LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

UMA HEURÍSTICA PLIM PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES EM MÁQUINAS CNC

Tobias Antonio Webber Antunes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil
tatobiasantunes5@gmail.com

Guilherme Dhein
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil
gdhein@redes.ufsm.br

Olinto César Bassi de Araújo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil
olinto@ctism.ufsm.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma heurística baseada em programação linear inteira mista (PLIM) para resolver um problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC no qual a máquina possui múltiplas ferramentas que realizam operações obedecendo restrições de precedência. A heurística compreende duas fases. Na primeira fase as trajetórias de cada ferramenta são calculadas e na segunda fase estas trajetórias são sequenciadas, de acordo com as restrições de precedência, para fornecer uma solução para o problema. Os resultados computacionais indicam que a heurística proposta supera métodos existentes na literatura em testes realizados com instâncias comumente utilizadas.

PALAVRAS CHAVE. Sequenciamento, Heurística baseada em PLIM, Máquina CNC.

MH - Metaheuristicas, PO na industria, PM - Programação Matemática.

ABSTRACT

This work presents a mixed integer linear programming (MILP) based heuristic to solve a precedence-constrained operation sequencing on CNC machines problem in which the machine has multiple tools. The heuristic comprises two phases. In the first phase the trajectories of each tool are calculated and in the second phase these trajectories are sequenced, according to the precedence constraints, to provide a solution to the problem. Computational results of the proposed method on commonly used instances indicate that it outperforms recent existing methods in the literature.

KEYWORDS. Sequencing, MILP based heuristic, CNC Machine.

MH - Metaheuristics, OR in industry, MP - Mathematical Programming.

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

1. Introdução

A sofisticação dos sistemas produtivos contemporâneos proporciona inúmeras vantagens competitivas, tais como disponibilidade de informações em tempo real e elevado nível de automação. De acordo com as características do segmento onde atuam, os diferentes ramos da indústria de transformação aproveitam estas vantagens de formas distintas, direcionando esforços no aprimoramento de processos em diferentes níveis organizacionais. No setor metal-mecânico, a automação frequentemente tem foco nos processos de nível operacional, destacando-se o uso de máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) para realizar operações de solda e usinagem.

Automatizar processos de usinagem possibilita redução no número de peças defeituosas e maior agilidade na execução de trabalhos de alta precisão; ainda assim, para diluir os altos custos fixos relacionados à aquisição de maquinário e softwares, é necessário um bom planejamento para utilização dos recursos de produção disponíveis, tal que seja despendido o menor tempo possível em operações que não agregam valor aos produtos. Este tempo, referido na literatura especializada como tempo auxiliar, consome entre 40 e 90% do tempo total do processo [Abbas et al., 2011].

No que se refere a operações de usinagem em máquinas CNC, o planejamento ótimo do sequenciamento de operações para produção de peças é um problema recorrente na industria. Não raro, estas operações demandam diferentes tipos de ferramentas com restrições de precedência, como furação e rosqueamento em um mesmo ponto da peça.

Esta classe de problemas é referida na literatura como *hole making operations* e *drilling path optimization* [Abdin et al., 2017]. Os modelos desenvolvidos para descrever tais problemas buscam a minimização do tempo total do processo, percurso ou energia necessários para realizar as operações de usinagem. Esta estrutura de problemas de sequenciamento modela de maneira equivalente outros processos como injeção de plásticos, corte com plasma e estampagem [Ghaiebi e Solimanpur, 2007].

De acordo com a revisão crítica de Dewil et al. [2017], grande parte das publicações aborda o sequenciamento considerando máquinas com uma única ferramenta, originando formulações análogas às do problema de otimização clássico denominado Problema do Caixeiro-Viajante (PCV). Em se tratando de máquinas com múltiplas ferramentas, as formulações são redutíveis ao PCV apenas se não existir uma sequência obrigatória para determinados conjuntos de operações. Se houver hierarquia entre certas operações, é mais adequado modelar o problema como o Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência (PCVRP). Os problemas de sequenciamento em máquinas CNC redutíveis aos PCVRP são, por sua vez, redutíveis ao PCV e portanto pertencem a classe NP-difícil. Com isso, não são conhecidos algoritmos polinomiais para resolver o problema de maneira eficiente.

Neste trabalho foi desenvolvida uma heuristica baseada em programação linear inteira mista (PLIM) para resolução de um problema de sequenciamento de operações de furação em máquinas CNC. Especificamente são consideradas situações nas quais os furos requerem operações ordenadas que utilizam múltiplas ferramentas. Estas situações originam problemas de otimização recorrentes no meio industrial que demandam soluções de boa qualidade obtidas em tempo computacional compatível com as necessidades do ambiente fabril.

Os demais tópicos do artigo estão organizados como se segue. Na seção 2 é apresentada uma breve revisão da literatura sobre problemas de sequenciamento de operações em máquinas

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

CNC com múltiplas ferramentas e os respectivos métodos de solução comumente empregados. A seção 3 é dedicada à descrição do problema de sequenciamento de operações estudado neste trabalho, e na seção 4 é apresentada e detalhada a heurística PLIM proposta. A seção 5 apresenta os resultados de testes computacionais realizados em instâncias presentes na literatura. A seção 6 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos subsequentes.

2. Referencial Teórico

Na literatura especializada são encontrados trabalhos que abordam máquinas equipadas com uma ou múltiplas ferramentas. Exemplos de trabalhos que abordam problemas de sequenciamento em máquinas equipadas com uma ferramenta correspondem aos artigos publicados por [Kolahan e Liang, 2000], no qual a resolução empregou uma abordagem de Busca Tabu e [Onwubolu e Clerc, 2004], cuja resolução empregou um algoritmo estruturado em *Particle Swarm Optimization* (cujo acrônimo, em inglês, é PSO).

Segundo os dados apresentados por [Dewil et al., 2017], os problemas que representam máquinas equipadas com uma ferramenta ou com múltiplas ferramentas e operações sem ordem hierárquica, análogos ao PCV, constituem 79% das publicações do período analisado, de 1998 à 2016. Considerando o estado da arte da pesquisa, estas abordagens pouco contribuem para o problema em si, dado que existem métodos de resolução robustos para o PCV euclidiano capazes de resolver na otimalidade instâncias contendo milhares de vértices. Sabendo que em ambientes reais de produção a maioria das peças fabricadas em máquinas CNC requer um número de operações consideravelmente menor, normalmente inferior a 400, o PCV pode ser considerado, da perspectiva industrial, um problema resolvido.

Em contraste com o número expressivo de artigos contendo formulações do PCV, os trabalhos de otimização de sequências de operações com requisitos de precedência, análogos ao PCVRP, representam apenas 13% das publicações do período analisado na revisão de [Dewil et al., 2017]. Modelar o problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC com estrutura do PCVRP significa, em termos simples, replicar os pontos de furação para cada ferramenta estabelecendo um conjunto de combinações ou operações ferramenta-furo, tal que determinadas combinações devem compor a solução do problema necessariamente antes de outras.

A resolução desta classe de problemas de sequenciamento não é trivial e resulta em um *tradeoff* entre tempo computacional e qualidade das soluções. A despeito da insistência de alguns autores em propor metaheurísticas baseadas em metáforas, marcante entre as publicações de problemas de sequenciamento com ferramenta única, os problemas de sequenciamento com múltiplas ferramentas foram majoritariamente resolvidos com algoritmos estruturados em ACO, PSO ou variações e hibridizações do Algoritmo Genético (acrônimo GA, em inglês).

No artigo de Ghaiebi e Solimanpur [2007] um algoritmo baseado em ACO foi utilizado para otimizar a trajetória de ferramentas em máquinas CNC. O algoritmo foi testado em uma instância proposta pelos autores, com 12 furos de três bitolas diferentes que totalizou 36 operações executadas por 6 ferramentas com tempo de troca variável entre cada par. O tempo auxiliar total para a instância testada foi de $470s$, $274s$ gastos com trocas de ferramentas e $196s$ com a movimentação das ferramentas. Uma estratégia de otimização baseada em ACO também foi apresentada por [Liu

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

et al. 2013]. Para testar o método, os autores propuseram uma instância do problema na qual 42 furos com no máximo três bitolas distintas geraram uma combinação de 105 operações realizadas por 7 ferramentas. A eficiência do método foi atestada pela comparação com sequências padronizadas fornecidas pela interface entre a máquina CNC e softwares CAD. Para a instância proposta, o menor tempo auxiliar foi de $131,4s$, considerando a distância euclidiana.

O método apresentado por [Zhu e Chen, 2011] consiste na aplicação de GA em múltiplos níveis, em que o primeiro nível busca um ótimo local para os furos com mesmas especificações para, em seguida, aplicar novamente o GA a fim de obter o ótimo global considerando os ótimos locais previamente processados. O método foi testado em uma instância com 8 furos e um total de 12 operações realizadas por 6 ferramentas distintas. O tempo auxiliar total obtido para esta instância foi de $832,2s$. A estratégia de otimização apresentada por [Chen e Guo, 2012] também desenvolveu uma variação do GA. Para a validação do algoritmo, os autores propuseram uma instância com 20 operações e compararam o valor da função objetivo obtido pelo GA com o menor valor entre 100 soluções geradas aleatoriamente e com o valor da solução construída através de um método de sequenciamento que conecta os pontos com menor variação de posição y dentro de um sistema de coordenadas cartesianas (x, y) – chamado de 'linha a linha'. A menor solução aleatória apresentou um deslocamento superior a $6000\ mm$, o valor obtido através do método linha a linha foi de $3480\ mm$ e do GA de $3106\ mm$. Uma hibridização do GA com a heurística *Cucko Search* foi proposta por [Lim et al., 2016] para atacar problemas de sequenciamento. O algoritmo proposto reduziu o tempo auxiliar obtido na instância proposta por Ghaiebi e Solimanpur [2007] em 23%, totalizando $222s$ de movimentação e $144s$ de tempo de troca de ferramentas.

No artigo publicado por [Hsieh et al., 2011] foi desenvolvido um algoritmo baseado em PSO, testado na instância proposta por Ghaiebi e Solimanpur [2007]. Os autores reportaram um tempo auxiliar de $446\ s$, 6% menor que o obtido pelos pesquisadores que propuseram a instância.

Entre os trabalhos que empregaram outras metaheurísticas, destaca-se o artigo publicado por Tamjidy et al. [2015], no qual é elaborada uma metaheurística denominada *Biogeographical Based Optimization* (BBO, em inglês), testada na instância proposta por Liu et al. [2013]. Os autores reportaram redução de $9,28\%$ no tempo auxiliar do processo de usinagem em relação ao tempo relatado em [Liu et al. 2013].

A distinção estrita entre métodos de solução aproximados e exatos é apontada por [Hooker, 2015] como um fator restritivo para o avanço de técnicas de resolução em problemas difíceis. Os trabalhos relacionados com sequenciamento em máquinas CNC não utilizaram abordagens de programação matemática, restringindo modelos a caracterização dos problemas e ignorando procedimentos como obtenção de limitantes [Dewil et al. 2017]. Aprimoramentos em métodos exatos de resolução e nas tecnologias de hardware têm motivado autores a desenvolver métodos heurísticos contendo fases nas quais modelos de programação matemática são resolvidos, o que deu origem a uma 'terceira via' que combina abordagens exatas e heurísticas [Jourdan et al., 2009].

3. Descrição do Problema

O problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC abordado neste trabalho consiste em otimizar a sequência de operações de usinagem realizadas por uma máquina de

três eixos capaz de executar operações de furação, rosqueamento e mandrilamento. A máquina, equivalente àquela descrita nos artigos de [Liu et al., 2013] e [Tamjidy et al., 2015], possui uma estrutura movente do tipo pórtico e um magazine contendo múltiplas ferramentas, que acompanha o deslocamento da estrutura movente e possibilita que a troca seja efetuada em diferentes posições.

Mais especificamente, no que se refere a troca de ferramenta em uma CNC com estrutura movente do tipo pórtico, o processo ocorre da forma que segue. Para fins de exemplo, considere uma peça cujo roteiro de fabricação demanda furos dispostos em um arranjo bidimensional (x, y). Após uma determinada operação o_i ser finalizada, antes de realizar uma nova operação, a troca de ferramenta sempre ocorre na posição $(0, y)$, em que y é a ordenada do furo correspondente a o_i. No caso da operação ser a última, a estrutra movente se desloca diretamente para o ponto $(0, 0)$. Por fim, o deslocamento entre pontos de furação sem relação de precedência ocorre de acordo com a menor distância possível (seja Euclidiana ou Manhattan). Um exemplo didático com dois tipos de furos e 15 operações realizadas por duas ferramentas é apresentado na Figura 1.

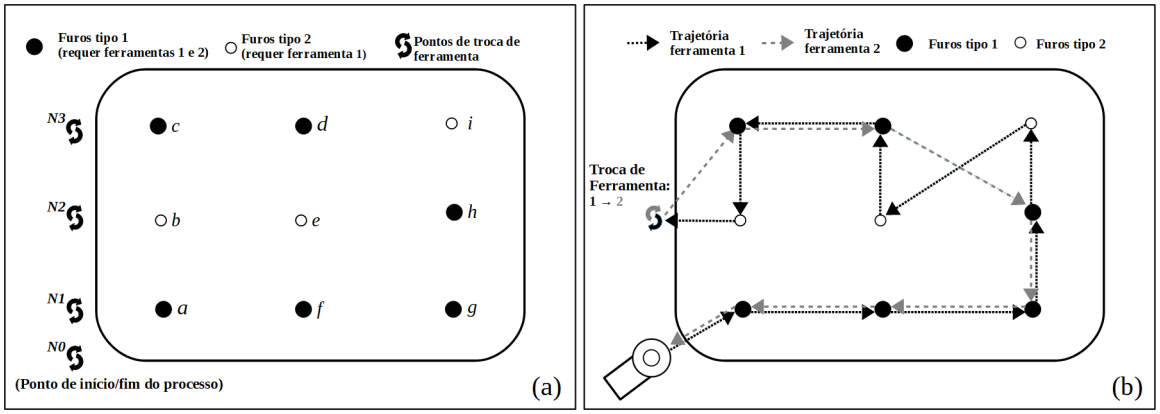


Figura 1: Exemplo de instância do problema (a) e solução factível (b).

A estrutura movente opera com dois servomotores que deslocam a ferramenta ao longo de um plano bidimensional. Os motores podem ser acionados simultaneamente ou alternadamente, o que possibilita mensurar a distância entre os furos como Euclidiana ou Manhattan, respectivamente. Na máquina considerada no problema em questão, o tempo de troca entre as ferramentas usualmente é maior que o maior tempo de deslocamento entre as operações.

Este problema de sequenciamento em máquinas CNC tem como base o PCVRP, em que os pontos a serem visitados são representados pelas operações referentes as combinações furo-ferramenta e as restrições de precedência são explicitadas a partir das operações realizadas em um mesmo furo. Formalmente, o problema de sequenciamento de tarefas em máquinas CNC pode ser descrito por um grafo orientado $G = (O, A)$, em que os elementos do conjunto O representam as operações e os elementos de A os arcos que representam o deslocamento das ferramentas de usinagem entre as operações. A matriz de tempos de deslocamentos que representa os arcos em A é levemente assimétrica, uma vez que operações sequenciais o_i e o_j, quando realizadas por ferramentas distintas, devem ter o custo do deslocamento entre elas substituído por um custo de

deslocamento que considera a estratégia usada na troca de ferramentas. Por fim, consideramos um conjunto P_i associado a cada operação $i \in O$, tal que, quando não-vazio, contém elementos que representam as operações que devem ser executadas anteriormente a operação i.

4. Heurística PLIM proposta

O método de solução proposto opera com estrutura de duas fases: pré-processamento e a concatenação. A ideia é similar ao método de otimização apresentado em [Zhu e Chen, 2011].

4.1. Fase de pré-processamento

Quando em uma instância o tempo de troca de ferramentas for maior que o maior tempo de deslocamento entre as operações, é razoável supor que as melhores soluções do problema são aquelas com menor número de troca de ferramentas. Com isso, o método procura soluções nas quais as ferramentas são selecionadas somente uma vez e, uma vez selecionadas, realizam todas as operações a elas designadas.

Segundo esta hipótese, é utilizado um procedimento de pré-processamento no qual são resolvidos subproblemas referentes as trajetórias para execução do conjunto total de operações de cada ferramenta. Dado que o magazine da máquina é móvel, para cada ferramenta, são considerados vários subproblemas com os diferentes pares de pontos de ínicio e término da trajetória. Os subproblemas são modelados como um PCV com formulação de Miller, Tucker e Zemlin [Oncan et al., 2009], com distância nula entre o ponto inicial e final de troca de ferramentas, e resolvidos com resolvedor de programação matemática com tempo de resolução limitado pelo parâmetro *TLimite*. Observe que, para cada subproblema, o valor da função objetivo corresponde ao tempo auxiliar total de uma dada ferramenta para executar todas as operações designadas a ela, iniciando e terminando em pontos utilizados para troca de ferramenta. Na segunda etapa, as trajetórias definidas para cada ferramenta são concatenadas de modo a fornecer o sequenciamento completo das operações, respeitando os pontos de início, término das trajetórias e precedência entre elas.

4.2. Fase de concatenação

Nesta fase, um modelo matemático é utilizado para concatenar as trajetórias de cada uma das n ferramentas, em diferentes pontos de início e término, de modo que uma sequência factível seja construída com $(n - 1)$ trocas de ferramentas.

Parâmetros

N : conjunto de índices das posições para a troca de ferramentas;
F : conjunto de índices das ferramentas;
F^+ : conjunto de índices das ferramentas que inclui a ferramenta artificial 0, $F^+ = F \cup \{0\}$;
$\mathcal{S}_f$: conjunto de índices das ferramentas que devem suceder a ferramenta f;
l_{fij} : comprimento da trajetória da ferramenta f com início na posiçãoi e término na posução j.

Variáveis:

$s_{ff'j}$: $\begin{cases} 1 & \text{se } f' \text{ sucede imediatamente } f, f \neq f', \text{ em que } f' \text{ começa e } f\text{termina em } j; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

c_{fij}: $\begin{cases} 1 & \text{se a trajetória de } f \text{ inicia na posição } i \text{ e termina na posição } j; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

u_f : variáveis artificiais utilizadas para coibir subciclos e ordenar a sequência de ferramentas.

Modelo Matemático

$$min \sum_{f \in F} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} l_{fij} c_{fij} \tag{1}$$

s.a.

$$\sum_{f \in F} \sum_{j \in N} s_{ff'j} = 1 \qquad \forall f' \in F^+ \tag{2}$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{j \in N} s_{ff'j} = 1 \qquad \forall f \in F^+ \tag{3}$$

$$\sum_{f' \in F} s_{0f'0} = 1 \tag{4}$$

$$\sum_{f \in F} s_{f00} = 1 \tag{5}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{fij} \leq 1 \qquad \forall f \in F \tag{6}$$

$$s_{ff'j} \leq \sum_{i \in N} c_{fij} \qquad \forall (f, f') \in F \times F : f \neq f' \qquad \forall j \in N \tag{7}$$

$$s_{ff'j} \leq \sum_{i \in N} c_{f'ij} \qquad \forall (f, f') \in F \times F : f \neq f' \qquad \forall j \in N \tag{8}$$

$$u_0 = 0 \tag{9}$$

$$u'_f \geq u_f + 1 - M \left(1 - \sum_{j \in N} s_{ff'j} \right) \qquad \forall (f, f') \in F^+ \times F : f \neq f' \tag{10}$$

$$u'_f \geq u_f \qquad \forall f \in F \qquad \forall f' \in \mathcal{S}_f \tag{11}$$

$$0 \leq u_f \leq |F^+| \qquad \forall f \in F \tag{12}$$

$$c_{fij} \in \{0, 1\} \qquad \forall f \in F^+ \qquad \forall i \in N \qquad \forall j \in N \tag{13}$$

$$s_{ff'j} \in \{0, 1\} \qquad \forall (f, f') \in F^+ \times F^+ : f \neq f' \qquad \forall j \in N \tag{14}$$

A equação (1) corresponde à função objetivo, que visa minimizar o tempo total de deslocamento da estrutura movente. As restrições (2) e (3) asseguram que na sequência de ferramentas,

uma ferramenta f' (sucessora) inicia o circuito na posição de troca j na qual a ferramenta f (predecessora) termina suas operações. As restrições (4) e (5) asseguram o início e fim do sequenciamento com a ferramenta artificial 0 na posição de troca 0. A restrição (6) determina que apenas uma solução pode ser escolhida para cada ferramenta. As restrições (7) e (8) garantem que a trajetória das soluções escolhidas para duas ferramentas em sequência, f e f', terminem e comecem na posição j, respectivamente. As restrições (9) e (10) estabelecem que o início e o fim da sequência de operações das ferramentas devem ocorrer em uma posição de troca, passar por todos os pontos que utilizam a ferramenta, e terminar em uma posição de troca. Como consequência da restrição (10), as variáveis u_f denotam a posição de cada ferramenta na sequência. A restrição (11) submete o sequenciamento das ferramentas às suas restrições de precedência. As restrições (12 – 14) delimitam o domínio das variáveis.

5. Testes Computacionais

Os experimentos foram realizados em um computador com Intel® Xeon® CPU E5-2697 v2 @2.70 GHz e 64 GB de memória RAM. Os modelos foram resolvidos utilizando o IBM ILOG CPLEX® v. 12.8.0.0 com configuração padrão e no máximo 2 *threads*. O parâmetro *TLimite*, que determina o tempo de resolução dos subproblemas na fase de pré-processamento, foi fixado em $5\ s$.

5.1. Descrição da instância de teste

A instância utilizada para os testes computacionais foi proposta por Liu et al. [2013], e corresponde a uma peça de metal retangular filetada, de dimensões $800\ mm$ x $580\ mm$ x $60\ mm$, na qual deve-se perfurar 42 pontos (Figuras 2 e 3). Dentre os furos, 10 são do tipo Th, 18 do tipo Bh e 14 do tipo Sh.

Os furos Bh necessitam de operações realizadas em sequência com as ferramentas 2 e 6; os furos Th com as ferramentas 2, 3, 4 e 5; e os furos Sh com as ferramentas 1 e 8. A ferramenta 7 não é utilizada para esta instância. Os parâmetros da instância são: tempo de troca constante entre as ferramentas e igual a $5\ s$, velocidade de deslocamento da estrutura movente constante e igual a $20\ cm/s$.

5.2. Discussão dos resultados

As ferramentas que podem iniciar o processo de usinagem não podem terminar suas trajetórias no ponto de origem; da mesma forma, as que podem finalizar o processo não podem iniciar suas trajetórias neste ponto. No total foram resolvidos 246 subproblemas no pré-processamento, dos quais 243 foram resolvidos na otimalidade e 3 foram abortados com solução primal devido ao critério de parada definido com o parâmetro $Tlimite$.

A Tabela 1 compara o resultado do método proposto com o resultado reportado no artigo de Tamjidy et al. [2014]. Devido à ausência de informações sobre o cálculo das distâncias e métodos de arredondamento/truncagem, os tempos auxiliares apresentados para o algoritmo BBO foram obtidos através dos gráficos apresentados no artigo supracitado, que representam a melhore solução

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

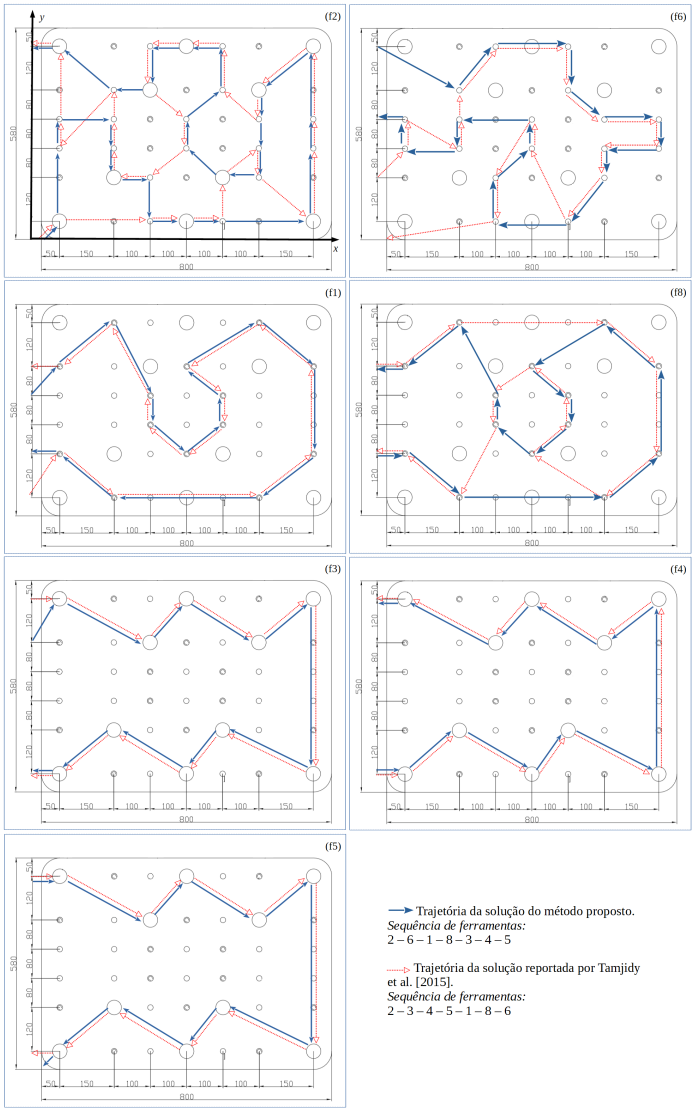


Figura 2: Instância de teste com a trajetória das ferramentas para distância Euclidiana.

entre 10 tentativas para cada métrica de distância utilizada. Cada tentativa utilizou como critério de parada o tempo de $1000s$. O tempo auxiliar total calculado pelo método proposto apresentou uma redução de $0,8$ % para distância Euclidiana e de $4,3$ % para distância de Manhattan. As melhores soluções para as trajetórias de cada ferramenta e a sequência da concatenação destas trajetórias são mostradas nas Figuras 2 e 3, que ilustram o sequenciamento de operações com métrica de distância Euclidiana e de Manhattan, respectivamente.

As duas soluções comparadas realizaram o número mínimo possível de trocas de ferramentas e consequentemente apresentam o mesmo valor para esta fração do tempo auxiliar total.

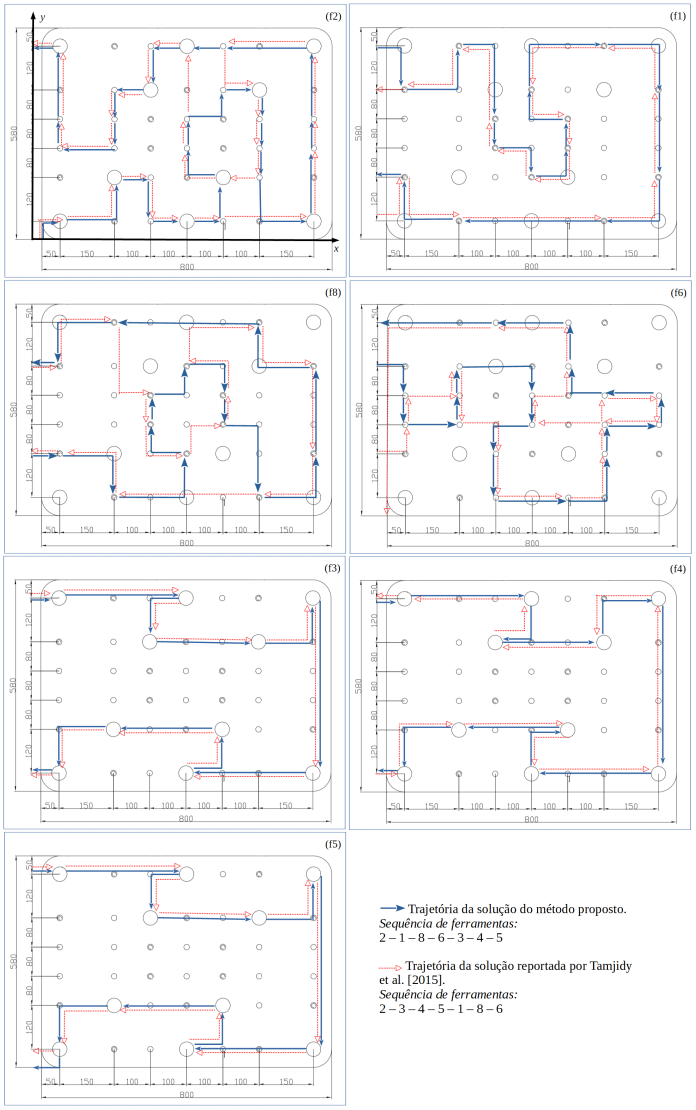


Figura 3: Trajetória das ferramentas para a distância de Manhattan.

Em relação à distância Euclidiana, é possível observar que a trajetória da ferramenta 8 foi equivalente em ambas soluções, mas com sentido oposto entre elas; as trajetórias das ferramentas $1, 3$ e 5 poussuem diferenças apenas nos arcos que representam o deslocamento da ferramentas até suas operações de início e das operações de término até o ponto de troca; e a ferramenta 4 possui trajetória idêntica nas duas soluções comparadas. Assim, as trajetórias das ferramentas 2 e 6 foram cruciais para a redução obtida para o tempo auxiliar total. No caso da distância de Manhattan, as ferramentas 1, 3, 4 e 5 possuem trajetórias praticamente iguais, com diferenças apenas no arco de saída da ferramenta 5 e no sentido da trajetória em 1 e 4. Logo, a maior parte da redução no tempo

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

Variáveis	Distância Euclidiana		Distância de Manhattan	
	Método Proposto	**Algoritmo BBO***	**Método Proposto**	**Algoritmo BBO***
Tempo auxiliar total (s):	$90,13$	$90,89$	$107,20$	$112,00$
Tempo de troca (s):	30	30	30	30
Tempo de resolução (s):	$39,50$	1000	$45,10$	1000
Sequência de ferramentas:	2-6-1-8-3-4-5	2-3-4-5-1-8-6	2-1-8-6-3-4-5	2-3-4-5-1-8-6

*Algoritmo implementaodo em Matlab e testes executados em um processador Intel® core™ 2 Duo CPU T8100 2.1 GHZ e 3 GB de RAM.

Tabela 1: Comparação entre a solução do método proposto e a melhor solução do algoritmo de Tamjidy et al. [2015].

auxiliar total foi obtida pela diferença das trajetórias das ferramentas 2, 6 e 8. Em ambos os casos, as diferenças nas trajetórias das ferramentas contribuíram de maneira mais significativa para redução do tempo auxiliar total do que a concatenação, tal que se as duas soluções sequenciassem as ferramentas de maneira idêntica, os ganhos do método proposto seriam moderadamente comprometidos.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi proposta uma heurística PLIM para a resolução do problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC. Considerando a instância testada, o método proposto mostrou-se eficiente para o problema de sequenciamento descrito, dado que o tempo auxiliar total do processo foi reduzido em $0,8$ % para a distância Euclidiana e $4,3$ % para a distância de Manhattan em compração ao melhor resultado reportado na literatura. Embora existam diferenças nas plataformas de software e hardware, é possível inferir que o método proposto é mais eficiente que o algoritmo aplicado por Tamjidy et al. [2015], uma vez que o último é estocástico e necessitou um tempo de resolução consideravelmente maior devido aos critérios de parada utilizados.

Como trabalhos futuros pretende-se propor um conjunto de instâncias teste com uma maior diversidade de número de furos e ferramentas, bem como utilizar o resolvedor Concorde TSP Solver© na fase de pré-processamento do método proposto. Dado que a matriz de tempo de deslocamento é levemente assimétrica, para utilizar adequadamente o resolvedor Concorde, é necessário aplicar a identidade proposta por [Jonker e Volgenant, 1983] de modo a converter uma matriz assimétrica em simétrica.

Referências

Abbas, A. T., Ali, M. F., e Hamza, K. (2011). Optimum drilling path planning for a rectangular matrix of holes using ant colony optimization. *International Journal of Production Research*, 49: 5877–5891.

Abdin, Z. W. N., Rashid, M. F. F. A., e Mohamed, N. M. Z. (2017). A review of multi-holes drilling path optimization using soft computing approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering Operacional*, p. 1–12.

Chen, J. M. e Guo, W. G. (2012). Path optimization of the drilling hole based on genetic algorithm. *Advanced Materials Research*, 497:382–386.

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br

Dewil, R., Kuçokoglu, I., Luteyn, C., e Cattrysse, D. (2017). A critical review of multi-hole drilling path optimization. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26:449–459.

Ghaiebi, H. e Solimanpur, M. (2007). An ant algorithm for optimization of hole-making operations. *Computers and Industrial Engineering*, 52:308–319.

Hooker, J. (2015). Toward unification of exact and heuristic optimization methods. *International Transactions in Operational Research*, 22:19–48.

Hsieh, Y. C., Lee, Y. C., You, P. S., e Chen, T. C. (2011). Optimal operation sequence of hole-making with multiple tools in manufacturing: a pso evolutionary based approach. *Key Engineering Materials*, 460-461:398–403.

Jonker, R. e Volgenant, T. (1983). Transformin asymmetric into symmetric traveling salesman problems. *Operations Research Letters*, 2:161–163.

Jourdan, L., Basseur, M., e Talbi, E. G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199:620–629.

Kolahan, F. e Liang, M. (2000). Optimization of hole-making operations: a tabu-search approach. *nternational Journal of Machine Tools and Manufacture*, 27:417–429.

Lim, W. C. E., Kanagaraj, G., e Ponnambalam, S. G. (2016). A hybrid cuckoo search-genetic algorithm for hole-making sequence optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27: 417–429.

Liu, X., Zhonghua, Y. H. N., Jianchang, Q., e Xiaoli, Q. (2013). Process planning optimization of hole-making operations using ant colony algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69:753–769.

Oncan, T., Altinel, I. K., e Laporte, G. (2009). A comparative analysis of several asymetric traveling salesman problem formulations. *Computers and Operation Research*, 36:637–645.

Onwubolu, G. C. e Clerc, M. (2004). Optimal path for automated drilling operations by a new heuristic approach using particle swarm optimization. *International Journal of Production Research*, 42:473–491.

Tamjidy, M., Paslar, S., Baharudin, H. T., Hong, T. S., e Ariffin, M. K. A. (2015). Biogeography based optimization (bbo) algorithm to minimise non-productive time during hole-making operations. *International Journal of Production Research*, 53:1880–1894.

Zhu, G. Y. e Chen, L. F. (2011). Holes machining process optimization with genetic algorithm. *Key Engineering Materials*, 460-461:117–122.

https://proceedings.science/p/106880?lang=pt-br