

REDUÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL PARA O BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MANUFATURA ROBOTIZADA

Daniel Schibelbain

Milton Luiz Polli

Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, Paraná, Brasil, 80230-901.

danielschibelbain@alunos.utfpr.edu.br, polli@utfpr.edu.br, lcar@utfpr.edu.br

Resumo. Nesse artigo 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 em 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, sem impacto na qualidade da resposta.

Palavras-chave: Redução Tempo Computacional, Balanceamento de Linhas de Produção, Programação Linear Inteira Mista

1. INTRODUÇÃO

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; BATTIA 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 pulverizar 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 em 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 disso, 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 et al., 2017) que também demandam tempo e recursos preciosos da indústria.

Nesse contexto de otimização de processos, dois aspectos importantes precisam ser avaliados: o tempo computacional necessário e a quantidade de modificações propostas na linha de produção. Para isso, como contribuição ao modelo matemático proposto inicialmente por Lopes et al. (2017), o presente trabalho visa simplificar o balanceamento da linha de produção, através da divisão e solução do problema em partes. Espera-se, com isso, que o tempo computacional seja menor devido à segmentação do problema (separação das variáveis, restrições, dados de entrada...). Se isso for alcançado, permitirá que possam ser realizadas mais iterações e, com isso, avaliadas mais soluções num mesmo intervalo de tempo.

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.

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*®, 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 (Siemens, 2021). Porém, por se tratar de peças com geometria complexa, 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.

No modelo matemático apresentado por Lopes et al. (2017), há a possibilidade de se obter a solução ótima para o problema de balanceamento. Porém, não há a garantia de que esta solução ótima será obtida em tempo computacional satisfatório. Por exemplo, ao testar o impacto da inserção ou remoção de tarefas numa estação robotizada, esse teste pode ter um tempo computacional significativo. A proposta desse trabalho é viabilizar que vários testes possam ser realizados dentro de um tempo aceitável. Para isso, propõe-se disponibilizar um modelo matemático capaz de propor soluções otimizadas para o problema, a partir dos parâmetros de entrada e restrições encontradas e de obter resultados similares ou melhores que Lopes et al. (2017) em um menor tempo computacional.

Além disso, uma discussão, a partir do critério de parada estabelecido, sobre a qualidade da resposta fornecida pelos dois modelos pode trazer elementos de comparação relevantes.

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.

2. METODOLOGIA

Para a realização do estudo será considerada a configuração inicial da linha de produção com 34 robôs alocados em 8 estações, com aproximadamente 450 pontos de solda no total, conforme ilustrado na Fig. 1.

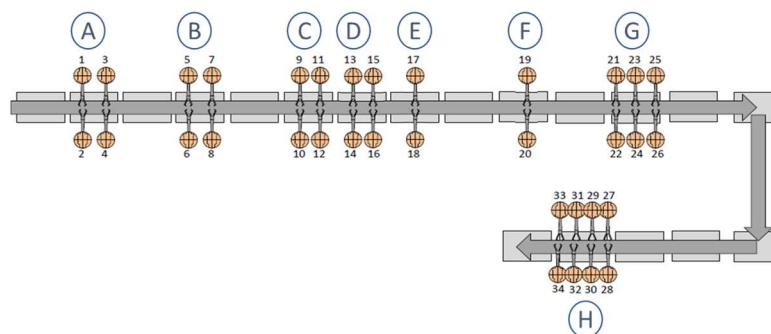


Figura 1. Configuração inicial da linha de produção. Fonte: Molina (2018) adaptado

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.

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 necessária nenhuma espécie de sequenciamento.

Trata-se de uma linha de produção com tipo de movimentação assíncrona entre as estações (GROOVER, 2017) – 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 (BOYSEN *et al.*, 2009), isto é, há 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.

2.1. Modelo Matemático do Problema

Nessa seção serão abordados conceitos inicialmente apresentados por Lopes *et al.* (2017), com algumas contribuições para o balanceamento parcial. O caso prático estudado nesse trabalho é de uma linha de produção já instalada e operacional, onde procura-se diminuir seu tempo de ciclo. 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. 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.

A função objetivo é dada por

$$\text{Minimizar } Z = vCT_i \quad \forall i \in I \quad (1)$$

onde o tempo de ciclo da linha de produção (vCT_i) corresponde ao tempo de ciclo dos i grupos de estações. O tempo de ciclo de cada estação, por sua vez, é definido pelo maior tempo de ciclo entre os robôs que a compõem.

Para traduzir na linguagem matemática as condições reais da linha de produção em estudo, é necessário inicialmente separar os pontos de solda em grupos, definidos de acordo com suas características de posicionamento, proximidade, espessura e quantidade de chapas a serem soldadas, que serão identificados como regiões de solda. Além disso, a definição dos acessos dos robôs à essas regiões de solda é fundamental para identificar não somente as possíveis distribuições de tarefas entre eles, mas também as interferências entre robôs trabalhando em uma mesma estação de solda. A Figura 2 mostra uma representação esquemática da divisão do veículo em acessos e regiões de solda utilizados nessa formulação.

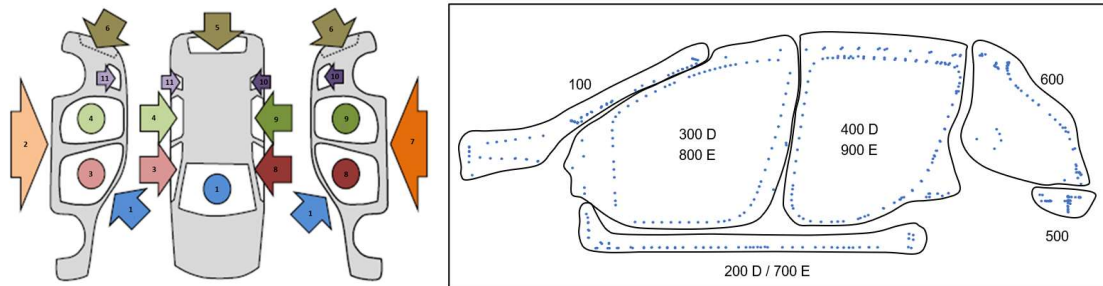


Figura 2: (a) Identificação das acessibilidades; (b) Regiões de solda. Fonte: (a) Lopes *et al.* (2017) adaptado; (b) Autoria própria

Restrições por interferência devem ser consideradas no problema, para que o modelo não forneça respostas infactíveis na prática. A primeira delas é de que robôs atuando numa mesma estação de solda, lado a lado, podem utilizar o mesmo acesso durante a realização de suas trajetórias, porém com uma penalização devido à disputa de espaço gerada. Isso é necessário para mensurar o tempo de espera imposto a um deles enquanto o outro está executando suas tarefas para mitigar o risco de colisão entre eles. Além disso, possíveis cruzamentos entre robôs atuando em diferentes acessos não são permitidos pela mesma razão.

O cálculo de tempo de ciclo é realizado com base nos tempos de soldagem e movimentação dos robôs, que são parâmetros definidos de acordo com o tipo de robô, ferramenta de solda e as características do produto. Entretanto, com relação aos tempos de movimentação dos robôs, devem ser observados ganhos relativos a movimentos sendo realizados em continuidade entre regiões e acessos vizinhos. Isso ocorre quando a passagem de uma região de solda à próxima se dá de maneira contínua, sem a necessidade de reorientação de eixos ou recuo dos robôs. O mesmo conceito se aplica aos acessos. Esses ganhos de tempo são considerados através do termo adjacências na formulação matemática.

Uma estratégia que permite simplificar a modelagem do problema é o conceito de tuplas. 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.

Agora imagine 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 será limitado aos valores pertencentes a esse conjunto, o que elimina a necessidade de avaliar soluções sabidamente infactíveis ou adicionar mais restrições à formulação matemática. Segundo Sikora *et al.* (2015), a modelagem com tuplas pode conduzir a melhores resultados computacionais.

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. As tabelas 1 e 2 apresentam os conjuntos de tuplas utilizados na formulação do modelo de base apresentado por Lopes *et al.* (2017).

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. A partir desse momento, todos esses conjuntos de valores serão identificados como tuplas. A Tabela 1 apresenta os conjuntos de variáveis, suas respectivas tuplas e seu significado.

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
$bWRAA$	(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

Tabela 1. Conjuntos de variáveis e seus significados. Fonte: Molina (2018) modificado.

Além das tuplas apresentadas, existem outros parâmetros numéricos como o tempo, número de pontos de solda e velocidades, que são indicados na Tab. 2.

Parâmetro	Conjunto	Tupla	Significado do 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

Tabela 2: Parâmetros usados para ocorrência, controle de tempo e restrições de interferência. Fonte: Molina (2018).

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 Equação (2) apresenta a formulação matemática para definir esse tempo de ciclo, baseada nos tempos de solda, movimentações e adjacências entre regiões e acessos.

$$vCTW_w \geq \sum_{\substack{(w,r,a) \in WRA \\ r \in R}} (T_w + T_r) \cdot nWRA_{(w,r,a)} + nMR_w \cdot \frac{T_{movR}}{V_w} + nMA_w \cdot \frac{T_{movA}}{V_w} - \frac{T_{adjR}}{V_w}.$$

$$\sum_{(w,r_1,r_2,a) \in WRRR} bWRRR_{(w,r_1,r_2,a)} - \frac{T_{adjA}}{V_w} \cdot \sum_{(w,a_1,a_2) \in WAA} bWAA_{(w,a_1,a_2)} + T_s \quad \forall (w,s) \in WS$$

O primeiro termo da equação (2) 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 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. 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. A seguir, são consideradas as adjacências entre regiões e acessos, respectivamente. Finalmente, o último termo da Eq. (2) é utilizado para representar o tempo de entrada e saída dos veículos das estações de solda, que pode variar de uma estação para outra.

2.2. Método de Balanceamento Parcial

Tendo em vista a quantidade de robôs, 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 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. Caso isso não fosse considerado, o modelo poderia encontrar soluções que na prática não poderiam ser implementadas. Além disso, foi utilizado como parâmetro para dividir as estações a partir do valor médio de pontos de solda por robô, tomados a partir da distribuição inicial. A Figura 3 apresenta a divisão proposta.

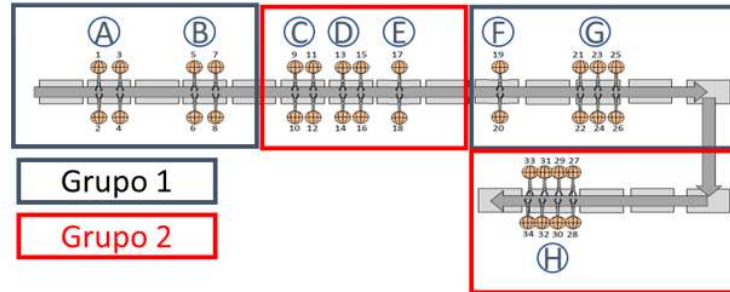


Figura 3: Divisão da linha de produção em grupos

Devido às características da linha de produção, como o conjunto de restrições, regiões e ferramentas de solda muito específicas em alguns casos, robôs com características e alcance diversos, entre outros, utilizar como critério de parada a diferença de tempo de ciclo, individualmente, entre os robôs mais carregados de cada grupo 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 dois grupos. Com isso, espera-se realizar um comparativo mais coerente e que possa ser utilizado independentemente do modelo de veículo analisado.

O método proposto para o balanceamento parcial pode ser descrito por:

1. Executar balanceamento parcial;
2. Se a solução proposta é melhor que a solução atual, armazenar a solução proposta como nova solução atual;
 - a. Se a diferença entre as médias de tempo de ciclo dos dois grupos é igual ou inferior à 1 unidade de tempo (ut), parar;
3. Caso contrário, a partir da solução atual, realizar troca de pontos de solda entre os grupos, sujeito à
 - a. Escolher pontos pertencentes às regiões soldadas pelo(s) robô(s) de maior tempo de ciclo, que possuam regiões adjacentes já sendo soldadas no outro grupo e que ainda não tenham sido testadas;
 - b. Retornar ao passo 1;

3. RESULTADOS

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

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 Lopes et al. (2017) que é de 3600 segundos.

Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 3, onde: CT_i representa o tempo de ciclo para cada grupo ou para o modelo completo; $\overline{CT}_i$ representa a média dos tempos de ciclo dos robôs que compõem o i-ésimo grupo ou o modelo completo; GAP representa a diferença percentual entre a solução proposta pelo modelo e a melhor solução relaxada, que desconsidera as restrições de integralidade, e Tempo refere-se ao tempo computacional utilizado, em segundos.

Ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
Modelo Completo	CT_c	411	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\overline{CT}_c$	399	-	-	-	-	-	-	-	-
	GAP	6,33%	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tempo (s)	3600	-	-	-	-	-	-	-	3600
Grupo 1	CT_1	405	416	416	405	405	408	405	405	-
	$\overline{CT}_1$	393	404	403	397	396	398	397	397	-
	GAP	0	2,64%	2,14%	0	0	0,74%	0	0	-
	Tempo (s)	1,019	60,13	61,03	0,979	1,889	60,12	26,40	2,318	213,89
Grupo 2	CT_2	458	408	414	432	427	428	411	411	-
	$\overline{CT}_2$	423	393	401	415	406	407	399	397	-
	GAP	0	0	0,47%	0	0	0	0	0	-
	Tempo (s)	0,935	2,307	60,13	34,97	3,071	4,601	4,803	1,193	112,01

Tabela 3. Resultados de tempo de ciclo, média de tempo de ciclo, *gap* de integralidade e tempos computacionais fornecidos pelo Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

A partir da Tab. 3, 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 (3600s), o que é um dos objetivos propostos para esse trabalho. Isso se explica através da diminuição na quantidade de restrições e variáveis analisadas em cada grupo, apresentada na Tab. 4. Além disso, nota-se 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 desnecessários dos robôs, ou seja, menos operações que não agregam valor efetivo ao veículo. Essa diferença, ainda que pequena, 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.

Com relação aos GAP's de integralidade, apenas em dois ensaios a otimalidade não foi alcançada dentro do limite de tempo de execução estabelecido. Entretanto, quando executados até a otimalidade, os ensaios 2, 3 e 6 não tiveram nenhuma evolução de resposta no tempo de ciclo.

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%

Tabela 4. Comparação entre quantidade de restrições e variáveis para o Modelo Completo e Balanceamento Parcial.

Pode-se constatar na Tab. 4, que 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. Isso tem influência direta no tempo computacional, haja vista que o espaço de busca da solução ótima é significativamente reduzido.

4. CONCLUSÕES

A partir do modelo de balanceamento parcial proposto, houve um ganho significativo no tempo computacional em comparação ao modelo disponível na literatura, sem prejuízo da qualidade da resposta apresentada. Esse ganho está diretamente relacionado à diminuição do conjunto de variáveis e restrições a serem observados quando o problema é fracionado. Isso permite a realização de mais iterações e possibilita que sejam avaliadas diversas soluções em um mesmo intervalo de tempo. Com isso, as tomadas de decisão podem ocorrer de forma mais dinâmica e aportar soluções mais rápidas para as linhas de produção, o que é fundamental na indústria automotiva. O critério de parada mostrou-se eficaz e possibilitou uma comparação relevante sobre a qualidade das respostas obtidas.

Como oportunidade para futuras pesquisas, pode-se adaptar o conceito desse modelo matemático para utilização em outras linhas de produção, com diferentes características, expandindo sua aplicabilidade.

5. REFERÊNCIAS

- Battaia, Olga; e Dolgui, Alexandre., 2013. “A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches”. In *International Journal of Production Economics*, v. 142, n. 2, p. 259–277.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2007. “A classification of assembly line balancing problems”. In *European Journal of Operational Research*, v. 183, n. 2, p. 674 - 693, ISSN 03772217.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2009 “Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions”. In *Production Planning and Control*, v. 20, n. 5, p. 455 - 471, Taylor & Francis.
- Groover, Mikell P., 2017. “Fundamentos da Moderna Manufatura”. LTC, 5ª. ed.
- Hillier, F. S. e Lieberman, G. J., 2015. “Introduction to Operations Research”. Mc Graw Hill, 10th ed.
- Lopes, T. C. *et al.*, 2017. “Balancing a Robotic Spot-Welding Manufacturing Line: An Industrial Case Study”. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 203, p. 216-224.
- Marques, P. V., Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q., 2017. “Soldagem: fundamentos e tecnologia”. Elsevier, 4ª ed.
- Molina, R. G. *et al.*, 2018. “Balanceamento de uma linha de manufatura robotizada com características simétricas por meio de programação matemática”. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Siemens, 2021. “Process Simulate Manufacturing process verification in powerful 3D environment” 25 Jan. 2021 <https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/7457_tcm642-80351.pdf>
- Sikora, C. G. S., Lopes T. C. e Magatão, L., 2015. “Variable Sets Reduction for Assembly Line Balancing Problem: MILP Model and Case Studies” In *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p 166-176.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

DECREASE OF COMPUTATIONAL TIME FOR BALANCING A ROBOTIZED MANUFACTURING LINE

Daniel Schibelbain

Milton Luiz Polli

Luiz Carlos de Abreu Rodrigues

Federal University of Technology - Parana – UTFPR. 3165, Sete de Setembro Avenue, Curitiba, Parana, 80230-901, Brazil.
danielschibelbain@alunos.utfpr.edu.br, polli@utfpr.edu.br, lcar@utfpr.edu.br

Abstract. *In this paper, a different 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 no impact on the quality of the response.*

Keywords: *Computational Time Reduction, Assembly Line Balancing, Mixed-Integer Linear Programming.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.