \, \epsilon \, W \mid w \, mod \, 2 = 1 \tag{4}
$$

O tempo de ciclo completo de cada robô é controlado pela Equação 5 e é dado pelo tempo de todas as operações que um robô faz fora da região simétrica adicionado ao tempo que ele passa trabalhando na região não simétrica. De modo complementar a Inequação 6 impõem que o tempo de ciclo da linha é diretamente influenciado pelo robô com maior valor de $vCTW$.

$$
vCTW_w = vCTF_w + vCTD_w \quad \forall \, w \, \epsilon \, W \tag{5}
$$

$$
vCT \geq vCTW \quad \forall \, w \, \epsilon \, W \tag{6}
$$

3.4. Função Objetivo

Para o estudo de caso realizado, a quantidade de robôs e o número total de pontos de solda que devem ser realizados é conhecido. Então, o objetivo do modelo é minimizar o tempo de ciclo da linha, o que pode ser obtido minimizando o tempo de ciclo do robô mais carregado, conforme descrito na Equação 7.

$$
\text{Minimizar: } \; z = vCT \tag{7}
$$

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

4. Estudo de Caso

O modelo de otimização proposto foi desenvolvido tendo como base uma linha de produção robotizada real. A linha de trabalho está simplificadamente ilustrada na Figura 7. Ela é composta por 26 robôs distribuídos de maneira simétrica, em relação ao lado direito e esquerdo do veículo, entre 7 estações. Cada estação pode comportar dois, quatro ou seis robôs. No estudo de caso realizado, três modelos de carros eram produzidos por essa linha, cada um contendo aproximadamente 500 pontos de solda a serem feitos nesta parte de linha. Essa linha se encontra na última seção do setor de fabricação da carroceria do veículo. Nesta etapa todas as peças já se encontram fixadas, faltando apenas os pontos de solda que garantem a integridade estrutural do veículo. Portanto, não existem relações de precedência entre as tarefas de solda realizadas.

A linha de produção trabalha com modelos distintos de veículos e a transição de peças acontece de forma assíncrona. A quantidade de trabalho a ser executada em cada um dos veículos é similar e, por consequência, o tempo de ciclo de cada modelo é parecido. Embora o sequenciamento dos veículos seja um aspecto importante do ciclo produtivo em outros setores da companhia (Boysen et al. [2009] apresenta um *survey* em problemas de sequenciamento de modelo misto), esta parte da linha, por ter uma carga de trabalho relativamente parecida entre os veículos, permite que o balanceamento de cada veículo seja considerado de forma individual.

4.1. Coleta dos Dados do Modelo

A coleta dos dados do modelo aconteceu em três etapas: primeiro foram definidos quais pontos deveriam ser realizados a partir do estudo das folhas de processo disponibilizadas pela empresa, posteriormente foram levantados parâmetros referentes aos tempos de processamento (tempo de solda, movimentação entre regiões, movimentação entre acessos e tempo de preparação) a partir de análises detalhadas de filmagens das atividades dos robôs na linha, por fim, com ajuda de um *software* de simulação 3D, foram coletadas as capacidades de cada robô em acessar cada região de solda.

Também com ajuda do *software* de simulação 3D, foram levantadas quais regiões eram influenciadas pelo risco de colisão ou interferência entre os robôs do lado direito e esquerdo da linha e, a partir dessa informação, foi realizada a divisão entre pontos simétricos e não simétricos.

Ao todo foram criadas seis instâncias, três com o conjunto completo de pontos e três com o conjunto semi-simétrico. Conforme a Tabela 4, em média o número de pontos de solda balanceados para o modelo que trabalha com variáveis simétricas é aproximadamente 43% menor.

Tabela 4: Número final de pontos de solda que devem ser balanceados pelos 26 robôs da linha apresentada na Figura 7.

	Completo	Simétrico
Modelo 1	488	284
Modelo 2	469	261
Modelo 3	464	257

4.2. Resultados

Os testes computacionais foram conduzidos com um computador core i5 (2.3 GHz) com 8 GB de memória RAM e o IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.3 foi utilizado para resolver todas as instâncias. O tempo computacional limite para resolver cada instância foi limitado a uma hora. A Tabela 5 mostra a solução do estudo de caso apresentado. Três modelos de veículos foram analisados e na Tabela 5 estão apresentados os melhores valores para o tempo de ciclo que puderam ser encontrados em 3600 segundos e o *lower bound* de cada caso.

Os resultados do estudo de caso mostram que o modelo com restrições de simetria permitiu que o *solver* chegasse a soluções melhores, no tempo de 3600 segundos, em todos os modelos

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

considerados. Foi verificado uma melhora na qualidade da resposta de, em média, 91 unidades de tempo, chegando a 120 unidades de tempo para o modelo 1.

Tabela 5: Melhor resposta (UB - *Upper Bound*) e limite inferior (LB - *Lower Bound*), em unidades de tempo, para cada modelo do estudo de caso apresentado.

	Semi-Simétrico		Completo			
	UB	LB	UB	LB	Melhoria UB (em u.t.)	Melhoria LB (em u.t.)
Modelo 1	2880	2817	3000	2856	120	39
Modelo 2	2877	2823	2928	2796	51	27
Modelo 3	2802	2703	2904	2730	102	27

O valor de UB do modelo semi-simétrico está entre valor de UB e de LB para o modelo completo. Essa necessária consistência é consequência do equacionamento do modelo proposto: Após completar a resposta com os pontos de solda simétricos na etapa de pós-processamento, é preciso que o tempo de ciclo da resposta pós-processada seja igual ao da original. Como é preciso que a resposta pós-processada seja factível em relação ao modelo completo, é necessário que $UB_{semi} \geq LB_{completo}$.

Ressalta-se que a solução matemática obtida para os três modelos foi verificada pelos especialistas da companhia a partir do emprego de técnicas de simulação e considerada viável.

5. Conclusão

O balanceamento de linhas robóticas de solda é um problema desafiador computacionalmente. No entanto, casos práticos frequentemente apresentam simetrias na estruturação da linha. O modelo apresentado neste artigo explora estas simetrias e permite a redução do tamanho do problema por meio da retirada de pontos simétricos de um dos lados do veículo e da incorporação da exigência de que robôs equivalentes despendam tempos equivalentes em regiões simétricas. Apesar da abordagem de solução proposta descartar soluções factíveis, tal abordagem levou a melhores respostas válidas para três instâncias práticas, dentro do tempo limite de uma hora, em relação ao trabalho proposto por Lopes et al. [2017].

Todos os pontos que inicialmente foram retirados do conjunto simétrico, com o objetivo de manter a a simetria perfeita do mesmo, foram reincorporados no pós processamento do resposta. Dos 13 pares de robôs que compõem a linha de produção apresentada no estudo de caso, 10 ficaram com suas soluções exatamente simétricas e, portanto, os programadores da linha deverão programar completamente apenas 16 robôs; os outros 10 que ficaram com solução simétrica terão seus programas espelhados, reduzindo o tempo necessário para implementar a resposta indicada pelo modelo matemático.

Apesar do estudo de caso ser focado em um problema específico de uma indústria do setor automobilístico a característica semi-simétrica de operação em linhas robóticas pode ser encontrada em diversas empresas do setor automotivo, o que torna a aplicação realizada factível em vários cenários industriais similares.

Como futuro desenvolvimento, a abordagem de solução poderia ser adaptada para escolher dentre um conjunto de tarefas maior do que a capacidade da seção de linha analisada, podendo assim ser utilizada como uma abordagem que indica quais as tarefas que melhor se adaptam com cada segmento de linha produtiva. Ressalta-se, adicionalmente, que problemas de simetria são recorrentes em linhas robóticas aplicadas à indústria automotiva, corroborando para a importância da abordagem de solução apresentada.

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro oriundo da Fundação Araucária (chamada pública 041/2017), do CNPq (processos 406507/2016-3 e 307211/2017-7). Adicionalmente, os autores agradecem à Renault do Brasil pela oportunidade de trabalhar em suas linhas de produção.

Referências

Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., e Ilhan, E. (2008). Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials and Design*, 29(7):1427–1431.

Battaïa, O. e Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2):259–277. ISSN 09255273.

Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple line balancing problem. *Management Science*, 32:909–932.

Boysen, N., Fliedner, M., e Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, 192:349–373.

Dimitriadis, S. G. (2006). Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers groups operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research*, 33:2757–2774.

Falkenauer, E. (2005). Line Balancing in the Real World. In *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM 05*, p. 360–370, Lyon.

Lopes, T. C., Sikora, C. G. S., Molina, R. G., Schibelbain, D., Rodrigues, L. C. A., e Magatão, L. (2017). Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. *European Journal of Operational Research*, 263(3):1033–1048.

Michalos, G., Makris, S., Papakostas, N., Mourtzis, D., e Chryssolouris, G. (2010). CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2):81–91.

Raj, A. V., Mathew, J., Jose, P., e Sivan, G. (2016). Optimization of Cycle Time in an Assembly Line Balancing Problem. *Procedia Technology*, 25(Raerest):1146–1153.

Rubinovitz, J. e Bukchin, J. (1991). Design and balancing of robotic assembly lines. In *Proc. of the fourth world conference on robotics research*, Pittsburgh, PA.

Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6:18–25.

Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing assembly lines*. ed. Physica, Heidelberg, 2nd edition.

Wee, T. e Magazine, M. (1982). Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters*, 1(2):56–58.

https://proceedings.science/p/85482?lang=pt-br