

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PARA O
SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE
USINAGEM EM MÁQUINAS CNC TIPO
PÓRTICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Tobias Antonio Webber Antunes

Santa Maria, RS, Brasil

2020

**HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PARA O
SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE USINAGEM EM
MÁQUINAS CNC TIPO PÓRTICO**

Tobias Antonio Webber Antunes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), Área de Concentração
Métodos Quantitativos para a Tomada de Decisão, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Olinto César Bassi de Araújo

Santa Maria, RS, Brasil

2020

Antunes, Tobias Antonio Webber

Heurística baseada em PLIM para o sequenciamento de operações de usinagem em máquinas CNC tipo pórtico / por Tobias Antonio Webber Antunes. – 2020.

85 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Olinto César Bassi de Araújo

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2020.

1. Sequenciamento. 2. Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência. 3. Heurística. I. Araújo, Olinto César Bassi de. II. Título.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Tobias Antonio Webber Antunes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: tatobiasantunes5@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PARA O SEQUENCIAMENTO DE
OPERAÇÕES DE USINAGEM EM MÁQUINAS CNC TIPO PÓRTICO**

elaborada por
Tobias Antonio Webber Antunes

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

COMISSÃO EXAMINADORA:

Olinto César Bassi de Araújo, Dr.
(Presidente/Orientador)

Guilherme Dhein , Dr. (UFSM - videoconferência)

Árton Pereira Dorneles , Dr. (IFFar - videoconferência)

Santa Maria, 20 de Julho de 2020.

Para meu pai, Darci Teixeira Antunes

AGRADECIMENTOS

Meu muitíssimo obrigado vai para:

Professor Olinto, por idealizar esta pesquisa e me orientar no seu desenvolvimento. Conversar contigo é tipo abrir um livro: por mais rápida que seja a leitura ou mais superficial que seja o tema, ao final, você sempre sai com algum aprendizado na bagagem - seja que um quadrado branco significa "como queríamos demonstrar" ou seja uma lição foda pra vida, que transcende em muito um trabalho de otimização. Foi um prazer imenso trabalhar contigo. Espero poder dar continuidade, mais dia ou menos dia.

Minha família, 'família': mamãe Maria Teresa Webber e mana Larissa Antunes, um beijo no coração de vocês. Agradeço demais o suporte de uma vida toda. É tanta coisa que nunca serei suficientemente grato, na verdade. Amo vocês, mulheres lindas.

Meus amigos 'originalmente', '33' e outros, que são a família que escolhi. Sem ordem de importância: Alice, Felipe, Josiel, Eduardo, Filipe, Bruno, Guilherme, Solano, Pablo, Nathan, Olmiro, Odirlei, Gelton, John, Alberto, Rafael, Benhur, Bryan, José, Ricardo, Charles, Elisabeth, Greice, Rosaura, Tiago, Alaércio, Willian (x2), Beatriz, Luciana, Samuel, Lucas, Alencar e Walter. Sei que a maioria de vocês nunca vai ler isso aqui, mas se tive saúde mental nesses anos todos, em parte devo à vocês. Valeuzão!

Luciana Nunes de Oliveira. Aquela que me levantou, espanou prosaicamente a poeira que fica na roupa dos que caíram, me pegou pelo braço (gentilmente) e me mostrou um mundo cheio de cores, possibilidades, sorrisos... Aconteça o que acontecer, você já tem uma importância **gigantesca** na minha vida. Agradeço demais seu carinho, babyta. Seguiremos!

À CAPES, pelo aporte técnico e financeiro para a pesquisa.

“Se você recuasse para o limite do universo, será que encontraria uma cerca de madeira e tabuletas dizendo SEM SAÍDA? Não. Talvez você encontrasse algo duro e arredondado, como o pintinho deve ver o ovo do seu interior, E se você atravessasse a casca beliscando (ou encontrasse uma porta), não poderia jorrar, nesses confins do espaço, uma incrível luz torrencial através da abertura? Você não poderia olhar por ali e descobrir que todo o nosso universo é apenas parte de um átomo numa camada de relva? Não poderia ser levado a pensar que, ao queimar um graveto, você está incinerando uma eternidade de eternidades? Que a existência não avança para um infinito mas para uma infinidade deles?”

— STEPHEN KING

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PARA O SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE USINAGEM EM MÁQUINAS CNC TIPO PÓRTICO

AUTOR: TOBIAS ANTONIO WEBBER ANTUNES

ORIENTADOR: OLINTO CÉSAR BASSI DE ARAÚJO

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 20 de Julho de 2020.

Este trabalho apresenta uma heurística baseada em Programação Linear Inteira Mista, cujo objetivo é resolver um problema de sequenciamento de operações de usinagem realizado em máquinas de controle numérico computadorizado do tipo pórtico, de modo a minimizar o tempo não-productivo, chamado tempo auxiliar. A máquina representada no problema possui um magazine que contém múltiplas ferramentas, as quais realizam operações de furação e acabamento que obedecem restrições de precedência. O problema de sequenciamento de operações descrito possui estrutura similar ao Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência, uma vez que não é possível suprimir nenhuma operação de qualquer furo e tampouco executá-las desordenadamente. A escassez de estratégias de resolução que combinam métodos exatos e heurísticos - chamadas *matheuristics* - e a inviabilidade de resolução de modelos disponíveis na literatura especializada fundamentou a elaboração desta dissertação. O método desenvolvido utiliza dois resolvedores comerciais de programação matemática e possui duas fases distintas: na primeira fase é executado um procedimento de pré-processamento por meio da separação do problema, na qual são calculadas as trajetórias que cada ferramenta pode executar a fim de completar as operações a ela designadas, variando o local onde a trajetória inicia e finaliza. Na segunda fase, um modelo matemático seleciona uma trajetória para cada ferramenta e as concatena, respeitando as restrições de precedência derivadas das especificações dos furos, para fornecer uma solução completa para o sequenciamento de operações. Os resultados computacionais obtidos mostram que o método proposto é mais eficiente que o algoritmo da literatura utilizado para comparação, obtendo melhores resultados para a instância testada em tempo computacional consideravelmente menor. Ainda, considerando características específicas do problema estudado, foi possível provar a otimalidade da solução da instância utilizada para comparação.

Palavras-chave: Sequenciamento. Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência. Heurística.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduate Program in Production Engineering
Federal University of Santa Maria

MILP BASED HEURISTIC FOR THE MILLING OPERATIONS SEQUENCING PROBLEM IN CNC GANTRY MACHINES

AUTHOR: TOBIAS ANTONIO WEBBER ANTUNES

ADVISOR: OLINTO CÉSAR BASSI DE ARAÚJO

Defense Place and Date: Santa Maria, July 20th, 2020.

This work presents a heuristic procedure based on Mixed-Integer Linear Programming, whose objective is to solve a problem of sequencing milling operations performed on gantry computer numerical control machines, to minimize the non-productive time, called auxiliary time. The machine represented in the problem has a magazine that contains multiple tools, which do drilling and finishing operations that obey precedence constraints. The problem described is similar to Traveling Salesman Problem with Precedence Constraints, since it is not possible to suppress any operation neither execute them randomly. The lack of strategies that combine exact and heuristic - called matheuristics - methods and the impossibility of solving models available in the specialized literature justified this dissertation's elaboration. The developed method uses two commercial mathematical programming solvers and has two distinct phases: in the first phase, a pre-processing procedure is executed by separating the problem, in which each possible path for any tool is calculated to complete the set operations assigned to it. In the second phase, a mathematical model selects one path for each tool and concatenates them, respecting the precedence constraints related to holes specifications, to give a complete solution to the operations sequencing problem. The computational results obtained show that the proposed method is more efficient than the algorithm used for comparison, obtaining better results for the instance tested with considerably less computational effort. Also, it was possible to prove the solution optimality for the instance used in the comparison.

Keywords: Sequencing. Traveling Salesman Problem with Precedence Constraints. Heuristic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estratégias de resolução utilizadas para o TPOP nos artigos analisados entre 1998 e 2016.	20
Figura 3.1 – Exemplo de instância do problema (a) e solução factível (b).	34
Figura 4.1 – Exemplo da Proposição 1.	42
Figura 4.2 – Exemplo da etapa de pré-processamento.	44
Figura 5.1 – Método para determinar a posição do i -ésimo nó nas instâncias Conjunto Teste 2 (a) e posição dos nós na instância com $I = 10$ (b).	50
Figura 5.2 – Instância de 42 furos e 105 operações proposta por Liu et al. (2013).	51
Figura 5.3 – Instância de 44 furos e 168 operações proposta pelo autor.	52
Figura 5.4 – Instância de 60 furos e 180 operações proposta pelo autor.	52
Figura 5.5 – Solução da heurística proposta para a instância Liu-105 - distância Euclidiana.	63
Figura 5.6 – Solução da heurística proposta para a instância Liu-105 - distância de Manhattan.	64
Figura 5.7 – Solução do algoritmo BBO para a instância Liu-105 - distância Euclidiana. .	65
Figura 5.8 – Solução do algoritmo BBO para a instância Liu-105 - distância de Manhattan.	66
Figura A.1 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância Euclidiana - ferramentas 1, 4, 2, 5, 7 e 6.	76
Figura A.2 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância Euclidiana - ferramentas 3, 8, 10 e 9.	77
Figura A.3 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância de Manhattan - ferramentas 1, 2, 5, 4, 6 e 3.	78
Figura A.4 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância de Manhattan - ferramentas 8, 7, 9 e 10.	79
Figura A.5 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância Euclidiana - ferramentas 1, 2, 3, 7, 4 e 5.	80
Figura A.6 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância Euclidiana - ferramentas 8, 9 e 6.	81
Figura A.7 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância de Manhattan - ferramentas 1, 2, 3, 7, 4 e 5.	82
Figura A.8 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância de Manhattan - ferramentas 8, 9 e 6.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Especificações dos furos da instância Liu-105.	53
Tabela 5.2 – Especificações das ferramentas da instância TA-168.	53
Tabela 5.3 – Especificações das ferramentas da instância TA-180.	53
Tabela 5.4 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância Liu-105.	54
Tabela 5.5 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância TA-168.	54
Tabela 5.6 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância TA-180.	55
Tabela 5.7 – Resultados para o Conjunto Teste 1.	55
Tabela 5.8 – Resultados do pré-processamento da instância Liu-105.	57
Tabela 5.9 – Resultados do pré-processamento da instância TA-168.	57
Tabela 5.10 – Resultados do pré-processamento da instância TA-180.	57
Tabela 5.11 – Comparação entre a solução do método proposto e a melhor solução do algoritmo de Tamjidy et al. (2015).	58
Tabela 5.12 – Resultados da fase de concatenação da heurística proposta para as instâncias TA-168 e TA-180.	59
Tabela 5.13 – Diferença entre a solução da heurística baseada em PLIM e o menor valor possível para as ferramentas 2-8 na instância Liu-105.	62
Tabela B.1 – Coordenadas dos furos da instância TA-168.	84
Tabela B.2 – Coordenadas dos furos da instância TA-180.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DPOP	<i>Drilling Path Optimization Problem</i>
HMOP	<i>Hole Making Operations Problems</i>
MT _{seq}	<i>Multi-Tool Sequence Dependent</i>
PCV	Problema do Caixeiro-Viajante
PCVF	Problema do Caixeiro-Viajante de Famílias
PCVG	Problema do Caixeiro-Viajante Generalizado
PCVRP	Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência
PCTSP	<i>Precedence Constrained Traveling Salesman Problem</i>
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SBO	<i>Satin Bowerbird Optimizer</i>
SOP	<i>Sequential Ordering Problem</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
TPOP	<i>Tool Path Optimization Problem</i>
TSPPD	<i>Traveling Salesman Problem with Pick Up and Delivery</i>
TSP-PC	<i>Traveling Salesman Problem with Precedence Constraints</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Apresentação do Problema de Pesquisa	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 Justificativa e Importância	19
1.4 Estrutura da Dissertação	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 O Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência	22
2.1.1 Métodos de Resolução do PCVRP.....	23
2.1.2 Aplicações do PCVRP em sistemas de manufatura	24
2.2 Sequenciamento de Operações de Usinagem em Máquinas CNC	26
2.2.1 Abordagem MT_{seq}	26
2.2.2 Abordagem PCVRP	27
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO	31
3.1 Definição do Problema	31
3.2 Características do Problema em Relação à Máquina Representada	32
3.3 Modelos Matemáticos do PCVRP da Literatura	36
3.3.1 Modelo PCATSP _{xy}	37
3.3.2 Modelo PCTSP.....	38
3.3.3 Modelo de fluxo em rede para 2 commodities (2-CMM)	39
4 HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PROPOSTA PARA O SEQUENCIAMENTO EM MÁQUINAS CNC	41
4.1 Heurística baseada em PLIM para o TPOP	42
4.1.1 Fase de pré-processamento	43
4.1.2 Fase de concatenação das trajetórias parciais	46
5 TESTES COMPUTACIONAIS	49
5.1 Descrição das instâncias de testes	49
5.1.1 Instâncias do Conjunto Teste 1	49
5.1.2 Instâncias do Conjunto Teste 2	50
5.2 Resultados e Discussão	53
5.2.1 Resultados dos modelos da literatura	53
5.2.2 Resultados do Conjunto Teste 1	55
5.2.3 Resultados da heurística baseada em PLIM para as instâncias do Conjunto Teste 2 ..	56
5.2.3.1 Resultados da fase de pré-processamento	56
5.2.3.2 Resultados da fase de concatenação	57
5.2.4 Prova da Otimalidade da Instância Liu-105	59
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	75

1 INTRODUÇÃO

O paradigma de mercado atual exige que grandes volumes de produção sejam entregues de maneira eficiente, o que praticamente obriga as empresas a adotarem processos automatizados ao longo do processo de agregação de valor aos produtos. Cada segmento da indústria de transformação aproveita de modo distinto a tecnologia disponível para automação, com enfoque tanto em processos de fabricação e montagem quanto no dinamismo no gerenciamento de informações.

Para o setor metalmeccânico, em particular, a automatização de processos de usinagem, conformação e montagem provida pela utilização de máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) aumenta significativamente o rendimento global do sistema produtivo, pois com frequência tais máquinas configuram gargalos no setor de fabricação. A automação de processos de usinagem executados por máquinas CNC reduz o número de peças fora dos limites de tolerância - não mais dependentes apenas da perícia do operador - e otimiza o consumo energético dos dispositivos usados na fabricação, bem como possibilita maior controle na taxa de utilização de insertos e outros materiais consumíveis. Desta forma, os ganhos de produção relacionados a automação de processos via CNC estão majoritariamente concentrados na eliminação de retrabalho e padronização das operações.

Dispor de tecnologia de tal porte incorre em alto investimento (MAMILLA; SRINIVASULU; M., 2016), mas não necessariamente restringe sua implementação a ambientes de produção nos quais os custos fixos elevados podem ser diluídos em grandes volumes de produção. Em indústrias de menor porte, ações complementares de melhoria podem aumentar a eficiência da utilização das máquinas CNC, de modo a viabilizar a aquisição e manutenção destes recursos de produção. Dentre as várias possibilidades, podemos citar o aumento da eficiência global do processo mediante adequada gestão da manutenção (NALLUSAMY, 2017), ajuste de parâmetros como velocidade de corte e diâmetro da ferramenta (GRAMA et al., 2017) e ainda otimizar a sequência de operações do processo, usualmente definida e transcrita para linguagem G pela própria interface CAD/CAM (*computer-aided-design* e *computer-aided-manufacturing*, respectivamente).

Os processos de usinagem incluem operações que agregam valor a um corpo por meio de remoção parcial do material que o compõe, tais como fresagem, furação, abertura de rasgos para acoplamento de chavetas e procedimentos de tornearia em geral. Dentre os diferentes

processos de usinagem, um dos mais difundidos no meio industrial consiste em fazer furos em componentes ou produtos finais. Tal processo pode ser observado, por exemplo, na fabricação de dispositivos eletrônicos, peças metálicas e uma infinidade de produtos de diferentes materiais e propósitos.

Tratando especificamente de processos de usinagem realizados em máquinas CNC, o planejamento ótimo da sequência de operações executadas pela máquina é um problema rotineiro nas indústrias do segmento. Para fins de comparação, Abbas et al. (2011) estimam que o tempo não-produtivo deste tipo de processo, ou seja, o tempo em que a máquina está em funcionamento mas não de fato realizando operações de usinagem, representa entre 40 e 90% do tempo total do processo. Esta forma de análise de eficiência permite uma visão mais realista da utilização do equipamento, ao contrário de levantamentos simplistas baseados no tempo de operação do dispositivo em relação ao total de horas disponíveis (ALTAFINI et al., 2009).

Habitualmente os estudos de otimização desta classe de processos concentram-se em minimizar o tempo unitário de fabricação, o consumo de energia do processo ou ainda o deslocamento dos eixos da máquina, o que possibilita que alguns modelos de otimização de operações de usinagem se adequem para outros processos industriais, tais como injeção de plásticos, corte com plasma e estampagem (GHAIEBI; SOLIMANPUR, 2007). Na literatura especializada, a classe de problemas de otimização relacionada à melhoria do deslocamento entre operações de usinagem ou sequenciamento destas é conhecida como *Tool Path Optimization Problems* (TPOP), nomenclatura utilizada nesta dissertação, *Drilling Path Optimization Problems* (DPOP) ou ainda *Hole Making Operation Problems* (HMOP) (ABDIN; RASHID; MOHAMMED, 2017).

De acordo com as características dos equipamentos ou processos que representam, as diferentes abordagens do TPOP podem ser enquadradas em três categorias distintas: problemas análogos ao Problema do Caixeiro-Viajante tradicional (PCV) e com Restrições de Precedência (PCVRP) e os problemas *Multi-Tool Sequence* (MT_{seq}) (DEWIL et al., 2019).

A maioria absoluta das publicações sobre o TPOP discutem o problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC considerando situações para as quais apenas uma ferramenta é necessária, ou ainda casos nos quais múltiplas ferramentas não possuem relações de precedência entre si e nem podem ser usadas simultaneamente. Esta abordagem, análoga ao PCV, baseia o trabalho de, por exemplo, Onwubolu e Clerc (2004), Gupta et al. (2011) e Lim et al. (2014).

Em situações nas quais múltiplas operações são necessárias em uma mesma região da peça, por exemplo, furos que demandam alargamento ou acabamento, a abordagem que melhor representa o processo de usinagem é o PCVRP, uma vez que existe um requisito de precedência entre certas operações. Esta estrutura está presente, por exemplo, nos trabalhos de Ghaiebi e Solimanpur (2007), Kuçucoglu et al. (2019), no modelo não-linear da montadora de chips CNC com magazine em forma de carrossel de Alkaya e Duman (2013) e nos trabalhos com CNC tipo *gantry* (pórtico) de Liu et al. (2013) e Tamjidy et al. (2015).

Os modelos referidos na literatura especializada como *Multi-Tool Sequence* (MT_{seq}), consideram a hipótese de quebra de restrições de precedência entre ferramentas mediante uma penalização, implicando em um *tradeoff* entre violar a sequência recomendada de ferramentas e diminuir o tempo global do processo (DEWIL et al., 2019). Como exemplos de formulações MT_{seq} , destacamos o modelo de sequenciamento proposto por Kolahan e Liang (2000) para representar processos de furação usando máquinas CNC, e os trabalhos publicados por Dalavi e colaboradores, nos quais são empregadas técnicas de resolução baseadas em *Particle Swarm Optimization* (PSO, em inglês) (DALAVI; PAWAR; SINGH, 2015), *Shuffled Leap Frog* (DALAVI; PAWAR; SINGH, 2016a) ou versões modificadas de ambas metaheurísticas citadas (DALAVI; PAWAR; SINGH, 2016b).

Conforme revisão crítica feita por Dewil et al. (2019), a maior parte das publicações sobre o tema em questão não abrange uma característica muito presente neste tipo de processo: a necessidade de realizar furos com diferentes diâmetros, profundidades e acabamentos; em outras palavras, elas não modelam os processos de forma a representar máquinas com múltiplas ferramentas e que, portanto, necessitam de uma estratégia para definir como será realizada a troca de ferramentas. De maneira geral, os problemas da literatura especializada que incluem trocas de ferramentas têm enfoque na configuração do magazine, caso este suporte um número menor de ferramentas do que o requerido em determinado processo (CHAVES; SENNE; YANASSE, 2012) ou, de maneira similar, na configuração do alimentador de componentes (*feeder*) para montagem de circuitos (ALKAYA; DUMAN, 2013).

Ainda que a abordagem PCV seja conveniente para modelar a produção de alguns produtos (por exemplo, placas de circuito impresso, nas quais geralmente os furos são pequenos e possuem o mesmo diâmetro), os trabalhos pouco ou nada contribuem para o estado da arte do problema, uma vez que heurísticas poderosas estão disponíveis para o PCV, possibilitando a obtenção de soluções ótimas ou próximas do valor ótimo para instâncias com milhares de nós.

Considerando que no meio industrial as peças normalmente possuem menos de 400 furos, o PCV pode ser considerado, da perspectiva da fabricação mecânica, um problema resolvido.

Além disso, as publicações sobre o tema costumam testar seus métodos de resolução em conjuntos limitados de instâncias, quando não em instâncias pequenas se comparadas com instâncias de *benchmark* disponíveis ou produtos de fato existentes (DEWIL et al., 2019).

Este trabalho propõe uma heurística baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver de maneira exata o TPOP mediante uma abordagem PCVRP, de modo a obter soluções exatas para instâncias com dimensões suficientemente grandes para representar a maioria dos problemas de usinagem reais. Desse modo, o estudo está delimitado a casos nos quais os furos requerem duas ou mais ferramentas em ordem estabelecida e inviolável. Tais formulações, não redutíveis ao PCV simétrico, incluem critérios para composição da sequência de operações.

Para testar o método de resolução desenvolvido e as instâncias propostas, foram selecionados da literatura especializada três modelos matemáticos para o Problema do Caixeiro-Viajante com restrições de precedência, e utilizados os mesmos Conjuntos Teste sugeridos nos artigos de Ghaiebi e Solimanpur (2007), Liu et al. (2013) e Tamjidy et al. (2015); No Conjunto Teste 1, foram resolvidas instâncias de 5 até 1000 nós, as quais representam peças que necessitam uma só ferramenta. Já para o Conjunto Teste 2, foram utilizadas três instâncias de múltiplas ferramentas, sendo uma presente na literatura especializada, proposta por Liu et al. (2013), e outras duas criadas para este trabalho.

Os resultados computacionais mostraram que a resolução dos modelos da literatura com *softwares* de programação matemática só é capaz de gerar soluções ótimas para instâncias da ordem de 100 nós por consumindo grande tempo de processamento e necessitando de computadores com grande poder de processamento. O método utilizado na heurística proposta se mostrou mais robusto na resolução das instâncias do Conjunto Teste 1 e que houve redução no valor da função objetivo e no tempo tempo computacional em relação à melhor solução para a instância da literatura resolvida no Conjunto Teste 2, reportada por Tamjidy et al. (2015) - ainda que consideradas diferenças de *hardware* e implementação.

1.1 Apresentação do Problema de Pesquisa

A exemplo da maioria dos problemas de otimização de trajetórias, o problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC é \mathcal{NP} -difícil, uma vez que pode ser reduzido ao PCVRP, que por sua vez, é uma generalização do PCV. Portanto, não são conhecidos algorit-

mos que possam garantir soluções ótimas em um tempo que não cresça exponencialmente com o tamanho da instância (referido como tempo exponencial). Em virtude disso, os métodos de resolução aproximados que empregam heurísticas e metaheurísticas são amplamente utilizados para resolver modelos de otimização com instâncias grandes. Embora sem garantia de otimalidade, tais métodos proporcionam um melhor equilíbrio entre qualidade da solução e esforço computacional.

Desta forma, sabendo da complexidade inerente ao problema em questão, o presente trabalho questiona a viabilidade do uso de estratégias que combinem procedimentos heurísticos com a formulação de modelos matemáticos em conjunto com a utilização de resolvedores de programação matemática para resolver instâncias de problemas de otimização que sequenciam operações de usinagem, considerando máquinas com múltiplas ferramentas, em tempo computacional suficientemente baixo para se adequar ao grande volume de decisões de nível tático e operacional observado nos ambientes industriais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma heurística baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolução de um problema de sequenciamento de operações de usinagem em máquinas CNC de três eixos do tipo pórtico, com magazine de ferramentas localizado na coluna lateral da máquina.

1.2.2 Objetivos específicos

- Propor instâncias para o problema de sequenciamento de operações em questão e verificar o desempenho do método desenvolvido neste trabalho em sua resolução;
- Testar a otimalidade da solução da instância Liu105, cuja melhor solução reportada na literatura foi obtida por Tamjidy et al. (2015);
- Verificar a performance do método proposto por meio da comparação dos resultados obtidos para instâncias do problema em relação aos resultados obtidos por modelos selecionados da literatura;
- Testar a utilização do resolvedor comercial Concorde TSP Solver® na primeira etapa do

método proposto.

1.3 Justificativa e Importância

A eficiência de máquinas CNC depende da utilização racional dos recursos de produção disponíveis. Esforços na otimização de processos compreendem ações para melhoria no design de máquinas e ferramentas, na configuração de parâmetros do processo, ou ainda aprimoramento na programação que estabelece a rotina de trabalho da máquina (DEWIL et al., 2019). O presente trabalho tem enfoque na otimização do sequenciamento das operações.

É comum existir interface entre máquinas CNC e *softwares* CAD (*computer aided design*) nos ambientes de produção. As funções principais dos *softwares* CAD são projetar e modelar peças e suas especificações e realizar simulações de fenômenos físicos aos quais o material está sujeito; programar o sequenciamento é uma tarefa auxiliar para a qual projetistas dedicam pouca atenção.

Na maior parte dos casos as operações contidas nos processos abordados nessa classe de problemas (usinagem, injeção de plásticos e cortes com plasma) são ordenadas por intermédio desta interface entre CAD e CNC em sequências como zigzagues ou outros circuitos padronizados.

O volume expressivo de publicações acerca de problemas de otimização de rotas de ferramentas tem apresentado pouca contribuição para a compreensão do comportamento dos problemas e dos métodos de solução. De acordo com a revisão crítica de Dewil e colaboradores (2019), dos 53 artigos de maior relevância que foram publicados entre 1998 e 2016, 42 (79%) descreveram a otimização da sequência de operações com abordagens clássicas PCV que não promoveram praticamente nenhum avanço do estado-da-arte do problema. Dentre os 42 artigos PCV, 38 deles consideraram processos de usinagem com uma única ferramenta. Entre os demais artigos analisados, apenas 7 (13%) utilizaram a abordagem do PCVRP e 4 (8%) utilizaram as abordagens mais complexas MT_{seq} , citadas anteriormente.

Outra motivação para o desenvolvimento desta dissertação é o uso predominante de métodos de resolução aproximados em detrimento a métodos que propõe algoritmos exatos de resolução, assim como a resolução de modelos matemáticos com resolvedores comerciais, tal como mostra a Figura 1.1. A maioria dos autores utilizou estratégias de resolução estruturadas em metaheurísticas bastante difundidas, sendo que entre os trabalhos analisados, quase metade utilizou a otimização por colônia de formigas (ACO, acrônimo para *ant colony optimization*,

Figura 1.1 – Estratégias de resolução utilizadas para o TPOP nos artigos analisados entre 1998 e 2016.



Fonte: Dewil et al. (2019) - adaptado.

em inglês) ou algoritmo genético; aproximadamente 20% das publicações descrevem metaheurísticas ‘novas’, que embora se autoproclamem metáforas inspiradas em fenômenos naturais, em muitos casos não passam de um nome diferente para uma metaheurística já conhecida ou um método híbrido (HOOKER, 2015), e 5% trabalham com heurísticas básicas de manufatura assistida por computador (CAM, em inglês).

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada conforme a sequência a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: A introdução apresenta os conceitos básicos sobre o assunto abordado na dissertação, bem como a caracterização do problema de pesquisa, os objetivos e a importância da realização deste estudo.

Capítulo 2 – Rerefencial Teórico: Neste capítulo são apresentados conceitos importantes para a compreensão do trabalho, o estado da arte da pesquisa sobre a otimização de operações em máquinas CNC, em abordagens de uma ou mais ferramentas.

Capítulo 3 – Descrição do Problema: Este Capítulo apresenta o problema de pesquisa

para o qual a estratégia de otimização foi desenvolvida, descrevendo a máquina que inspirou o modelo matemático, e também modelos do PCVRP extraídos da literatura.

Capítulo 4 – Heurística baseada em PLIM proposta para o sequenciamento em máquinas CNC: Este capítulo detalha a estratégia de resolução desenvolvida nesta dissertação para atacar o problema descrito no Capítulo anterior.

Capítulo 5 – Testes Computacionais: Este capítulo fornece os detalhes sobre os experimentos computacionais realizados e descreve as instâncias resolvidas nos dois Problemas Teste propostos por Tamjidy et al. (2015), além de apresentar e discutir os resultados encontrados na pesquisa desenvolvida nesta dissertação, reforçando as contribuições geradas e a validade e aplicabilidade do método em ambientes reais de produção.

Capítulo 6 – Conclusão e Trabalhos Futuros: O último capítulo apresenta as considerações finais sobre as contribuições geradas pela pesquisa desenvolvida nesta dissertação, bem como propõe direcionamentos para a continuidade de desenvolvimento de trabalhos sobre estratégias de otimização de processos que empregam máquinas CNC.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta conceitos fundamentais para a compreensão do assunto abordado nesta dissertação. Inicialmente é introduzido o Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência e apresentados alguns estudos de caso na indústria. Posteriormente é analisado o estado da arte dos problemas de otimização relacionados ao TPOP que modelam situações nas quais a máquina CNC possui magazine de ferramentas e, portanto, inclui na otimização da sequência de operações uma estratégia de troca de ferramentas.

2.1 O Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência

O Problema do Caixeiro-Viajante (PCV) é um problema de otimização amplamente trabalhado. De forma sucinta, o objetivo do problema é encontrar a menor trajetória possível a ser percorrida em um determinado conjunto de locais, tal que todos devem ser visitados exatamente uma vez e a trajetória resultante forme um único circuito fechado - chamado circuito Hamiltoniano - que inicia e termina no mesmo ponto. Matematicamente o PCV é similar a um problema de designação acrescido de um conjunto de restrições para eliminar subciclos.

Tradicionalmente o PCV é descrito na forma de um grafo conexo $G = (V, A)$, sendo V o conjunto de nós ou vértices e A o conjunto de arcos ou arestas que conectam os nós ou vértices pertencentes a V . Todo elemento de A está associado a um elemento c_{ij} de uma matriz de pesos C , que pode ser simétrica ou assimétrica e empregar diferentes métricas de distância (Euclidiana, Manhattan ou Chebyshev, por exemplo). Problemas cuja matriz de pesos é simétrica ou que possuem conjuntos adicionais de restrições são considerados casos particulares do PCV (LAPORTE, 1992).

A partir da forma tradicional do PCV foram propostas generalizações do problema, para as quais foram incorporados conjuntos diferentes de restrições para modelar situações particulares. Como exemplos, podemos citar o PCV com janelas de tempo (PCVJT) e o PCV com restrições de precedência (PCVRP). Exemplos sobre formas particulares do PCV e suas características podem ser consultados de forma mais detalhada, por exemplo, em Guttin e Punnen (2006) e Applegate et al. (2006). Para o trabalho desenvolvido nesta pesquisa, o PCVRP é de especial interesse.

O Problema do Caixeiro-Viajante com Restrições de Precedência (PCVRP) é uma va-

riante do PCV na qual cada nó n pertencente ao conjunto de nós V tem associado a si um subconjunto de nós Pn (vazio para nós sem restrição de precedência), cujos elementos devem necessariamente compor a rota antes de n . Estas restrições representam eventos ou conjuntos de eventos que devem ocorrer antes de outros, tal como um táxi apanhar um passageiro antes de deixá-lo em seu destino (RAZALI, 2015).

Neste trabalho empregaremos a notação PCVRP, tradução do termo original *Precedence Constrained Traveling Salesman Problem* (PCTSP), presente, por exemplo, nos trabalhos de Kubo e Kasugai (1991), Sherali e Driscoll (2002) e Gouveia et al. (2017). Existem abreviações equivalentes como SOP (*Sequential Ordering Problem*) (ESCUDERO, 1988), (GAMBARDELLA; DORIGO, 1997) e (SHOBAKI; JAMAL, 2015), TSP-PC (BIANCO et al., 1994), e TSPPD (*Traveling Salesman Problem with Pick Up and Delivery*), equivalente a um problema de roteamento com um veículo (DUMITRESCU et al., 2010).

2.1.1 Métodos de Resolução do PCVRP

Da mesma forma que o PCV, o PCVRP também é \mathcal{NP} -difícil (ROBERTI; TOTH, 2012) e, a exemplo do que ocorre com todos os problemas desta complexidade, métodos exatos esbarram no aumento exponencial de soluções factíveis que ocorre a medida que a dimensão do problema aumenta. Além disso, a densidade do grafo das restrições de precedência interfere na dificuldade de resolução; instâncias contendo grandes quantidades de restrições de precedência ou contendo muito poucas costumam ser mais fáceis de resolver em comparação com aquelas nas quais o grafo de restrições de precedência apresenta densidade média (PAPAPANAGIOTOU et al., 2015).

Entre os métodos determinísticos de solução, diversos algoritmos e estratégias foram propostos com a mescla de abordagens de *branch-and-cut*, métodos de decomposição e outras técnicas. Escudero et al. (1994) empregaram um método de relaxação lagrangeana para obtenção de limitantes inferiores, apertados posteriormente por desigualdades válidas, com o qual observaram que a estrutura do grafo de relações de precedência foi determinante para o êxito do método nas instâncias testadas. A redução do número de variáveis inteiras do problema guiou o método de solução apresentado em Lambert (2006), no qual o autor modificou um modelo de fluxo de dois *commodities*, substituindo os conjuntos de variáveis inteiras do modelo por variáveis binárias e o resolvendo iterativamente.

Mingozi et al. (1997) aplicaram estratégias de programação dinâmica para obter valo-

res ótimos em instâncias do PCVRP com até 25 nós. O algoritmo exato proposto por Shobaki e Jamal (2016) empregou uma abordagem *branch-and-bound* e obteve resultados expressivos, resolvendo na otimalidade instâncias com até 598 nós para as quais foi definido um tempo limite de 10ms vezes o número total de nós. O método apresentado por Hernadvolgyi (2003) utilizou a mesma abordagem para gerar limitantes com soluções para trajetórias parciais abstraídas do espaço de busca e aplicando procedimentos para atualizá-los.

Mesmo com o aprimoramento das formulações e melhores estratégias de resolução, métodos exatos para resolver o PCVRP continuam limitados a instâncias pequenas. Este fato culminou em uma tendência ao uso de métodos aproximados, notadamente heurísticas e metaheurísticas.

Moon et al. (2002) obtiveram valores próximos ao ótimo para instâncias de 40 nós e 56 restrições de precedência e boas soluções para problemas com até 100 nós e 141 restrições de precedência por meio de uma metaheurística com estrutura do algoritmo genético (GA, do original *Genetic Algorithm*). Esta estrutura também foi utilizada no trabalho de Yun e Moon (2009), com o qual os autores obtiveram soluções ótimas em instâncias de até 70 nós em tempo computacional pequeno. Rashid et al. (2018) desenvolveram um método de codificação para o algoritmo genético, com o qual obtiveram redução do número de gerações entre 55 e 87% quando comparado com o algoritmo proposto por Moon et al. (2002).

Razali (2015) também utilizou a estrutura do algoritmo genético para resolver instâncias do PCVRP, obtendo melhoria de até 22% no valor da função objetivo e 25% no tempo de convergência quando comparado a resultados conhecidos para instâncias grandes de 100 nós e 141 restrições de precedência. O método desenvolvido no trabalho de Skinderowicz (2017) empregou a abordagem *Simulated Annealing* (SA) para aprimorar a metaheurística de colônia de formigas (ACO), obtendo soluções de boa qualidade para instâncias disponíveis na TSPLIB (REINELT, 1991).

2.1.2 Aplicações do PCVRP em sistemas de manufatura

Originalmente apenas instâncias genéricas eram resolvidas com modelos do PCV, as quais em grande parte representavam operações logísticas. A aproximação da pesquisa do PCV com o meio industrial teve início com a resolução de instâncias representando problemas de sequenciamento de operações e outros procedimentos típicos de sistemas de manufatura (HOEFT; PALEKAR, 1997).

Nas últimas décadas os novos paradigmas de produção encorajaram autores a aplicar modelos lineares e não-lineares do PCV e PCVRP em instâncias que representam sistemas de manufatura e serviços mais sofisticados de maneira fidedigna, com enfoque em processos de fabricação de produtos eletrônicos e em operações de logística reversa. A característica de carga e entrega do PCVRP é de especial interesse (O'NEIL; HOFFMAN, 2018) e favorece o seu uso para representar inúmeros processos industriais ou de prestação de serviços para os quais a sequência de operações é importante, através de modelos matemáticos. Outra característica importante do PCV é discutida no trabalho de Guttin e Punnen (2006), no qual os autores destacam a versatilidade do uso de modelos matemáticos inspirados no PCV para representar sequenciamento de operações quando é possível somar custos associados a pares sucessivos de itens para expressar o custo total do sequenciamento.

Duman e Or (2004) formularam um modelo não-linear do PCVRP para reduzir o dano sofrido por componentes eletrônicos em função da ordem de acoplamento em placas de circuito impresso. Os autores reportaram redução significativa de componentes danificados para placas com grande quantidade de componentes, por exemplo, de 51 para 2 em placas de 185 componentes, 66 para 4 em placas com 262 componentes e 77 para 10 em placas com 280 componentes.

Sarin et al. (2006) desenvolveram um modelo linear para o PCVRP assimétrico no qual aplicaram um método de resolução em três etapas: relaxação lagrangeana, adição de desigualdades válidas e fixação de variáveis para resolução via *branch-and-bound*. O método proposto gerou redução dos custos de operações de desmontagem presentes nas cadeias de logística reversa, com o qual os autores reportaram resultados em média 2% distantes do valor ótimo para o conjunto de instâncias testado. Além disso, em 40% das instâncias utilizadas houve redução de 30% no tempo médio de resolução obtido com a utilização de resolvedores comerciais.

Um modelo com características do PCVRP e do PCV com janelas de tempo para gerenciar a demolição de uma usina nuclear desativada foi o tema da aplicação do artigo de Sesekin et al. (2010), com o objetivo de minimizar o tempo de exposição dos operadores a zonas de radiação mais intensa.

Alkaya e Duman (2013) otimizaram o processo de acoplamento de componentes eletrônicos em uma montadora de chips CNC por meio da integração entre um problema de sequenciamento, para o qual utilizaram um modelo de programação quadrática do PCVRP, e um problema de configuração para o alimentador de componentes da montadora. Os autores em-

pregraram métodos baseados em busca local e SA para resolução do modelo, obtendo redução média do tempo de montagem na ordem de 18% para circuitos contendo 100 componentes.

2.2 Sequenciamento de Operações de Usinagem em Máquinas CNC

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 Onwubolu e Clerc (2004), cuja resolução empregou um algoritmo estruturado em *Particle Swarm Optimization* (acrônimo PSO, em inglês), Gupta et al. (2011), que usaram uma hibridização do algoritmo genético para resolver um modelo de fresadora que realiza trabalhos de usinagem 2.5d. Já Lim et al. (2014) utilizaram a abordagem PCV para otimizar a sequência de operações de placas de circuito impresso por meio do algoritmo *Cuckoo Search*, obtendo soluções ótimas para exemplos de placas com até 50 furos. Sobre esta abordagem, é intuitivo o fato de que, ainda que as operações necessitem diferentes ferramentas, o problema se torna uma variante do PCV caso não exista hierarquia entre elas, como também pode ser observado no artigo de Dalavi et al. (2016b). Como anteriormente mencionado, em muitos casos as peças necessitam de operações realizadas por ferramentas diferentes; com isso, as abordagens mais fidedignas para o TPOP são as MT_{seq} e PVCRP.

2.2.1 Abordagem MT_{seq}

A abordagem MT_{seq} considera processos nos quais o custo de usinagem é dependente da sequência das ferramentas utilizadas nas operações. Diferentemente da PCVRP, as restrições de precedência não são invioláveis, embora cada instância sugira uma combinação de ferramentas desejada para cada operação. Desse modo, um furo que requer, por exemplo, três operações com ferramentas de diâmetro sucessivo, pode ser usinado com apenas as duas últimas ferramentas ou até mesmo apenas com a última, sob pena de reduzir a velocidade de corte.

Nesta linha, Kolahan e Liang (2000) desenvolveram um modelo matemático para o TPOP no qual os autores buscam minimizar o tempo total do processo, no qual estão incluídos o tempo auxiliar e o tempo efetivamente gasto nas operações de usinagem. Para a resolução do modelo os autores utilizaram uma abordagem estruturada em Busca Tabu. A qualidade da solução depende da sequência de ferramentas utilizadas e do próprio tempo de usinagem de

cada operação, que pode variar de acordo a ferramenta utilizada.

Conforme destacado na revisão crítica de Dewil et al. (2019), poucos autores deram continuidade a abordagem de Kolahan e Liang (2000). Entre os poucos trabalhos disponíveis na literatura, destacam-se o método baseado em PSO elaborado por Dalavi et al. (2015), que obteve redução no custo total do processo (em unidades financeiras genéricas) de 67,4 para 66,78 no primeiro caso testado e de 63,25 para 60,45 no segundo caso proposto por Kolahan e Liang (2000).

Dalavi et al. (2016a) apresentaram uma variante do algoritmo *Shuffled Leap Frog*. O algoritmo foi testado com a resolução de uma instância que descreve o processo de perfuração da placa ejetora de um molde de injeção de plásticos, no qual 7 ferramentas realizam 48 operações.

2.2.2 Abordagem PCVRP

Nesta abordagem, os problemas TPOP são modelados de forma análoga ao PCVRP, descrito anteriormente. De forma sucinta, as principais diferenças desta abordagem em relação à MT_{seq} são:

- A sequência de ferramentas recomendada para cada furo é inviolável: não é possível realizar operações com ferramentas diferentes e tampouco é permitido que operações intermediárias não sejam realizadas;
- O tempo de troca entre ferramentas pode ser constante ou variável: de acordo com o tipo de magazine, o tempo de troca pode variar entre cada par de ferramentas, tal qual na abordagem MT_{seq} , ou manter-se constante;
- Os parâmetros de operação da máquina são constantes: como consequência das limitações da combinação furo-ferramenta, as operações são realizadas em sua totalidade sem variação na velocidade de avanço, corte e movimentação do *spindle*. Assim, o custo total do processo considera apenas o tempo auxiliar, que é a soma do tempo de movimentação e da troca de ferramentas.

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 totaliza 36 operações executadas por 6 ferramentas com tempo de troca variável entre cada par. O tempo

auxiliar total para a instância testada foi de 470 s sendo que 274s foram utilizados para as trocas de ferramentas e 196s para posicionar a mesa de trabalho da máquina representada.

Hsieh et al. (2011) desenvolveram um algoritmo baseado em PSO, testado na instância de 12 furos e 36 operações citada anteriormente (GHAIEBI; SOLIMANPUR, 2007). Os autores reportaram um tempo auxiliar de 446 s, 6% menor que o obtido pelos pesquisadores que propuseram a instância.

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 com 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 6000mm, o valor obtido pelo método linha a linha foi de 3480mm e do GA de 3106mm.

Diferentemente da maioria das publicações sobre o TPOP, nas quais são representadas máquinas com magazine tipo *turret* (carrossel), Liu et al. (2013) formularam o problema considerando máquinas de três eixos do tipo *gantry* (pórtico). Os autores propuseram um modelo matemático linear, para o qual uma estratégia de otimização baseada em ACO foi testada para a resolução de uma instância com 48 furos, 105 operações e 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 e de 146s considerando a distância de Manhattan. Os menores tempos obtidos com sequências padronizadas foram 163, 1s e 175, 1s (distância Euclidiana e deslocamento paralelo ao eixo x e y , respectivamente) e 173, 7s e 192, 6s (distância de Manhattan e deslocamento paralelo ao eixo x e y , respectivamente).

Seguindo a linha de CNC do tipo pórtico, Tamjidy et al. (2015) propuseram um modelo

matemático linear para o problema de sequenciamento de operações de usinagem com os parâmetros utilizados por Liu et al. (2013). Como estratégia de resolução foi utilizado o método evolucionário denominado *Biogeography Based Optimization* (BBO), com o qual os autores reportaram redução no tempo auxiliar de produção da peça exemplo do trabalho de Liu et al. (2013) de 131,4 para 119,2s para a distância Euclidiana e de 146s para 136,85s para distância de Manhattan.

No trabalho de Khalkar et al. (2015) foi proposta a aplicação do GA para resolução do problema de sequenciamento em uma instância (peça) real, tal que alguns furos necessitam de operação de alargamento. Os autores reportaram redução de 28% no tempo auxiliar calculado para produção da peça em comparação com o tempo auxiliar apontado na produção da peça.

Uma hibridização do GA com a heurística *Cucko Search* foi proposta por Lim et al. (2016) para resolver o problema de sequenciamento de operações em CNC. O algoritmo proposto reduziu o tempo auxiliar obtido na instância proposta por Ghaiebi e Solimanpur (2007) em 23%, totalizando 222s de movimentação do *spindle* e 144s de tempo de troca de ferramentas.

Qudeiri et al. (2007) resolveram o problema de sequenciamento de operações de usinagem em peças com múltiplos planos. A resolução utilizou um GA e obteve uma trajetória ótima para uma peça com 84 furos e uma solução de boa qualidade para uma peça com 243 furos, sendo que em ambas os furos estavam distribuídos em 3 planos distintos (eixo *z*). As soluções obtidas com o método atualizaram o código G da CNC, que sequenciava as operações de modo aleatório.

Kuçucoglu et al. (2019) abordaram o TPOP com uma estratégia de resolução para o modelo PCVRP elaborado por Kubo e Kasugai (1991). Os autores compararam a performance do algoritmo proposto com o desempenho obtido pelo resolvidor comercial Gurobi™ Solver 7.5.1 em instâncias do PCVRP/SOP disponíveis na TSPLIB (REINELT, 1991) e também em três produtos fornecidos por uma empresa, cujo volume de produção anual é da ordem de milhares. Os autores reportaram soluções ótimas para algumas instâncias de *benchmarking* com até 78 nós, além de reduzir o tempo de processamento dos produtos reais testados em relação àqueles obtidos pela empresa (melhorias de 0,4% para o produto 1, 4,05% para o produto 2 e 0,92% para o produto 3).

No trabalho de Ahammed et al. (2019) foi estudado o problema de sequenciamento de operações de usinagem com múltiplas ferramentas e duas máquinas, sendo que as operações

podem ser executadas em apenas uma máquina ou em ambas, com ferramentas iguais ou distintas. Desta forma, a solução conta com uma trajetória para cada máquina, o que torna similar ao Problema dos Múltiplos Caixeiros-Viajantes com Restrições de Precedência.

Ao contrário da grande maioria dos trabalhos sobre otimização de trajetória de ferramentas, Karuppusamy e Kang (2017) formularam uma estratégia de resolução para instâncias do TPOP que representam peças com ressaltos suficientemente grandes para restringir o movimento da estrutura movente de uma máquina CNC ao longo do plano (x, y) . Os autores reportaram resultados expressivos em cinco modelos de peças gerados em um *software* CAD, com redução de 32% na movimentação total de 4 modelos de peças pequenas e 84% para uma peça com 8 barras trefiladas como obstáculo para 104 furos.

Outro processo de usinagem comumente abordado nos TPOP's consiste em realizar contornos utilizando fresas de topo. No artigo de Lin (2013) foi desenvolvida uma estratégia para otimizar a trajetória de uma ferramenta de corte com o intuito de minimizar o número de regiões com material não-removido nos cantos da superfície de peças de metal. De maneira similar, o trabalho de Abdullah et al. (2017) utilizou uma modificação do ACO para minimizar o tempo de fresamento de contornos de peças através da otimização da trajetória da fresa, ocasionando redução do retrabalho na remoção pesada de material.

A distinção estrita entre métodos de solução aproximados e exatos é apontada por Hoker (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 o uso de modelos à caracterização dos problemas e ignorando procedimentos como obtenção de limitantes (DEWIL et al., 2019). 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; BASSEUR; TALBI, 2009).

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO

Este capítulo descreve o problema de otimização abordado nesta dissertação. Inicialmente são apresentadas informações sobre a máquina CNC representada, tal como a movimentação da ferramenta entre operações, o tipo de magazine e a estratégia de troca. A seguir é traçado um paralelo do problema em questão com o PCVRP. Por fim, são apresentadas três formulações do PCVRP extraídas da literatura, as quais foram testadas no resolvidor comercial CPLEX® para verificação da capacidade de resolução das instâncias resolvidas com o método proposto.

3.1 Definição do Problema

Seja uma peça em processo de usinagem cujas especificações demandam furos que, para que sejam realizados, necessitam o_n operações de usinagem pertencentes a um conjunto $I = \{o_1, \dots, o_i, o_j, \dots, o_n\}$, realizadas por diferentes ferramentas de acordo com as suas características. Cada operação requer uma ferramenta f específica dentre um conjunto F de ferramentas disponíveis no magazine da máquina. Se determinado furo requer, por exemplo, três operações sequenciais que utilizam diferentes ferramentas, digamos o_i, o_j e o_k , estas apresentam entre si restrições de precedência, denotadas por $o_i \succ o_j, o_j \succ o_k$ e, conseqüentemente, $o_i \succ o_k$.

As ferramentas do conjunto F que não se encontram em uso são armazenadas em um magazine, localizado junto à coluna lateral da máquina, em uma região fora da área da mesa de trabalho do equipamento. O magazine desloca-se no eixo das ordenadas, acompanhando o movimento da ferramenta durante as operações e, desse modo, está sempre paralelo, em relação ao eixo das ordenadas, ao mecanismo que movimenta a ferramenta em uso. O número de pontos onde o magazine pode ser acessado é igual ao número de ordenadas diferentes nas quais os furos devem ser usinados. Os N_i pontos onde o magazine pode se posicionar para troca de ferramenta formam o conjunto NM .

Definimos ciclo como um conjunto de operações que uma ferramenta realiza quando equipada na máquina, contendo ao menos uma operação, antes de ser substituída. Quando o ciclo é encerrado, a estrutura movente desloca a ferramenta até a coluna lateral da máquina, na região mais próxima da última operação realizada pela ferramenta, e encontra o magazine para efetuar a troca. Desse modo, definimos T como o tempo necessário para a máquina efetuar a

substituição da ferramenta atual pela subsequente, contabilizado após o mecanismo transportar a ferramenta em uso até o magazine.

As restrições de precedência entre as operações interferem na ordem em que as ferramentas podem ser utilizadas. Ferramentas que realizam furos de diâmetro menor não possuem predecessores obrigatórios e, portanto, podem iniciar o processo de usinagem, com seu primeiro ciclo partindo do ponto de repouso do equipamento, que é definido como $(0,0)$ e não faz parte do conjunto I . As ferramentas intermediárias, cujas operações dependem do uso de ferramentas antecessoras e necessitam de sucessoras para completar os furos, não podem iniciar nem terminar suas trajetórias no ponto $(0,0)$. Por fim, as ferramentas que realizam as operações finais nos furos podem terminar a trajetória de seus últimos ciclos no ponto $(0,0)$ - uma delas deve efetivamente fazê-lo.

Dado que cada operação pode ser realizada apenas por uma ferramenta do conjunto F , o processo de usinagem necessita, no mínimo, um número de ciclos igual ao número de ferramentas necessárias para as operações da peça em questão, obviamente um ciclo por ferramenta. Desse modo, o objetivo do problema descrito é minimizar o tempo não-produtivo do processo, chamado tempo auxiliar, que compreende o tempo de deslocamento do mecanismo da máquina entre as operações e o tempo necessário para efetuar a troca de ferramentas, de modo que sejam respeitadas as restrições de precedência entre as operações.

3.2 Características do Problema em Relação à Máquina Representada

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 na coluna lateral do equipamento.

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 é constante e usualmente maior que o maior tempo de deslocamento entre as

operações.

Para que um determinado furo seja perfeitamente usinado é necessário que operações com ferramentas diferentes sejam realizadas de maneira sequencial. Isso ocorre devido à necessidade de iniciar furos de diâmetro grande com furos piloto, para, posteriormente, os alargar, e também pela diferença na natureza das operações, dado que operações de rosqueamento e mandrilamento naturalmente requerem furação prévia. Logo, cada furo f requer n_f operações sequenciais realizadas por uma combinação de ferramentas adequada para suas especificações.

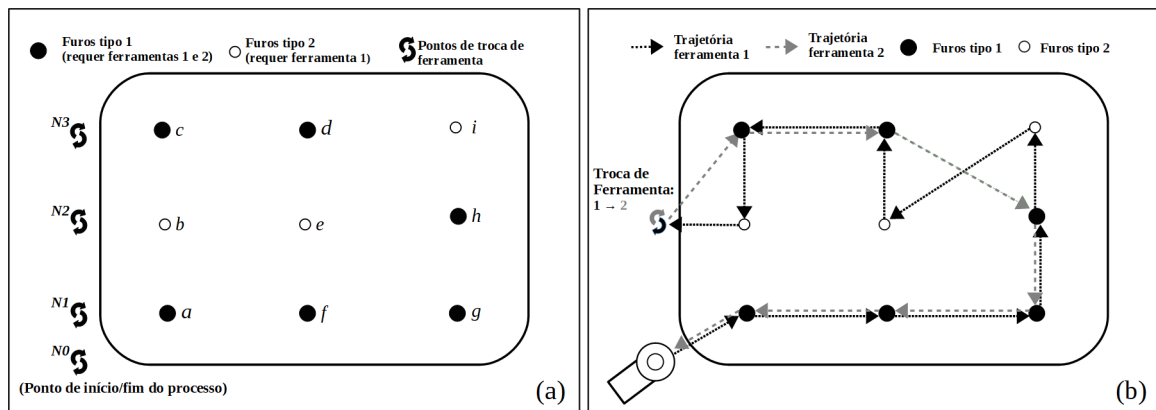
A representação do problema na forma do PCVRP é feita com a designação dos nós por uma combinação furo-ferramenta, na qual a posição de um furo é revisitada tantas vezes quanto o número de operações necessárias para sua conclusão. Dessa forma, o problema descrito pode ser representado tal qual a estrutura de grafo apresentada no capítulo anterior, com os elementos do conjunto de nós V sendo definidos por meio das combinações furo-ferramenta citadas anteriormente e os elementos do conjunto de arcos A representando o custo de deslocamento da estrutura movente da máquina CNC entre as operações. A estrutura movente pode ser a própria mesa de trabalho onde a peça é fixada ou um mecanismo que porta a árvore que fixa a ferramenta, chamado *spindle*. Para a máquina representada, considera-se que a mesa é fixa e o *spindle* se move sobre a peça.

Máquinas CNC com múltiplas ferramentas possuem magazines com diferentes métodos de operação, em sua maioria com forma de *turret* (carrossel) ou bancos com ferramentas localizados ao lado do espaço da mesa de trabalho do dispositivo. A otimização da utilização de máquinas CNC que possuem o magazine estilo carrossel demanda um problema de decisão adicional relacionado a configuração da ordem das ferramentas no magazine, tal que o tempo de troca de ferramentas é variável em função da posição que elas ocupam. No que se refere especificamente a troca de ferramenta em uma CNC com estrutura movente do tipo pórtico, o magazine normalmente está localizado junto a coluna lateral da máquina, e o processo de troca de ferramentas ocorre da forma descrita a seguir.

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 para o mesmo furo, a máquina desloca a sua estrutura movente até a posição $(0, y)$, em que y é a ordenada do furo que corresponde a operação o_i , e substitui a ferramenta em uso pela ferramenta designada para a próxima operação. Assim que a máquina executa a última operação necessária na peça em produção, a estrutura movente se des-

loca diretamente para o ponto de repouso do mecanismo, localizado na posição $(0, 0)$. Por fim, o deslocamento do magazine até os pontos das operações e entre as operações 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 3.1.

Figura 3.1 – Exemplo de instância do problema (a) e solução factível (b).



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

No exemplo da Figura 3.1 (a) é apresentada uma placa com nove pontos que indicam onde furos devem ser realizados por uma máquina CNC. Os pontos de cor branca (b, e, i) caracterizam furos que necessitam apenas de uma ferramenta para sua execução, ou seja, não requerem nenhum tipo de acabamento. Os pontos pretos (a, c, d, f, g, h), por sua vez, necessitam de uma operação extra, por exemplo rosqueamento. À esquerda da chapa estão representadas as regiões onde a troca de ferramentas pode ser realizada ($N1, N2, N3$); no modelo representado, estas regiões serão tantas quanto o número de ordenadas onde a chapa deve ser perfurada. O ponto representado em $N0$ $(0, 0)$ é o local onde a estrutura movente da máquina inicia e finaliza a sequência de operações e, portanto, não são efetuadas trocas de ferramentas nesta região. A Figura 3.1 (b) representa uma solução factível para a instância do exemplo. As setas escuras pontilhadas indicam uma sequência de operações realizadas pela ferramenta 1, a qual, no exemplo, é necessária em todos os furos. Assim que realiza a operação no furo b , a estrutura movente se desloca horizontalmente até o ponto $N2$, na coluna lateral da máquina, e substitui a ferramenta 1 pela ferramenta 2, para então percorrer a trajetória indicada pelas setas claras tracejadas a fim de realizar uma operação extra nos seis furos marcados em preto e retornar ao ponto $(0, 0)$.

A matriz de tempos de deslocamentos que representa os arcos em A é levemente assimé-

trica, 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 .

Se as operações sequenciais i e j são realizadas por ferramentas diferentes, o tempo do deslocamento c_{ij} sobre a placa é acrescido com o movimento até o magazine e de lá até a próxima operação. Caso uma operação k necessite outra operação anterior, digamos, um furo piloto, o deslocamento não é permitido para construção de uma trajetória válida.

A interdependência entre as operações sequenciais e a necessidade de troca de ferramentas conferem ao problema características do PCVRP, gerando algumas restrições quanto a ordem na qual certas operações podem ser executadas. Sempre que efetuar trocas de ferramentas, a estrutura movente da máquina deve se movimentar paralelamente ao eixo x desde o ponto da última operação i , (x_i, y_i) , até o ponto de troca de ferramenta mais próximo, na posição $(0, y_i)$, para encontrar o magazine e efetuar a troca, para então se deslocar até a posição da próxima operação j , (x_j, y_j) . O retorno da estrutura movente do magazine até a operação j não precisa necessariamente acontecer em movimento paralelo ao eixo x (ou seja, x_j pode ser diferente de x_i).

A solução do problema consiste em uma sequência de operações de usinagem necessárias para atender as especificações da peça em questão, de modo que o seu início e término ocorram no ponto $(0, 0)$ e ela utilize o mínimo tempo para a estrutura movente se deslocar sobre a peça e realizar trocas de ferramentas. É importante observar que os deslocamentos do ponto $(0, 0)$ (posição inicial/final da ferramenta) até a primeira operação e da última operação até $(0, 0)$ podem ser diagonais.

Embora o problema por si só não estabeleça um limite de trocas, é razoável pressupor que nas melhores soluções as ferramentas realizam todas as suas operações designadas antes de serem trocadas, dado que os deslocamentos até o magazine e as trocas de ferramentas consomem tempo considerável quando comparados ao maior deslocamento entre operações. A sequência de operações fixa e o tempo de troca constante diferenciam esta abordagem da anteriormente citada MT_{seq} , na qual os modelos frequentemente representam máquinas com deslocamento lento para as quais, em muitos casos, realizar um número maior de trocas é compensatório, dado que o magazine usualmente tem a forma de carrossel e a ferramenta o alcança

se deslocando apenas ao longo do eixo z .

Considerando as características da máquina CNC do tipo pórtico, a estratégia de solução desenvolvida neste trabalho transfere as restrições de precedência dos furos para as ferramentas. Deste modo, são consideradas apenas soluções que conectem as menores trajetórias parciais possíveis para cada ferramenta de tal modo que as relações de precedência sejam satisfeitas e cada ferramenta seja utilizada uma única vez. A relação entre o tempo de troca de ferramentas e o tempo que a estrutura movente utiliza ao se deslocar entre as coordenadas dos furos, possibilitam tratar o problema por meio de uma decomposição, agrupando as operações de acordo com a ferramenta que as realiza. O problema mantém a estrutura PCVRP porque preserva restrições de precedência entre operações de um mesmo furo e exige que todas sejam realizadas, diferentemente de outros métodos de agrupamento em *clusters* como o PCV Generalizado (PCVG) descrito em (CACCHIANI et al., 2010), no qual apenas um nó de cada família deve compor a trajetória, e o PCV de Famílias (PCVF), em que o número de nós de cada *cluster* a ser visitado, sempre menor que o total, é definido a priori (BERNARDINO; PAIAS, 2017).

3.3 Modelos Matemáticos do PCVRP da Literatura

Os modelos elaborados para o TPOP frequentemente apresentam formulações não-lineares, com variáveis inteiras contendo diversos índices a partir de uma abordagem confusa do problema, que, entre outras coisas, não deixa claro como é realizado o deslocamento até o magazine e como o tempo de troca é contabilizado. Isso faz com que a utilização desses modelos não seja trivial. Assim, para testar a capacidade de resolvers comerciais estado da arte, foram selecionados três modelos do PCVRP presentes na literatura, uma vez que, conforme anteriormente citado, o TPOP com as características descritas neste trabalho pode ser trabalhado como um PCVRP ou SOP.

O primeiro modelo selecionado, denominado *Precedence Constrained Traveling Salesman Problem* xy (PCATSP _{xy}), foi proposto por Sarin et al. (2005) e utiliza formulação mista. O segundo modelo, utilizado em Kuçucoglu et al. (2019), apresenta uma formulação para o Caixeiro-Viajante modificada com restrições para quebra de subciclos de Miller-Tucker-Zemlin (MTZ). O terceiro, denominado *Two Commodities Flow Model* (2-CMM), utiliza uma formulação de fluxo em redes para dois *commodities*.

3.3.1 Modelo PCATSP_{xy}

O modelo PCATSP_{xy}, proposto por Sarin et al. (2005), apresenta formulação estendida do PCVRP, na qual um conjunto de variáveis contínuas y_{ij} foi utilizado tanto para o conjunto de restrições de quebra de subciclos, quanto para satisfazer a ordem definida pelo conjunto de restrições de precedência. Embora as variáveis y_{ij} sejam definidas no conjunto dos números reais não-negativos, as restrições do modelo limitam os valores que elas podem assumir a valores pertencentes ao conjunto $\{0, 1\}$.

Notação

I : conjunto dos i nós, sendo $i = 1, 2, \dots, n$;

SPC_j : conjunto dos nós que devem obrigatoriamente preceder o nó j na solução;

c_{ij} : custo do deslocamento entre os nós i e j .

Variáveis

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ precede imediatamente o nó } j \text{ na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

y_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ precede o nó } j \text{ não necessariamente de imediato, na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Modelo Matemático

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \neq i \in I} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

s.a.

$$\sum_{i \neq j \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in |I| \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \neq i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in |I| \quad (3.3)$$

$$y_{ij} \geq x_{ij} \quad \forall i, j = 2, \dots, |I|, \quad i \neq j \quad (3.4)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall i, j = 2, \dots, |I|, \quad i \neq j \quad (3.5)$$

$$y_{ij} + y_{jk} + y_{ki} \leq 2 \quad \forall i, j, k = 2, \dots, |I|, \quad i \neq j \neq k \quad (3.6)$$

$$y_{ij} = 1 \quad \forall i \in SPC_j \quad \forall j = 2, \dots, |I| \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, |I|, \quad i \neq j \quad (3.8)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j = 2, \dots, |I|, \quad i \neq j \quad (3.9)$$

A equação (3.1) corresponde à função objetivo de minimização do tamanho da rota do caixeiro. As restrições (3.2) e (3.3) são as restrições usuais de designação. As restrições (3.4 – 3.6) proíbem a ocorrência de soluções contendo subciclos. A restrição (3.7) representa as relações de precedência entre os nós. As restrições (3.8) e (3.9) definem o domínio das variáveis do modelo.

3.3.2 Modelo PCTSP

Este modelo, formulado por Kuçucoglu et al. (2019), é uma extensão do PCV contendo restrições de precedência. O modelo é uma modificação do modelo PCVRP proposto por Kubo e Kasugai (1991). No trabalho dos autores, o modelo foi utilizado no algoritmo *Satin Bowerbird Optimizer* (SBO).

Notação

N : conjunto dos pontos a serem visitados, 0 representa o início, $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$;

t_{ij} : custo do deslocamento do *spindle* entre as operações i e j ;

p_{ij} : parâmetro binário, assume 1 se a operação i é precedente da operação j , com $i, j = 1, \dots, n$.

Variáveis

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ precede imediatamente o nó } j \text{ na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

u_j : variáveis auxiliares utilizadas no conjunto de restrições de quebra de subciclos.

Modelo Matemático

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ij} \quad (3.10)$$

s.a.

$$\sum_{j \in N, j \neq i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3.12)$$

$$u_i - u_j + |N| (x_{ij}) \leq |N| - 1 \quad i, j \in N \quad i \neq j \quad (3.13)$$

$$u_j - u_i \geq 1 \quad i, j \in N \quad p_{ij} = 1 \quad (3.14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (3.15)$$

$$u_j \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (3.16)$$

A função objetivo (3.10) minimiza a trajetória das ferramentas entre as operações. As restrições (3.11) e (3.12) asseguram que as operações sejam realizadas exatamente uma vez. A restrição (3.13) executa a quebra de subciclos na solução. A restrição (3.14) faz com que a solução atenda as restrições de precedência entre as operações. As variáveis são definidas pelas restrições (3.15) e (3.16).

3.3.3 Modelo de fluxo em rede para 2 *commodities* (2-CMM)

No modelo desenvolvido por (MOON et al., 2002) foi adicionado um conjunto de restrições para tratar a precedência entre nós ao modelo de fluxo em redes para dois *commodities* proposto por (FINKE; GUNN, 1984). As restrições que asseguram o balanço no fluxo dos *commodities* dispensam o uso de restrições de quebra de subciclos.

Notação

J : conjunto dos i nós, sendo $i = 1, 2, \dots, n$;

SPC_j : conjunto dos nós que devem obrigatoriamente preceder o nó j na solução;

c_{ij} : custo do deslocamento entre os nós i e j .

Variáveis

y_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ precede imediatamente o nó } j \text{ na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

y_{ij}^p : quantidade do *commodity* p transportada entre os nós i e j .

y_{ij}^q : quantidade do *commodity* q transportada entre os nós i e j .

Modelo Matemático

$$\min \sum_{i \in J} \sum_{j \neq i \in J} \frac{1}{(|J| - 1)} c_{ij} (y_{ij}^p + y_{ij}^q) \quad (3.17)$$

s.a.

$$\sum_{j \in J} y_{1j}^p - \sum_{j \in J} y_{j1}^p = (|J| - 1) \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij}^p - \sum_{j \in J} y_{ji}^p = -1 \quad \forall i \in J \quad i \neq 1 \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in J} y_{1j}^q - \sum_{j \in J} y_{j1}^q = -(|J| - 1) \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij}^q - \sum_{j \in J} y_{ji}^q = 1 \quad \forall i \neq 1 \in J \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in J} (y_{ij}^p + y_{ij}^q) = (|J| - 1) \quad \forall i \in J \quad (3.22)$$

$$y_{ij}^p + y_{ij}^q = (|J| - 1)y_{ij} \quad \forall i, j \in J \quad (3.23)$$

$$\sum_{i \in J} y_{uj}^p - \sum_{j \in J} y_{vj}^p \geq 1 \quad \forall u \in SPC_v, \quad v \neq 1 \quad (3.24)$$

$$y_{ij}^p \geq 0 \quad \forall i, j \in J \quad (3.25)$$

$$y_{ij}^q \geq 0 \quad \forall i, j \in J \quad (3.26)$$

$$y_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i, j \in J \quad i \neq j \quad (3.27)$$

A função objetivo (3.17) expressa o tempo total para que todos os nós sejam percorridos, uma vez que a soma dos *commodities* p e q entre os nós i e j em qualquer sequência factível é igual à $(J - 1)$. As restrições (3.18), (3.19) e (3.25) asseguram a factibilidade no fluxo do *commodity* p . De maneira análoga, as restrições (3.20), (3.21) e (3.26) asseguram a factibilidade no fluxo do *commodity* q . A restrição (3.22) garante a factibilidade na sequência. A restrição (3.23) explicita que, caso o nó j seja visitado imediatamente após o nó i , a soma dos *commodities* p e q entre i e j é igual a $(J - 1)$. As restrições em (3.24) são as restrições de precedência adicionadas ao modelo. As restrições (3.25 – 3.27) definem o domínio das variáveis.

4 HEURÍSTICA BASEADA EM PLIM PROPOSTA PARA O SEQUENCIAMENTO EM MÁQUINAS CNC

Nesta seção é apresentada a estrutura da heurística PLIM proposta para este trabalho. Inicialmente são apresentados dois resultados teóricos sobre o problema de sequenciamento de operações em máquinas CNC do tipo pórtico. A seguir, é discutida a estrutura do método de resolução proposto e, por fim, o modelo matemático desenvolvido para a heurística PLIM.

O método proposto nesta dissertação está apoiado nas características do problema de sequenciamento descrito no Capítulo 3, ou seja, o tempo necessário para a estrutura movente da CNC tipo pórtico se deslocar até o magazine e efetuar a troca de ferramentas é maior que o maior tempo de deslocamento entre operações. A proposição e o corolário que seguem são derivados destas características.

Proposição 1. *Seja ciclo a denominação de uma sequência de operações executadas por uma ferramenta. Dados n ciclos de uma mesma ferramenta, ($n > 1$), sempre é possível construir $n - 1$ ciclos com menor custo se a soma do tempo de troca de ferramentas e de duas vezes o menor deslocamento possível entre o magazine e os pontos da placa for estritamente maior que o maior tempo de deslocamento entre quaisquer dois pontos na placa.*

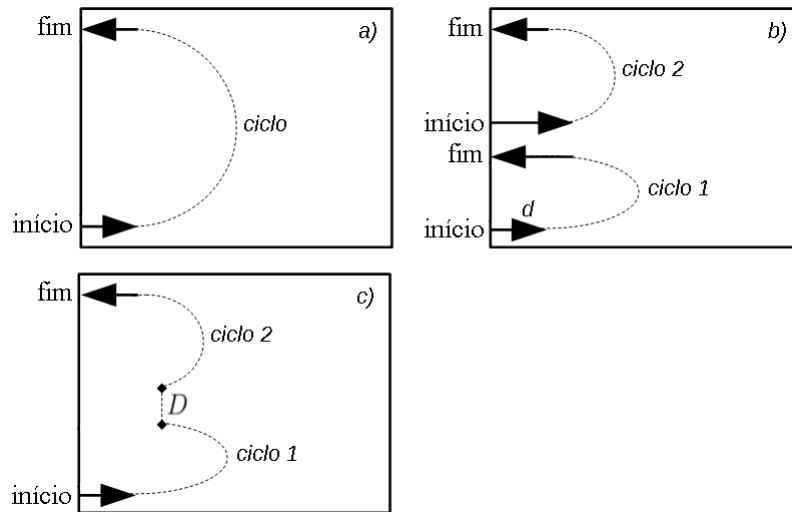
Prova. Considere que o tempo de troca de ferramentas T é computado ao final de cada ciclo, que D representa o maior tempo de deslocamento entre quaisquer dois furos na placa e que d representa o menor tempo de deslocamento possível entre o magazine e os pontos na placa. A Figura 4.1 ilustra um caso genérico no qual dois ciclos tem maior tempo de procesamento do que um único ciclo para uma mesma ferramenta.

Se existirem $n > 1$ ciclos para uma mesma ferramenta, sempre é possível unir dois ciclos por um arco que corresponde a um tempo de deslocamento menor ou igual a D . Como a união de dois ciclos significa substituir um tempo de troca de ferramenta e dois deslocamentos até o magazine e $D - (T + 2d) < 0$, conclui-se que reduzir o número de ciclos de qualquer ferramenta sempre implicará em uma redução de custo (tempo não produtivo).

□

Corolário 1.1. *O custo total de uma solução factível irá aumentar quando o número de ciclos de uma ou mais ferramentas for acrescido de uma ou mais unidades, a menos que os ciclos das demais ferramentas sejam calculados de forma a compensar o acréscimo devido ao aumento*

Figura 4.1 – Exemplo da Proposição 1.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

no número de ciclos.

Prova. Dado que aumentar o número de ciclos de uma ferramenta acarreta um aumento de custo, o custo da solução inevitavelmente também irá aumentar se o número de ciclos de todas as ferramentas aumentar. Desta forma, o único modo de reduzir o custo da solução é recalculando os ciclos das ferramentas que mantiveram o mesmo número de ciclos. \square

Na Figura 4.1 (a) a ferramenta realiza todas as suas operações com apenas um ciclo. Caso sejam utilizados ao menos dois ciclos (b), o custo do processo vai ser acrescido com uma troca de ferramentas adicional (T) e mais dois deslocamentos com, no mínimo, tempo d . Esta divisão de operações em dois ciclos não é satisfatória, pois o custo do arco D é menor que a soma dos deslocamentos mínimos d e T (c).

4.1 Heurística baseada em PLIM para o TPOP

A heurística baseada em PLIM proposta nesta dissertação consiste em um procedimento híbrido que integra procedimentos heurísticos e programação linear, composto por duas fases distintas: pré-processamento e concatenação das trajetórias individuais de cada ferramenta.

Na etapa de pré-processamento são eliminadas soluções nas quais as operações de cada ferramenta são realizadas em mais de um ciclo. Ou seja, busca-se apenas sequências nas quais as ferramentas realizam todas as operações a elas designadas antes de serem trocadas. Com isso, são obtidas soluções ótimas para todas as rotas parciais possíveis para cada ferramenta que

iniciam e finalizam nos pontos de troca de ferramentas.

Na fase de concatenação das trajetórias parciais de cada ferramenta é construída uma solução contendo todas as operações de usinagem demandadas pela peça, sendo que a heurística constrói esta solução selecionando uma trajetória para cada ferramenta na qual esta realize todas as operações a ela designadas antes de ser trocada no magazine, minimizando, portanto, o número de trocas de ferramentas em um arranjo que satisfaz as restrições de precedência entre as ferramentas e as restrições de início e término das operações.

Baseado no enunciado pela Proposição 1, as ferramentas completam suas trajetórias parciais em um único circuito, pois, considerando que o tempo não-produtivo aumenta a cada troca de ferramenta, supõe-se que na solução ótima as ferramentas completam todas as tarefas a elas designadas antes de serem substituídas. Assim, para usinar uma peça cujas operações necessitam n ferramentas, a máquina realizará $n-1$ trocas.

Além disso, o problema apresenta as seguintes hipóteses simplificadoras:

a) Não é considerado desgaste das ferramentas: todas as ferramentas são capazes de perfurar todos os pontos designados na placa com velocidade de corte constante, dispensando substituição ou reparo durante o regime de trabalho;

b) O tempo de troca de ferramentas e a velocidade de deslocamento da estrutura movente são constantes;

c) A troca de ferramentas ocorre sempre em uma coordenada $(0,y)$: para realizar a troca de ferramenta, ao terminar o último furo na posição (x_i, y_i) , a estrutura movente vai até um ponto $(0, y_i)$ em movimento retilíneo ao longo da coordenada x e encontra o magazine de troca.

4.1.1 Fase de pré-processamento

O pré-processamento consiste em gerar todas as sequências de operações de cada ferramenta considerando todas as possibilidades de início e fim. Neste estudo consideramos que a estrutura móvel que transporta a ferramenta de trabalho sempre inicia as operações na peça saindo da posição de início $(0,0)$ e retornando para esta posição ao final das operações.

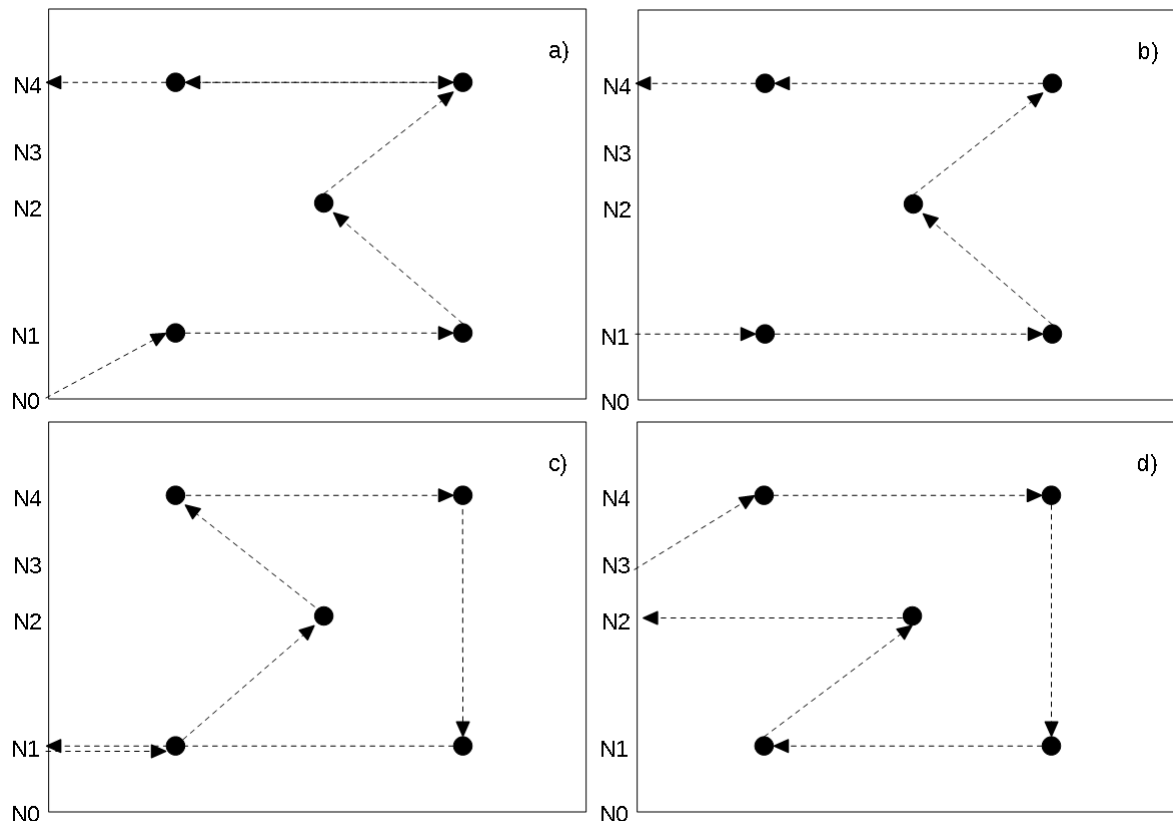
Nesta etapa, são resolvidos subproblemas referentes as trajetórias para execução do conjunto total de operações de cada ferramenta (Figura 4.2). Dado que o magazine da máquina é móvel, para cada ferramenta são considerados vários subproblemas com os diferentes pares de pontos de início e término possíveis para sua trajetória. Os subproblemas são modelados como um PCV, com distância nula entre o ponto inicial e final de troca de ferramentas, e resolvidos

na otimalidade com um resolvidor comercial genérico ou específico para PCV, podendo ser útil estabelecer um tempo limite T_{Limite} de processamento para cada subproblema. Considerando que as ferramentas que podem iniciar o processo não podem finalizá-lo, ou vice-versa, é possível estabelecer um número máximo de subproblemas (MP) para cada instância, tal que este é dependente do número de pontos de troca e do número de ferramentas no magazine, de modo que

$$MP = (\mathcal{A}_{N+1,2}) \times F \quad (4.1)$$

Na equação (4.1), o número máximo de subproblemas para determinada instância é calculado por meio do produto do arranjo do número de pontos de troca (N), tomados dois a dois, e o número de ferramentas do magazine. O método não elimina subproblemas simétricos devido a possíveis diferenças na etapa de concatenação.

Figura 4.2 – Exemplo da etapa de pré-processamento.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A função objetivo de cada subproblema 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. A Figura 4.2 ilustra o pré-processamento.

A Figura 4.2 mostra quatro subproblemas possíveis para uma ferramenta que deve executar 5 operações. Na Figura 4.2 (a), a ferramenta inicia o seu ciclo no ponto $N0$ - por definição localizado na origem $(0, 0)$ - que não pertence ao conjunto de pontos do magazine (NM), o que indica que ela não possui ferramentas predecessoras e, portanto, pode iniciar o processo. Caso existam outras ferramentas que podem iniciar o processo, a ferramenta do exemplo poderia iniciar seu ciclo em um ponto distinto, como o ponto $N1$ (b). O ponto de início do ciclo pode, inclusive, coincidir com o ponto de término (c), ainda que a primeira operação do ciclo da ferramenta não esteja localizada paralelamente ao ponto do magazine no qual a ferramenta anterior foi trocada (d).

Portanto, esta etapa consiste em resolver vários subproblemas que são similares ao PCV, com a diferença de terem o nó de início e o nó final predefinidos e de não haver um arco ligando o último nó da sequência ao ponto inicial. O modelo matemático a seguir ilustra o problema, e pode ser utilizado nesta fase da heurística, caso se faça uso de resolvedores de programação matemática como Gurobi™ ou CPLEX®.

Notação

I : conjunto das i operações que a ferramenta deve realizar, sendo $i = 0, 1, 2, \dots, n$;

M : número suficientemente grande; no modelo em questão, assume o valor $n + 1$;

c_{ij} : custo do deslocamento do *spindle* entre as operações i e j .

Variáveis

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ precede imediatamente o nó } j \text{ na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

u_j : variáveis auxiliares contínuas utilizadas no conjunto de restrições de quebra de subciclos.

Modelo Matemático

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \quad (4.2)$$

s.a.

$$\sum_{j \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \quad i \leq |I| - 1 \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in I, \quad j \geq 0 \quad (4.4)$$

$$u_0 = 0 \quad (4.5)$$

$$u_j \geq u_i + 1 - M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i, j) \in I, \quad j \leq |I| - 1 \quad (4.6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in I \quad (4.7)$$

$$u_j \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad j \leq |I| - 1 \quad (4.8)$$

A função objetivo (4.2) minimiza o tempo que cada ferramenta leva para completar sua rota parcial que inicia e termina, respectivamente, nos pontos de troca de ferramenta i e j . As restrições (4.3) e (4.4) obrigam os nós a compor a solução. As restrições (4.5) e (4.6) proíbem subciclos na solução. As restrições (4.7) e (4.8) definem o domínio das variáveis de decisão. Como o pré-processamento resolve separadamente as combinações para cada ferramenta, não existem restrições de precedência nesta fase.

4.1.2 Fase de concatenação das trajetórias parciais

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.

A concatenação constrói a solução completa do sequenciamento do processo de usinagem fazendo a conexão entre um ciclo de cada ferramenta, com a condição de que a ferramenta que vai iniciar o seu ciclo, a exceção da que inicia o processo, deve partir de um ponto do magazine paralelo à última operação da ferramenta anterior. A primeira operação da ferramenta recém selecionada não necessariamente deve estar localizada em um ponto paralelo ao ponto do magazine no qual ela foi trocada. Além disso, uma ferramenta dentre as que não possuem predecessoras deve iniciar o processo a partir do ponto de origem $(0, 0)$, e uma segunda ferramenta, dentre as que realizam operações de acabamento e não possuem sucessoras, deve se deslocar para este ponto após finalizar as suas operações. Como o ponto $(0, 0)$ não faz parte do magazine, o deslocamento final pode ser realizado em movimento diagonal.

Notação

NM : conjunto dos N_i pontos de troca de ferramentas;

F : conjunto de índices das ferramentas;

F^+ : conjunto de índices das ferramentas que inclui a ferramenta artificial 0, $F^+ = F \cup \{0\}$;

S_f : conjunto de índices das ferramentas que devem suceder a ferramenta f ;

l_{fij} : comprimento da trajetória da ferramenta f com início na posição i e término na posição j ;

M : número suficientemente grande.

Variáveis

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

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

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

Modelo Matemático

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} l_{fij} p_{fij} \quad (4.9)$$

s.a.

$$\sum_{f \in F} \sum_{j \in NM} s_{ff'j} = 1 \quad \forall f' \in F^+ \quad (4.10)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{j \in NM} s_{ff'j} = 1 \quad \forall f \in F^+ \quad (4.11)$$

$$\sum_{f' \in F} s_{0f'0} = 1 \quad (4.12)$$

$$\sum_{f \in F} s_{f00} = 1 \quad (4.13)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in NM} p_{fij} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad (4.14)$$

$$s_{ff'j} \leq \sum_{i \in NM} p_{fij} \quad \forall (f, f') \in F \times F : f \neq f' \quad \forall j \in NM \quad (4.15)$$

$$s_{ff'j} \leq \sum_{i \in NM} p_{f'ji} \quad \forall (f, f') \in F \times F : f \neq f' \quad \forall j \in NM \quad (4.16)$$

$$u_0 = 0 \quad (4.17)$$

$$u'_f \geq u_f + 1 - M \left(1 - \sum_{j \in NM} s_{ff'j} \right) \quad \forall (f, f') \in F^+ \times F : f \neq f' \quad (4.18)$$

$$u'_f \geq u_f \quad \forall f \in F \quad \forall f' \in \mathcal{S}_f \quad (4.19)$$

$$0 \leq u_f \leq |F^+| \quad \forall f \in F \quad (4.20)$$

$$p_{fij} \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F^+ \quad \forall (i, j) \in NM \quad (4.21)$$

$$s_{ff'j} \in \{0, 1\} \quad \forall (f, f') \in F^+ \times F^+ : f \neq f' \quad \forall j \in NM \quad (4.22)$$

A equação (4.9) corresponde à função objetivo, que visa minimizar o tempo total de deslocamento da estrutura movente. As restrições (4.10) e (4.11) asseguram que, na sequência de ferramentas, uma ferramenta f' (sucessora) inicia a sua trajetória na posição de troca j

na qual a ferramenta f (predecessora) termina suas operações. As restrições (4.12) e (4.13) asseguram o início e fim do sequenciamento com a ferramenta artificial f_0 na posição de troca 0. A restrição (4.14) determina que apenas uma trajetória (ciclo) pode ser escolhida para cada ferramenta. As restrições (4.15) e (4.16) garantem que a trajetória das soluções escolhidas para duas ferramentas em sequência, f e f' , terminem e comecem na posição j , respectivamente. As restrições (4.17) e (4.18) impedem subciclos pois estabelecem que o início e o fim da sequência de operações das ferramentas devem ocorrer em uma posição de troca, para então percorrer por todos os pontos que utilizam a ferramenta e finalizar em uma posição de troca. Como consequência da restrição (4.18), as variáveis u_f denotam a posição de cada ferramenta na sequência. A restrição (4.19) submete o sequenciamento das ferramentas às suas restrições de precedência. As restrições (4.20) – (4.22) delimitam o domínio das variáveis.

5 TESTES COMPUTACIONAIS

Este capítulo inicia com as informações de *software* e *hardware* utilizados nos experimentos. A seguir, são apresentadas as instâncias com as quais foram testados os modelos da literatura sobre o tema, descritos no Capítulo 4, e o modelo proposto nesta dissertação.

Os testes consideraram as métricas de distância Euclidiana e de Manhattan, dado que a estrutura movente da máquina pode se deslocar em movimentos retilíneos ou diagonais, pois ela pode acionar de maneira simultânea ou individual os motores que realizam a movimentação do pórtico nos eixos x e y .

Os experimentos foram realizados em um computador com Intel®Core™ i7-7700HQ CPU @2.80 GHz x8 e 16 GB de memória RAM. Na fase de pré-processamento, os arquivos de dados dos subproblemas, com estrutura adequada para resolução utilizando o resolvidor Concorde TSP Solver®, foram gerados com a linguagem GNU Octave. O modelo matemático de concatenação foi escrito em linguagem ZIMPL e resolvido utilizando o *software* IBM ILOG CPLEX®v. 12.9.0.0.1 com configuração padrão.

5.1 Descrição das instâncias de testes

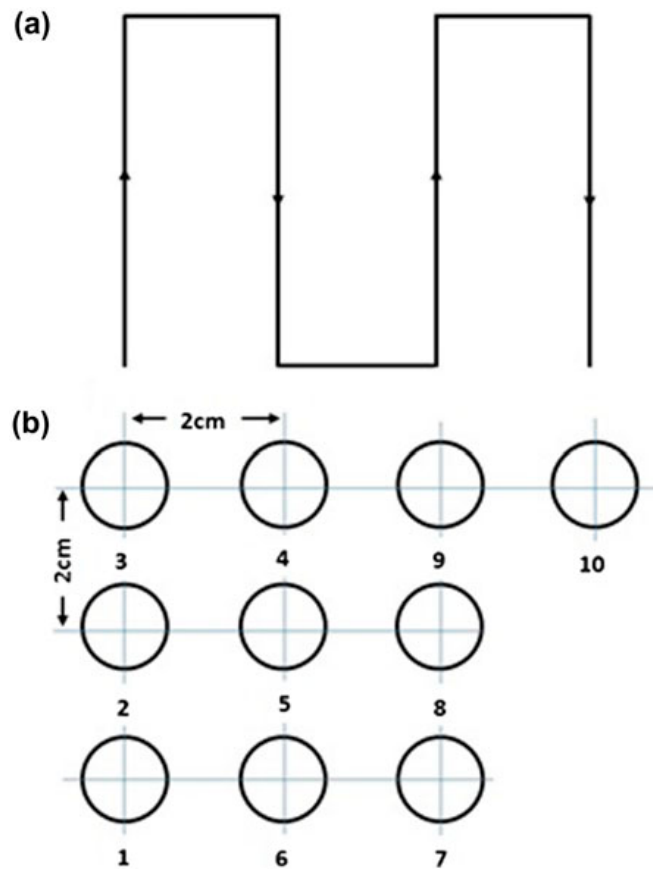
As instâncias utilizadas para os testes computacionais foram as mesmas utilizadas no artigo de Tamjidy et al. (2015), além de duas instâncias desenvolvidas pelo autor para este trabalho. A primeira instância do Conjunto Teste 2, testada na resolução dos modelos matemáticos da literatura apresentados no Capítulo 3, foi proposta originalmente por Liu et al. (2013).

5.1.1 Instâncias do Conjunto Teste 1

As instâncias testadas no Conjunto Teste 1 representam pontos a serem perfurados por uma única ferramenta, ou seja, com a estrutura do PCV. Este conjunto de instâncias foi originalmente proposto por Ghaiebi e Solimanpur (2007), e possui 6 instâncias, com 5, 10, 15, 20, 25 e 50 nós, respectivamente. Para verificar a capacidade de resolução do procedimento de pré-processamento da heurística proposta, este conjunto de instâncias foi ampliado com a adição de instâncias com 100, 200, 300, 500 e 1000 nós. O arranjo da posição dos nós destas instâncias segue exatamente as mesmas condições definidas nos artigos supracitados, tal que:

- O número de linhas do arranjo é igual a $\lfloor \sqrt{I} \rfloor$, com I sendo o número total de nós (furos).

Figura 5.1 – Método para determinar a posição do i -ésimo nó nas instâncias Conjunto Teste 2 (a) e posição dos nós na instância com $I = 10$ (b).



Fonte: Tamjidy et al. (2015).

- A distância de centro a centro entre os furos, em qualquer direção, é igual a $2cm$.

Desta forma, a posição do i -ésimo nó (furo) na instância é determinada conforme a Figura 5.1.

Segundo o método de construção da instância mostrado na Figura 5.1, a instância com 1000 nós, por exemplo, possui furos em 31 linhas (posição y) e 33 colunas (posição x), sendo 32 colunas completas e a última com os 8 nós restantes. Por questão de escala, as instâncias Conjunto Teste 2 não estão representadas graficamente.

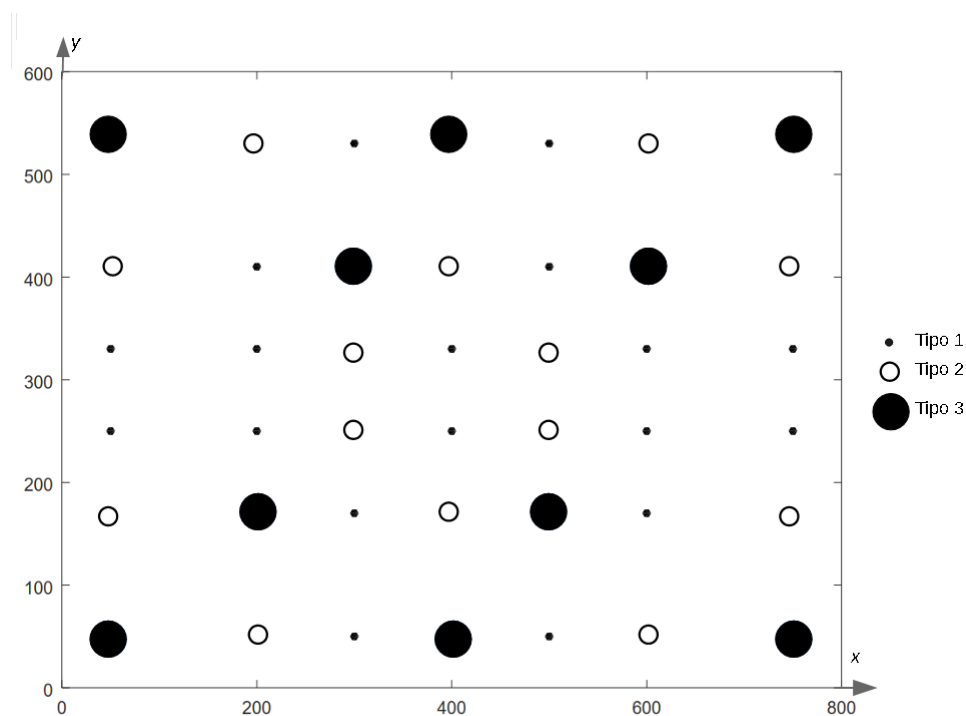
5.1.2 Instâncias do Conjunto Teste 2

No Conjunto Teste 2 foram resolvidas três instâncias que representam peças nas quais um certo número de furos deve ser realizado, tal que os furos, de acordo com suas especificações, são agrupados em diferentes tipos, e cada tipo necessita um conjunto próprio de ferramentas para sua conclusão.

A primeira instância resolvida no Conjunto Teste 2, referida neste trabalho como Liu-105, foi retirada do artigo de Tamjidy et al. (2015), e corresponde a uma peça retangular, de dimensões $800mm \times 580mm \times 60mm$, na qual deve-se perfurar 42 pontos de três tipos distintos, em um total de 105 operações (Figura 5.2). As outras duas instâncias resolvidas no Conjunto Teste 2 foram propostas pelo autor e também tratam-se de peças retangulares. A primeira instância proposta, denominada TA-168, representa uma peça de $800mm \times 600mm \times 80mm$ na qual 44 pontos de 4 tipos diferentes devem ser perfurados, com um total de 168 operações (Figura 5.3). A segunda instância proposta, TA-180, representa uma peça de $1200mm \times 800mm \times 60mm$ na qual 60 furos de 5 tipos diferentes devem ser realizados, totalizando 180 operações (Figura 5.4).

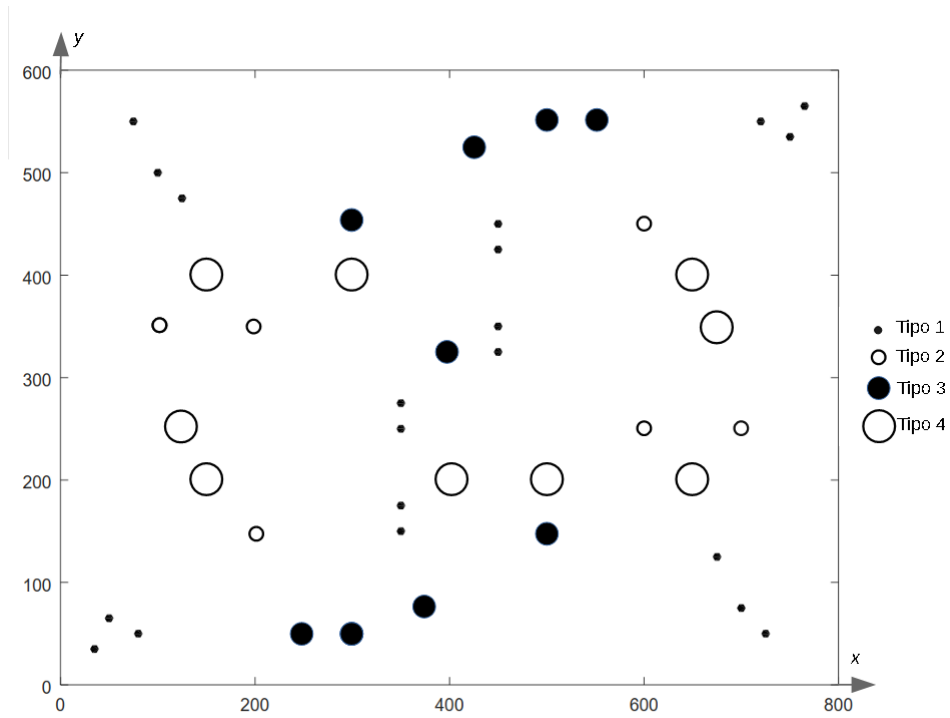
Os parâmetros das instâncias pertencentes ao Conjunto Teste 2, como quantidade de furos de cada tipo, conjunto de ferramentas necessárias para a execução e demais informações pertinentes estão sumarizados nas Tabelas 5.1 (instância Liu-105), 5.2 (TA-168) e 5.3 (TA-180). As coordenadas dos furos das instâncias propostas pelo autor estão no Apêndice B, Tabelas B.1 e B.2. A exemplo dos artigos de Liu et al. (2013) e Tamjidy et al. (2015), o tempo de troca entre qualquer par de ferramentas é constante ($5s$) e a velocidade de deslocamento do *spindle* em qualquer direção é de $20cm/s$.

Figura 5.2 – Instância de 42 furos e 105 operações proposta por Liu et al. (2013).



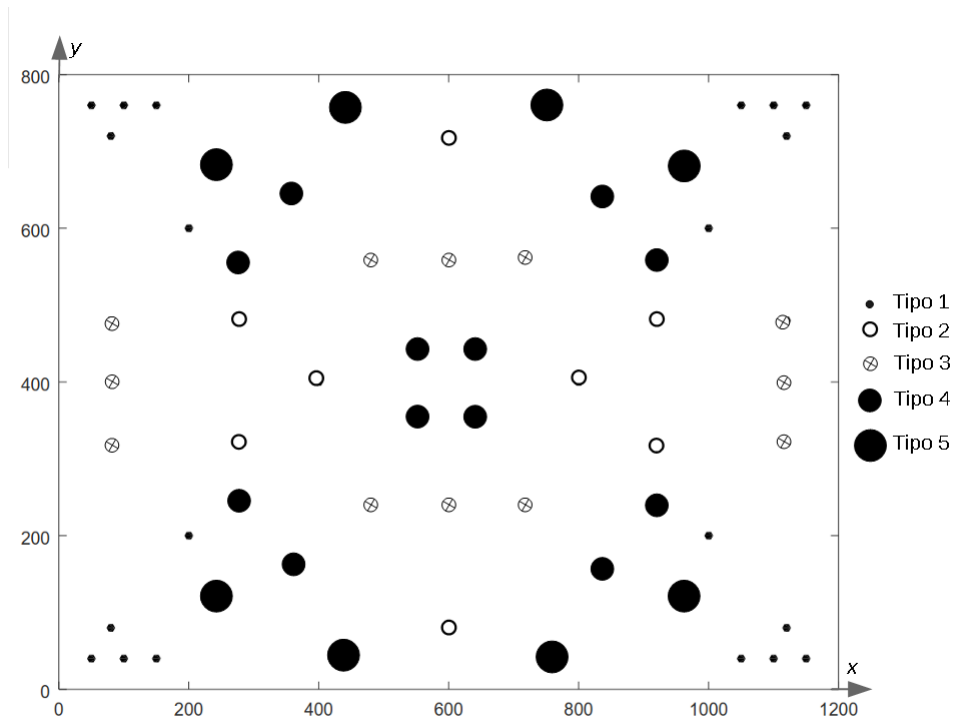
Fonte: Liu et al. (2013) - adaptado.

Figura 5.3 – Instância de 44 furos e 168 operações proposta pelo autor.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Figura 5.4 – Instância de 60 furos e 180 operações proposta pelo autor.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Por fim, os N pontos onde o *spindle* pode encontrar o magazine para efetuar trocas de

Tabela 5.1 – Especificações dos furos da instância Liu-105.

Tipo de furo	Quantidade	Sequência Ferramentas
1	18	2 – 6
2	14	1 – 8
3	10	2 – 3 – 4 – 5

Fonte: Liu et al. (2013).

Tabela 5.2 – Especificações das ferramentas da instância TA-168.

Tipo de furo	Quantidade	Sequência Ferramentas
1	20	1 – 3 – 8
2	6	2 – 3 – 9
3	9	2 – 5 – 6 – 7 – 9
4	9	1 – 4 – 5 – 7 – 10

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 5.3 – Especificações das ferramentas da instância TA-180.

Tipo de furo	Quantidade	Sequência Ferramentas
1	20	1 – 6
2	8	2 – 3 – 4
3	12	1 – 7
4	12	2 – 3 – 4 – 5 – 8
5	8	2 – 3 – 5 – 9

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

ferramentas são definidos, em cada instância, de acordo com o número de ordenadas em que os furos se localizam, além do ponto de início/término das operações, definido com o ponto $(x_0, y_0) = (0, 0)$. Na instância Liu-105, $N = 7$; na TA=168, $N = 22$ e na TA-180, $N = 18$.

5.2 Resultados e Discussão

5.2.1 Resultados dos modelos da literatura

A instância Liu-105 foi utilizada para testar os modelos selecionados da literatura e suas versões modificadas. Os modelos foram implementados em ZIMPL e resolvidos com o resolvidor IBM ILOG CPLEX®v.12.9.0.0.1, considerando a métrica de distância Euclidiana. Para que a comparação ficasse mais coerente com a proposta da heurística baseada em PLIM, nos três modelos foi inserido um conjunto de restrições para limitar o número de troca de ferramentas (Equações 5.1 e 5.2). A restrição (5.1) foi adicionada ao modelo 2-CMM, a restrição (5.2)

aos modelos PCTSP e PCATSP_{xy}.

$$\sum_{i \in I_f} \sum_{j \in J \setminus \{I_f\}: o_j \neq o_i} y_{ij} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad (5.1)$$

$$\sum_{i \in I_f} \sum_{j \in J \setminus \{I_f\}: o_j \neq o_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad (5.2)$$

As restrições adicionadas limitam a troca de ferramentas. Cada operação, de acordo com a ferramenta necessária para realizá-la, está contida em um conjunto I_f , $f \in F$. Em ambas as restrições, dentre todas operações de determinada ferramenta f , pertencentes ao conjunto I_f , apenas uma pode anteceder diretamente outra operação designada a outra ferramenta. Desse modo, os modelos da literatura foram modificados e receberam a nomenclatura de PCATSP_{xy} +, PCTSP + e 2-CMM +.

Os testes com os modelos modificados foram realizados em um computador equipado com processador Intel®Xeon™ E5-2697 v2 (x24) @ 2,70 GHz e 64GB de memória RAM. As resoluções foram executadas com o IBM ILOG CPLEX®12.9.0.0, com tempo total limitado a 24 horas por resolução e utilizando até 12 *threads*. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.4 (instância Liu-105), 5.5 (instância TA-168) e 5.6 (instância TA-180).

Tabela 5.4 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância Liu-105.

Modelo	Distância Euclidiana			Distância de Manhattan		
	Z	LB	Gap(%)	Z	LB	Gap(%)
2-CMM +	120,50	116,64	3,87	138,60	131,03	5,47
PCTSP +	121,76	97,44	19,97	145,80	115,46	20,81
PCATSP _{xy} +	-	94,62	∞	-	112,60	∞

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 5.5 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância TA-168.

Modelo	Distância Euclidiana			Distância de Manhattan		
	Z	LB	Gap(%)	Z	LB	Gap(%)
2-CMM +	149,01	135,04	9,38	169,90	149,31	12,12
PCTSP +	156,95	99,94	36,32	184,30	119,16	35,34
PCATSP _{xy} +	-	85,43	∞	-	104,26	∞

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

A primeira coluna das Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 indica o modelo modificado resolvido. A segunda, terceira e quarta colunas das Tabelas apresentam, respectivamente, a solução primal

Tabela 5.6 – Testes com as versões modificadas dos modelos da literatura - instância TA-180.

Modelo	Distância Euclidiana			Distância de Manhattan		
	Z	LB	Gap(%)	Z	LB	Gap(%)
2-CMM +	191,93	168,20	12,36	219,40	200,01	8,84
PCTSP +	217,97	132,50	39,21	879,60	157,27	82,12
PCATSP _{xy} +	-	121,55	∞	-	145,70	∞

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

para o modelo, caso tenha sido encontrada dentro do tempo estabelecido, o limitante inferior e o *gap*, considerando a métrica de Distância Euclidiana. As três últimas colunas apresentam solução primal, limitante inferior e *gap*, considerando a métrica de Distância de Manhattan.

Os melhores resultados para a instância testada foram obtidos pelos modelos de fluxo de dois *commodities*, sendo que o modelo original 2-CMM apresentou menor *gap*, solução mais próxima do valor ótimo, seguido por duas versão modificada 2-CMM +. O modelo PCTSP obteve solução mais próxima do valor obtido para os modelos de fluxo de *commodities* em comparação com sua versão modificada. Porém, o modelo PCTSP + obteve um limitante inferior ligeiramente mais apertado que o modelo sem modificação. O modelo PCATSP_{xy} e sua versão modificada, PCATSP_{xy} +, apresentaram performance semelhante, obtendo o mesmo valor para o limitante inferior e finalizando o tempo de resolução definido sem solução primal.

5.2.2 Resultados do Conjunto Teste 1

Os resultados para as instâncias Conjunto Teste 1 são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados para o Conjunto Teste 1.

I	Solução BBO*	Solução Concorde	Tempo Concorde (s)
5	12	12	< 0,01
10	24	24	0,01
15	32	32	< 0,01
25	52	52	0,01
50	104	104	0,08
100	-	200	0,12
200	-	400	0,35
300	-	600	0,63
500	-	1000	1,81
1000	-	2000	3,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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

A primeira coluna da Tabela indica o número de nós da instância. A segunda coluna

apresenta os melhores resultados, obtidos com o algoritmo BBO, publicados por Tamjidy et al. (2015) em 25 tentativas para cada instância. A terceira coluna apresenta os resultados obtidos com o Concorde TSP Solver®. A última coluna indica o tempo computacional para a resolução das instâncias com o Concorde TSP Solver®. Não foram disponibilizados os tempos de resolução das instâncias Conjunto Teste 2 no artigo de Tamjidy et al. (2015).

Observa-se que o resolvidor Concorde obteve soluções ótimas para as instâncias do Conjunto Teste 1 em baixo tempo computacional. Logo, as críticas presentes no trabalho de Dewil et al. (2019) sobre problemas de sequenciamento de operações idênticos ao PCV e desenvolvimento de métodos menos eficientes que os já disponíveis para tratá-los, caso do resolvidor citado, mostram-se pertinentes

5.2.3 Resultados da heurística baseada em PLIM para as instâncias do Conjunto Teste 2

5.2.3.1 Resultados da fase de pré-processamento

Na etapa de pré-processamento foram obtidas as soluções ótimas das trajetórias possíveis para cada ferramenta, considerando cada arranjo possível de posições do magazine nas quais a ferramenta pode iniciar e finalizar suas operações. Para ferramentas que podem iniciar o processo de usinagem, é permitido o início no ponto do magazine correspondente à origem; de maneira equivalente, as ferramentas que realizam o acabamento e, portanto, não têm sucessoras, podem finalizar o processo de usinagem no ponto de origem. Dessa forma, ferramentas que possuem predecessoras e sucessoras não possuem arranjos nos quais podem iniciar e finalizar o processo de usinagem e não consideram o ponto de origem do magazine. Esta combinação gerou um número de subproblemas proporcional ao número de posições nas quais a ferramenta pode encontrar o magazine para realizar trocas - dado pelo número de ordenadas em os pontos estão distribuídos da peça. As Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados da fase de pré-processamento para as instâncias Liu-105, TA-168 e TA-180, respectivamente.

As informações das Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 estão sumarizadas conforme se segue; da esquerda para a direita, as colunas 1 e 2 indicam o índice das ferramentas de cada instância e o número de subproblemas para as trajetórias de cada uma delas, sendo o total de 246 subproblemas resolvidos na instância Liu-105, 2402 na instância TA-168 e 1505 na instância TA-180 para cada métrica de distância. As colunas 3 e 4 apresentam, respectivamente, o valor da função objetivo do subproblema selecionado para a ferramenta para as distâncias Euclidiana e de

Tabela 5.8 – Resultados do pré-processamento da instância Liu-105.

Ferramenta	Nº sub.	Z sol. Euc.(s)	Z sol. Man.(s)
1	42	12,76	16,3
2	42	17,30	18,75
3	24	11,48	14,3
4	24	11,48	14,3
5	30	11,98	14,55
6	42	12,70	14,30
8	42	12,54	15,70

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 5.9 – Resultados do pré-processamento da instância TA-168.

Ferramenta	Nº sub.	Z sol. Euc.(s)	Z sol. Man.(s)
1	440	13,66	16,70
2	198	10,10	13,25
3	378	13,24	15,60
4	84	8,00	8,00
5	231	10,66	13,00
6	147	7,88	9,75
7	231	10,61	13,07
8	378	12,10	14,77
9	210	10,28	13,25
10	105	7,70	8,00

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 5.10 – Resultados do pré-processamento da instância TA-180.

Ferramenta	Nº sub.	Z sol. Euc.(s)	Z sol. Man.(s)
1	198	20,30	22,50
2	270	20,41	25,00
3	255	20,41	24,60
4	187	16,51	19,60
5	170	17,67	21,60
6	119	17,76	19,90
7	102	12,55	14,00
8	119	13,21	15,60
9	85	12,84	14,20

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Manhattan, respectivamente.

5.2.3.2 Resultados da fase de concatenação

Na etapa subsequente, as trajetórias das ferramentas foram concatenadas para gerar a solução do sequenciamento de operações de usinagem. Os resultados obtidos para a instância

Liu-105 com a heurística baseada em PLIM foram comparados com os melhores resultados da literatura, reportados no artigo de Tamjidy et al. (2015), os quais foram obtidos com o algoritmo BBO, proposto pelos autores. A Tabela 5.11 sumariza os resultados obtidos em relação aos melhores resultados da literatura. As Figuras 5.5 a 5.8 mostram a trajetória do *spindle* na peça representada pela instância Liu-105, sendo as trajetórias obtidas pela heurística proposta para a distância Euclidiana (Figura 5.5) e de Manhattan (Figura 5.6) e as trajetórias obtidas pelo algoritmo BBO para distância Euclidiana (Figura 5.7) e Manhattan (5.8). 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.

Tabela 5.11 – Comparação entre a solução do método proposto e a melhor solução do algoritmo de Tamjidy et al. (2015).

	Distância Euclidiana		Distância de Manhattan	
	Método Proposto	Algoritmo BBO*	Método Proposto	Algoritmo BBO*
Tempo auxiliar total (s):	120, 13	120, 89	137, 20	142, 00
Tempo de deslocamento (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

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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

O resultado publicado por Liu et al. (2013) para a instância Liu-105 foi de 131, 40. Este resultado foi omitido da comparação por ser maior que o melhor resultado reportado para a instância, publicado no artigo de Tamjidy et al. (2015), cujo tempo auxiliar total foi de 120, 89, sendo 89, 2s utilizados para a movimentação do *spindle* e 30s para trocas de ferramentas. Não está explicitado no artigo qual método do arredondamento utilizado pelos autores nos procedimentos de cálculo das matrizes de distância.

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

Os resultados obtidos com a heurística baseada PLIM para a fase de concatenação das instâncias propostas nesta dissertação são apresentados na Tabela 5.12. As trajetórias obtidas para a instância TA-168 estão representadas nas Figuras A.1 e A.2 (distância Euclidiana) e A.3 e A.4 (distância de Manhattan), e, para a instância TA-180, nas Figuras A.5 e A.6 (Euclidiana) e A.7 e A.8 (Manhattan), presentes no Apêndice A.

Tabela 5.12 – Resultados da fase de concatenação da heurística proposta para as instâncias TA-168 e TA-180.

	TA-168		TA-180	
	Dist. Euclidiana	Dist. de Manhattan	Dist. Euclidiana	Dist. de Manhattan
Tempo auxiliar total (<i>s</i>):	149,87	170,00	191,70	217,00
Tempo de deslocamento (<i>s</i>):	104,87	125,00	151,70	177,00
Tempo de troca (<i>s</i>):	45	45	40	40
Tempo de resolução (<i>s</i>):	78,71	96,12	25,89	44,99
Sequência de ferramentas:	1-4-2-5-7-6-3-8-10-9	1-2-5-4-6-3-8-7-10-9	1-2-3-7-4-5-8-9-6	1-2-3-7-4-5-8-9-6

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.2.4 Prova da Otimalidade da Instância Liu-105

Com base na Proposição 1 e no Corolário 1.1, um modelo matemático foi elaborado, com o objetivo de forçar as ferramentas a completar suas atividades utilizando mais de um ciclo. Conforme afirma a Proposição 1, aumentar o número de ciclos necessariamente aumentará o tempo com que uma ferramenta executa todas as suas operações, a menos que um arco unindo tais ciclos possua valor suficientemente grande. Deste modo, o modelo está fixado para que cada ferramenta execute suas operações designadas em dois ciclos.

Notação

n : número de operações presentes no conjunto I ;

$nb0$: primeiro índice do magazine permitido para o início;

$nb1$: último índice do magazine permitido para o início;

$ne0$: primeiro índice do magazine permitido para o fim;

$ne1$: último índice do magazine permitido para o fim;

I : conjunto das i operações que a ferramenta deve realizar, sendo $i = 0, 1, 2, \dots, n$;

I_b : conjunto dos b pontos de início do magazine, sendo $b = nb0, \dots, nb1$;

I_e : conjunto dos e pontos de término do magazine, sendo $e = ne0, \dots, ne1$;

M : número suficientemente grande;

c_{ij} : custo do deslocamento entre as operações i e j ;

cb_{bi} : custo do deslocamento do magazine (início) até os pontos da placa;

ce_{je} : custo do deslocamento dos pontos da placa até o magazine (fim);

Variáveis

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{se o ponto } i \text{ precede imediatamente o ponto } j \text{ na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

y_{bi} : $\begin{cases} 1 & \text{se o ponto } b \text{ do magazine precede o primeiro ponto } i \text{ da placa na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

w_{je} : $\begin{cases} 1 & \text{se o ponto } e \text{ do magazine sucede o último ponto } j \text{ da placa na solução.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

u_j : variáveis auxiliares contínuas utilizadas no conjunto de restrições de quebra de subciclos.

Modelo Matemático

$$\min \sum_{b \in I_b} \sum_{i \in I} cb_{bi} y_{bi} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in I} \sum_{e \in I_e} ce_{je} w_{je} \quad (5.3)$$

s.a.

$$\sum_{b \in I_b} \sum_{i \in I} y_{bi} = 2 \quad (5.4)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{e \in I_e} w_{je} = 2 \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ij} + \sum_{j \in I} \sum_{e \in I_e} w_{je} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.6)$$

$$\sum_{b \in I_b} \sum_{i \in I} y_{ib} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in I \quad (5.7)$$

$$u_j \geq u_i + 1 - M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i, j) \in I \quad i \neq j \quad (5.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in I \quad i \neq j \quad (5.9)$$

$$y_{bi} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in I_b \quad \forall i \in I \quad (5.10)$$

$$w_{je} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in I \quad \forall e \in I_e \quad (5.11)$$

$$u_j \geq 0 \quad \forall j \in I \quad (5.12)$$

A função objetivo (5.3) minimiza o custo do deslocamento dos pontos do magazine permitidos para início dos ciclos da ferramenta, mais o custo entre os pontos da peça e mais o custo do retorno até os pontos do magazine permitidos para finalizar o ciclo. As restrições (5.4) e (5.5) asseguram que dois arcos conectem os pontos de início do magazine até os pontos das operações e dois conectem os pontos das operações até os pontos de fim do magazine, obrigando a ferramenta a realizar suas operações em dois ciclos. As restrições (5.6) e (5.7) garantem que o ponto da última operação da ferramenta se conecte com algum ponto de fim permitido do magazine e que algum ponto de início permitido do magazine se conecte ao ponto da primeira operação da ferramenta. A restrição (5.8) evita subciclos entre as operações. As restrições (5.9 - 5.12) estabelecem o domínio das variáveis do modelo.

Como exemplo, tomamos a ferramenta 1 da instância Liu-105. Segundo os resultados do modelo, o menor tempo para conclusão das suas operações utilizando dois ciclos seria de 18,33s, considerando o tempo de deslocamento d de 0,25s, o menor possível para a instância. Como um ciclo extra requer uma troca de ferramenta adicional e dois deslocamentos, do magazine até o local da primeira operação do segundo ciclo, e do local da última operação do segundo ciclo até o magazine ou até o ponto (0,0), a diferença Δ_{f1} entre o tempo Z_{f1} , obtido pela heurística baseada em PLIM com um ciclo, e o tempo mínimo para realizar estas operações com dois ciclos, $Z2_{f1}$, é dada por

$$\Delta_{f1} = Z2_{f1} + T + 2d - Z_{f1} \quad (5.13)$$

$$\Delta_{f1} = 12,83 + 5 + 0,5 - 12,76 \quad (5.14)$$

$$\Delta_{f1} = 5,57 \quad (5.15)$$

Como Δ tem valor > 0 , a única possibilidade de redução do tempo auxiliar total seria, de acordo com o Corolário 1.1, que a soma das diferenças entre o menor tempo possível para as ferramentas restantes da instância e o valor selecionado pela heurística baseada em PLIM na concatenação fosse maior, em módulo, que o valor Δ . A Tabela 5.13 apresenta a diferença entre os valores mínimos para as ferramentas 2 – 8 e o valor alocado na solução, na etapa de concatenação.

Calculando Δ para as outras ferramentas, obtemos os valores:

$$\Delta_{f2} = 4,9 \quad \Delta_{f3} = 5,79 \quad \Delta_{f4} = 5,79 \quad \Delta_{f5} = 5,29 \quad \Delta_{f6} = 5,44 \quad \Delta_{f8} = 4,79$$

Tabela 5.13 – Diferença entre a solução da heurística baseada em PLIM e o menor valor possível para as ferramentas 2-8 na instância Liu-105.

Ferramenta	Z heur. PLIM. Euc.	Z min. Euc.	Δ Euc.
2	17,30	17,20	0,10
3	11,48	11,48	0,00
4	11,48	11,48	0,00
5	11,98	11,48	0,50
6	12,70	12,21	0,49
8	12,54	12,54	0,00
Total:			1,09

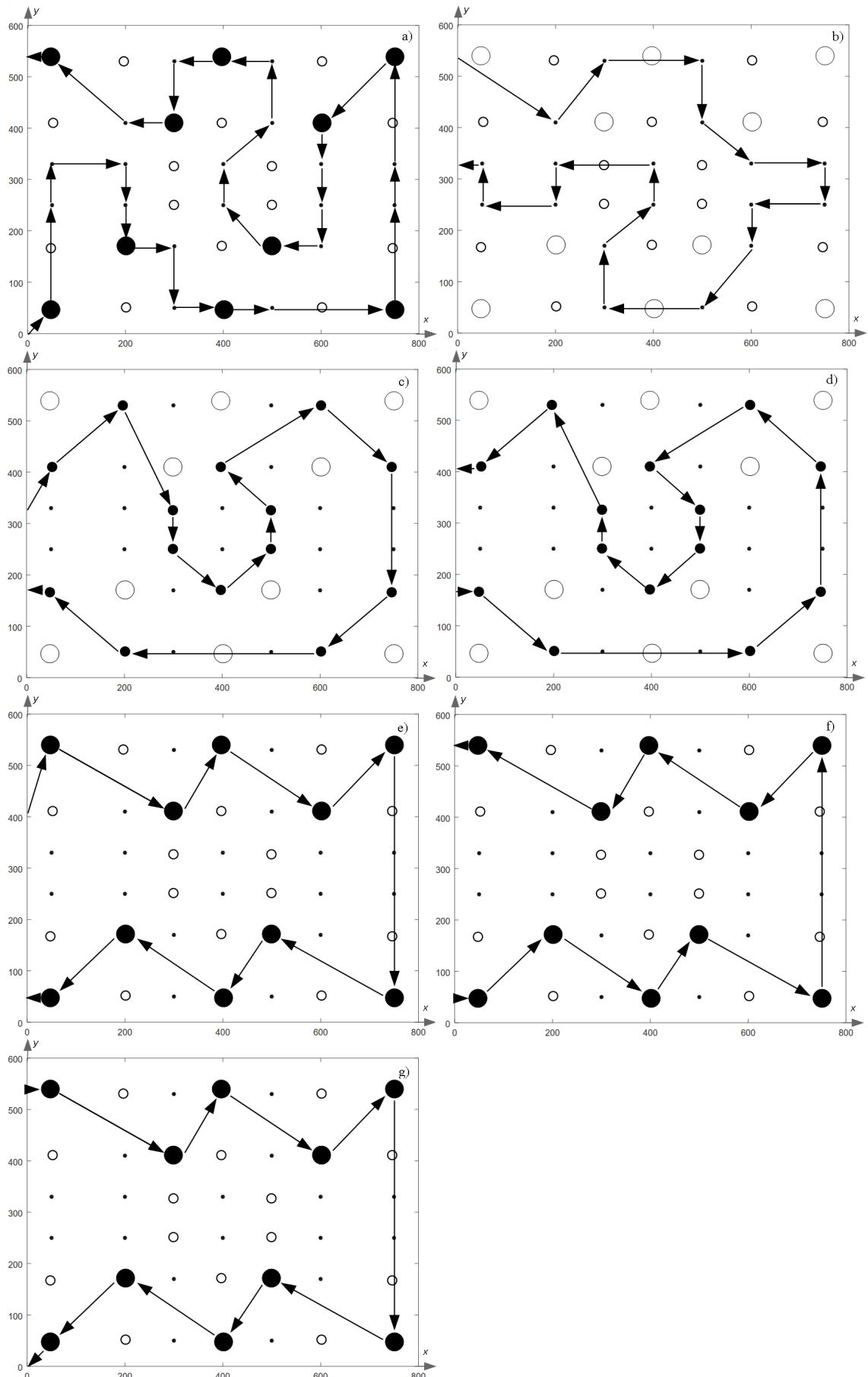
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

De maneira análoga ao que ocorre no caso da Tabela 5.13, ao quebrar o ciclo de qualquer outra ferramenta da instância em dois ou mais ciclos, não é possível obter uma solução que compense a troca extra de ferramenta T e dois deslocamentos peça-magazine.

Portanto, foi provada a otimalidade da solução da instância Liu-105, uma vez que a heurística baseada em PLIM obteve os valores mínimos para o tempo auxiliar de cada ferramenta e selecionou a melhor forma de concatenar as operações das ferramentas de modo a executá-las em um ciclo, dado que o aumento no número de ciclos de quaisquer ferramentas aumentaria o valor da solução e, mesmo desconsiderando a factibilidade da solução, não seria possível reduzir a diferença do aumento de ciclos concatenando outras soluções das ferramentas.

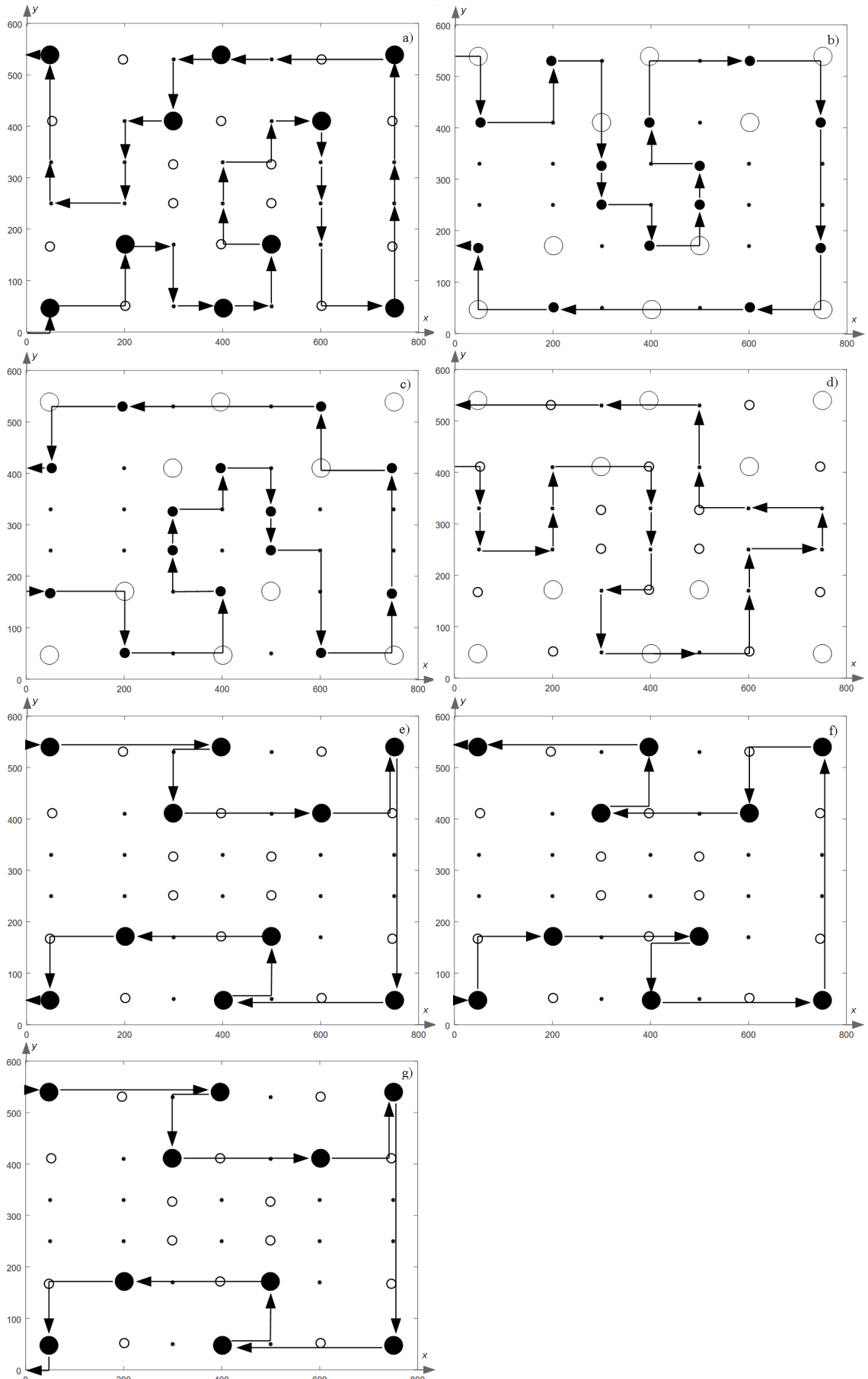
A estratégia desenvolvida para a resolução do problema de sequenciamento descrito utiliza elementos de métodos exatos e não possui procedimentos estocásticos; no entanto, devido à força da prova de otimalidade para a instância Liu-105 ser restrita, e pela combinação entre métodos de programação matemática e raciocínio heurístico para construção da forma da solução, é possível afirmar se tratar de uma heurística baseada em PLIM.

Figura 5.5 – Solução da heurística proposta para a instância Liu-105 - distância Euclidiana.



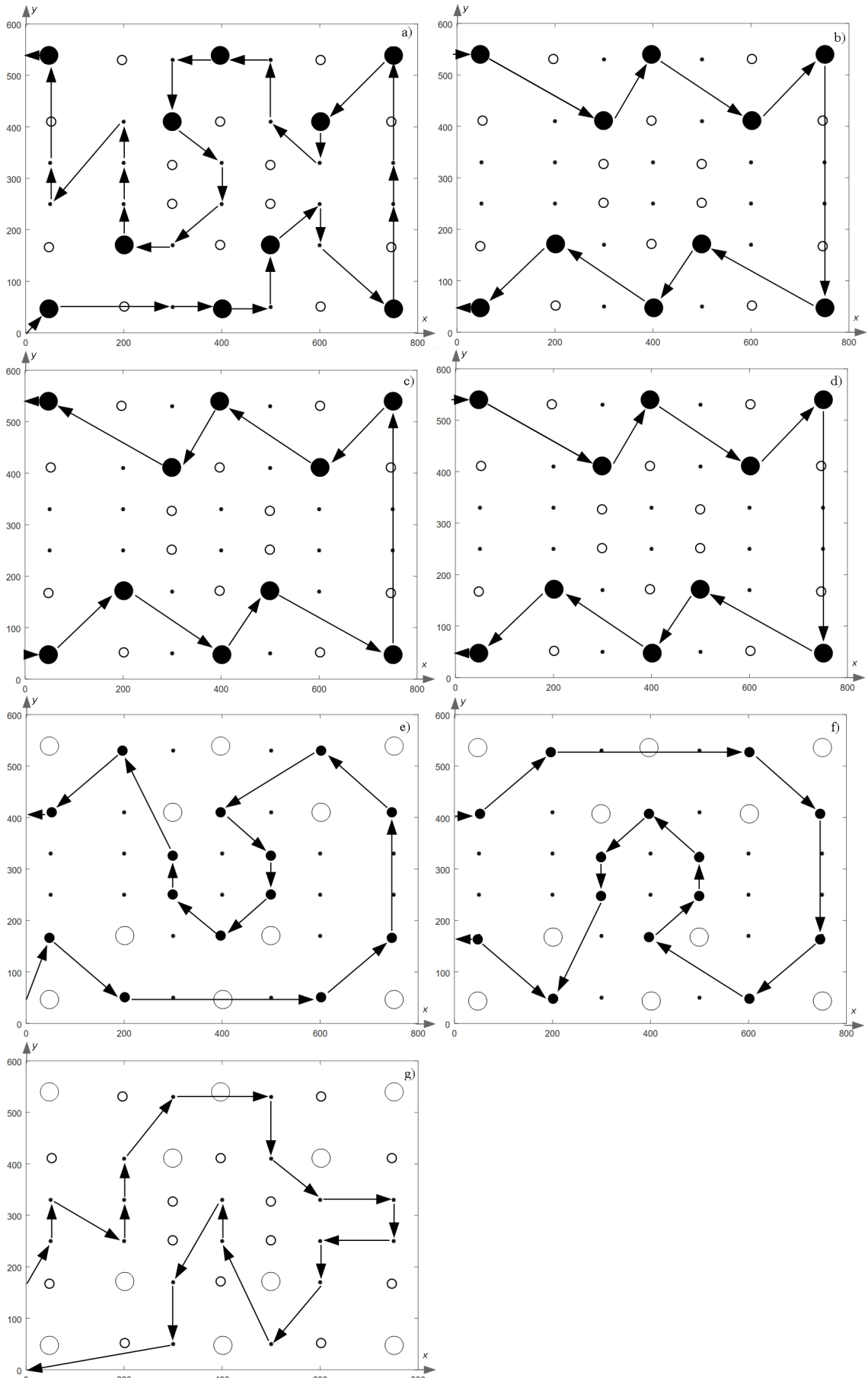
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 5.6 – Solução da heurística proposta para a instância Liu-105 - distância de Manhattan.



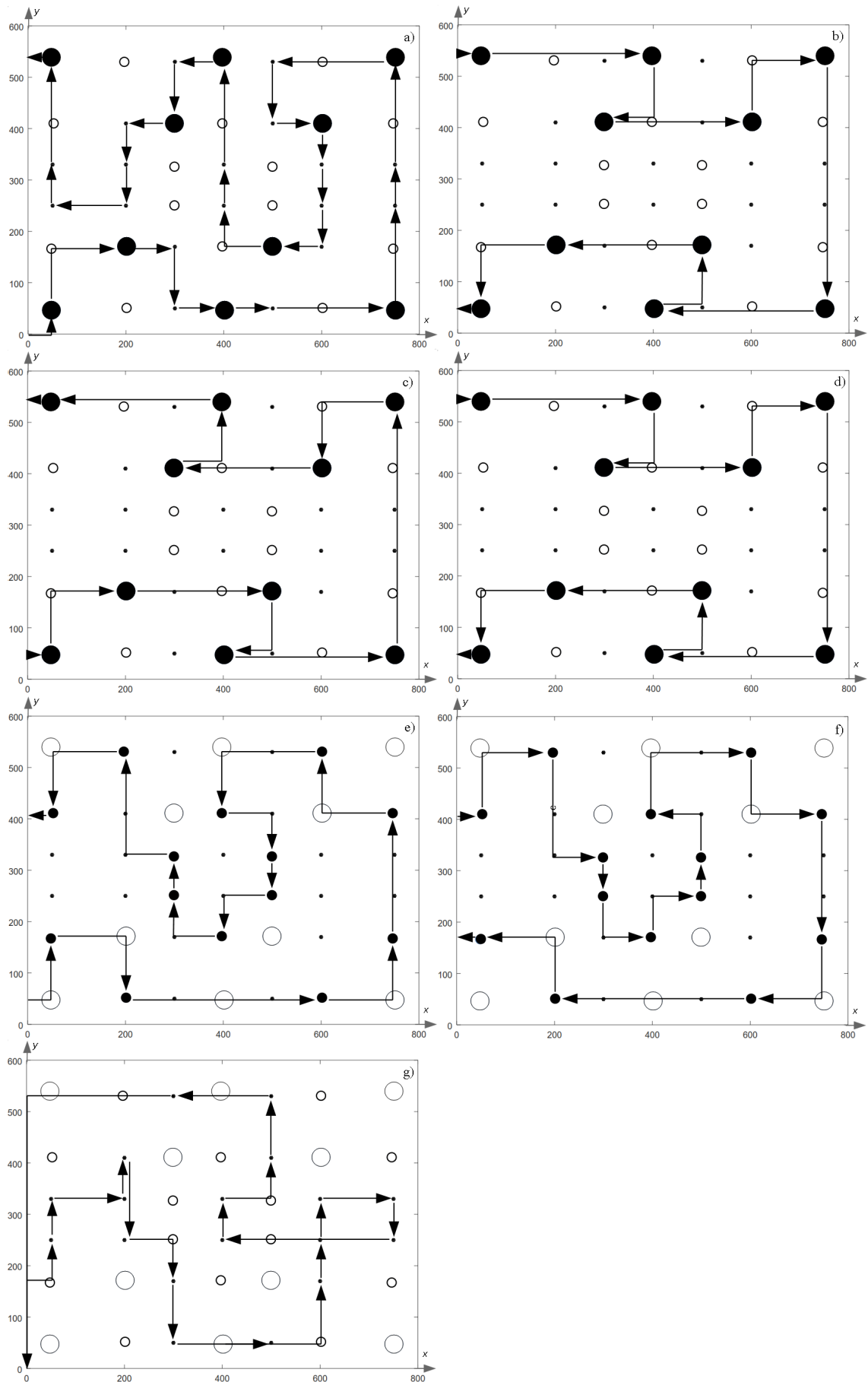
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 5.7 – Solução do algoritmo BBO para a instância Liu-105 - distância Euclidiana.



Fonte: Tamjidy et al. (2015) - adaptado.

Figura 5.8 – Solução do algoritmo BBO para a instância Liu-105 - distância de Manhattan.



Fonte: Tamjidy et al. (2015) - adaptado.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposta uma heurística baseada em PLIM para a resolução do problema de sequenciamento de operações de usinagem em máquinas CNC do tipo pórtico. Considerando os resultados obtidos para a instância disponível na literatura, Liu-105, 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 comparação ao melhor resultado reportado até então. 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 utilizou como critério de parada um tempo de resolução consideravelmente maior - 10 resoluções de 1000s cada.

Os testes com os modelos do PCVRP obtidos da literatura especializada mostraram diferenças significativas de desempenho em cada formulação de suas versões modificadas. A versão modificada do modelo de fluxo em rede para dois *commodities* apresentou resultados expressivamente melhores em comparação com a versão modificada das outras formulações. Contudo, a resolução usando o resolvidor comercial CPLEX® necessitou tempo computacional elevado e disponibilidade de máquinas com grande capacidade de processamento - recursos que eventualmente não são disponíveis no meio industrial - e não foi capaz de obter a solução ótima para as instâncias testadas.

Sobre a resolução das instâncias do Conjunto Teste 1, foi evidenciado que ferramentas de código aberto já disponíveis, como o resolvidor Concorde®, são capazes de resolver instâncias com um número considerável de nós, corroborando com a crítica de Dewil et al. (2019), sendo que tal número possivelmente é maior do que o número de operações usualmente realizados em peças reais. Dessa forma, o Concorde® se mostrou mais eficiente que estratégias de resolução desenvolvidas quase uma década depois. Somando isso ao fato de que este resolvidor pode ser usado em instâncias que violam a desigualdade triangular, desde que sejam simétricas, conclui-se que se trata de um método eficiente para resolução de problemas do tipo PCV, que conforme observado pelos autores supracitados, ainda formam a grande maioria das abordagens sobre sequenciamento de operações. Adicionalmente, o resolvidor mostrou bom desempenho ao ser utilizado na etapa de pré-processamento da heurística proposta.

As instâncias do Conjunto Teste 2 desenvolvidas para esta dissertação, embora repre-

sem peças artificiais, atingiram o objetivo de aumentar o *benchmark* disponível para esta abordagem do problema com instâncias mais difíceis que a única até então disponível. Sobre os seus testes computacionais, foi possível observar que o tempo decorrido na fase de pré-processamento depende principalmente da simetria da localização dos furos na placa, dado que esta implica no número de posições nas quais é possível realizar trocas de ferramentas. Essa característica fez com que a instância proposta com menor número de operações originasse mais subproblemas que a instância com número maior de operações. Tanto no caso da instância da literatura quando das instâncias novas, a proposição que fundamentou o método proposto foi satisfeita, uma vez que o tempo necessário para realizar pelo menos uma troca extra de ferramenta penalizaria a solução do problema em um tempo maior que o tempo de troca acrescido do menor deslocamento possível até o magazine. Com isso, é possível concluir que o método é válido desde que o deslocamento do *spindle* não seja excessivamente lento em comparação ao menor tempo de troca entre ferramentas.

A proposição que fundamentou a heurística baseada em PLIM forneceu uma prova fraca e não pode ser generalizada, mas foi suficiente para provar a otimalidade da solução obtida da instância Liu-105. A prova, embora não suficientemente coesa para ser tratada como um teorema, fornece um encaminhamento para provar a otimalidade de soluções para o problema, desde que as hipóteses simplificadoras descritas sejam observadas.

Para trabalhos futuros, pretende-se testar o método de resolução proposto em ambientes reais de fabricação, comparando o tempo auxiliar dos processos da sequência de operações gerada pela interface de *softwares* CAD e CAM com o tempo auxiliar da sequência de operações obtido pelo uso da heurística elaborada nesta dissertação. Outra proposta de continuidade para este trabalho é adaptar o método de resolução proposto para otimizar o consumo energético da máquina com base na rotina de operação dos servomotores instalados no equipamento.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. T.; ALI, M. F.; HAMZA, K. Optimum drilling path planning for a rectangular matrix of holes using Ant Colony Optimization. **International Journal of Production Research**, v.49, p.5877–5891, 2011.
- ABDIN, Z. W. N.; RASHID, M. F. F. A.; MOHAMED, N. M. Z. A Review of Multi-holes Drilling Path Optimization Using Soft Computing Approaches. **Archives of Computational Methods in Engineering Operacional**, p.1–12, 2017.
- ABDULLAH, H.; RAMLI, R.; WAHAB, D. A. Tool path length optimisation of contour parallel milling based on modified ant colony optimisation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.92, p.1263–1276, 2017.
- AHAMMED, T.; QUDEIRI, J. A.; MOURAD, A. H. **Intelligent Sequence Optimization Method for Hole Making Operations in 2M Production Line**. New Dehli: Springer, 2019. v.605.
- ALKAYA, A. F.; DUMAN, E. Application of Sequence-Dependent Traveling Salesman Problem in Printed Circuit Boards Assembly. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v.3, p.1063–1076, 2013.
- ALTAFINI, D. M. et al. Estudo de indicadores de desempenho para máquinas cnc em um ambiente de ferramentaria. In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Salvador, BA. **Anais...** 2009.
- APPLEGATE, D. et al. **The Traveling Salesman: a computational study**. 1.ed. Boston: Princeton University Press, 2006. ISBN 9780691129938.
- BERNARDINO, R.; PAIAS, A. Solving the family traveling salesman problem. **European Journal of Operational Research**, v.267, 2017.
- BIANCO, L. et al. Exact and Heuristic Procedures For The Traveling Salesman Problem With Precedence Constraints, Based On Dynamic Programming. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v.32, p.19–32, 1994.
- CHAVES, A. A.; SENNE, E. L. F.; YANASSE, H. H. Uma nova heurística para o problema de minimização de trocas de ferramentas. **Gestão & Produção**, v.19, p.17–30, 2012.

- CHEN, J. M.; GUO, W. G. Path optimization of the drilling hole based on Genetic Algorithm. **Advanced Materials Research**, v.497, p.382–386, 2012.
- DALAVI, A. M.; PAWAR, P. J.; SINGH, T. P. Optimization of hole-making operations for injection mould using particle swarm optimization algorithm. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v.6, p.433–444, 2015.
- DALAVI, A. M.; PAWAR, P. J.; SINGH, T. P. Tool path planning of hole-making operations in ejector plate of injection mould using modified shuffled frog leaping algorithm. **Journal of Computational Design and Engineering**, v.3, p.266–273, 2016.
- DALAVI, A. M.; PAWAR, P. J.; SINGH, T. P. Optimal sequence of hole-making operations using particle swarm optimisation and shuffled frog leaping algorithm. **Engineering Review**, v.36, p.187–196, 2016.
- DEWIL, R. et al. A Critical Review of Multi-Hole Drilling Path Optimization. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v.26, p.449–459, 2019.
- DUMAN, E.; OR, I. Precedence constrained TSP arising in printed circuit board assembly. **International Journal of Production Research**, v.42, p.67–78, 2004.
- DUMITRESCU, I. et al. The traveling salesman problem with pickup and delivery: polyhedral results and a branch-and-cut algorithm. **Mathematical Programming**, v.121, p.270–305, 2010.
- ESCUADERO, L. F. An inexact algorithm for the sequential ordering problem. **European Journal of Operational Research**, v.37, p.236–249, 1988.
- ESCUADERO, L. F.; GUIGNARD, M.; MALIK, K. A lagrangean relax-and-cut approach for the sequential ordering problem with precedence relationships. **Annals of Operations Research**, v.50, p.219–237, 1994.
- FINKE, G.; GUNN, E. A two-commodity network flow approach to the traveling salesman problem. **Congressus Numerantium**, v.41, 1984.
- GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. **HAS-SOP**: hybrid ant system for the sequential ordering problem. 1997.
- GHAIEBI, H.; SOLIMANPUR, M. An Ant Algorithm for Optimization of Hole-making Operations. **Computers and Industrial Engineering**, v.52, p.308–319, 2007.

GOUVEIA, L. et al. Combining and projecting flow models for the (Precedence Constrained) Asymmetric Traveling Salesman Problem. **Networks**, v.71, p.451–165, 2017.

GRAMA, S. N. et al. Optimization of high speed machine tool spindle to minimize thermal distortion. **Procedia CIRP**, v.58, p.457–462, 2017.

GUPTA, A. K.; CHANDNA, P.; TANDON, P. Hybrid genetic algorithm for minimizing non productive machining time during 2.5 D milling. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v.3, p.183–190, 2011.

GUTTIN, G.; PUNNEN, A. P. **The Traveling Salesman Problem and Its Variations**. 1.ed. Boston: Springer, 2006. ISBN 9780306482137.

HERNADVOLGYI, I. T. Solving the Sequential Ordering Problem with Automatic Generated Lower Bounds. **Operations Research Proceedings 2003**, p.355–362, 2003.

HOEFT, J.; PALEKAR, U. S. Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem. **IIE Transactions**, p.719–731, 1997.

HOOKE, J. Toward unification of exact and heuristic optimization methods. **International Transactions in Operational Research**, v.22, p.19–48, 2015.

HSIEH, Y. C. et al. Optimal Operation Sequence of Hole-Making with Multiple Tools in Manufacturing: a pso evolutionary based approach. **Key Engineering Materials**, v.460-461, p.398–403, 2011.

JOURDAN, L.; BASSEUR, M.; TALBI, E. G. Hybridizing exact methods and metaheuristics: a taxonomy. **European Journal of Operational Research**, v.199, p.620–629, 2009.

KARUPPUSAMY, N. S.; KANG, B. Y. Minimizing airtime by optimizing toolpath in computer numerical control machine tools with application of A and genetic algorithms. **Advances in Mechanical Engineering**, v.2017, p.1–9, 2017.

KHALKAR, S.; YADAV, D.; SINGH, A. Optimization of Hole Making Operations for Sequence Precedence Constraint. **International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering**, v.2, p.26–31, 2015.

KOLAHAN, F.; LIANG, M. Optimization of hole-making operations: a tabu-search approach. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.27, p.417–429, 2000.

KUBO, M.; KASUGAI, H. The Precedence Constrained Traveling Salesman Problem. **Journal of Operations Research Society from Japan**, v.34, p.152–172, 1991.

KUÇUCOĞLU, I. et al. Application of precedence constrained travelling salesman problem model for tool path optimization in CNC milling machines. **An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications**, v.9, p.59–68, 2019.

LAMBERT, A. J. D. Exact methods in optimum disassembly sequence search for problems subject to sequence dependent costs. **Omega**, v.34, p.538–549, 2006.

LAPORTE, G. The Traveling Salesman Problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v.59, p.231–247, 1992.

LIM, W. C. E.; KANAGARAJ, G.; PONNAMBALAM, S. G. PCB Drill Path Optimization by Combinatorial Cuckoo Search Algorithm. **The Scientific World Journal**, v.2014, p.1–10, 2014.

LIM, W. C. E.; KANAGARAJ, G.; PONNAMBALAM, S. G. A hybrid cuckoo search-genetic algorithm for hole-making sequence optimization. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.27, p.417–429, 2016.

LIN, Z.; FU, J.; GAN, W. Global uncut regions removal for efficient contour-parallel milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.68, p.1241–1252, 2013.

LIU, X. et al. Process planning optimization of hole-making operations using ant colony algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.69, p.753–769, 2013.

MAMILLA, R. M.; SRINIVASULU, M.; M., P. N. Study on computer numerical control (CNC) machines. **International Journal of Advanced Scientific Research**, v.1, p.13–17, 2016.

MINGOZZI, A.; BIANCO, L.; S., R. Dynamic Programming Strategies for the Traveling Salesman Problem with Time Window and Precedence Constraints. **Operations Research**, v.45, p.365–377, 1997.

MOON, C. et al. An efficient genetic algorithm for the traveling salesman problem with precedence constraints. **European Journal of Operational Research**, v.140, p.606–617, 2002.

NALLUSAMY, S. Enhancement of Overall Equipment Effectiveness using Total Productive Maintenance in a Manufacturing Industry. **International Journal of Performability Engineering**, v.13, p.01–16, 2017.

O'NEIL, R. J.; HOFFMAN, K. Exact Methods for Solving Traveling Salesman Problems with Pickup and Delivery in Real Time. **Optimization Online**, 2018.

ONWUBOLU, G. C.; CLERC, M. Optimal Path for Automated Drilling Operations by a New Heuristic Approach Using Particle Swarm Optimization. **International Journal of Production Research**, v.42, p.473–491, 2004.

PAPAPANAGIOTOU, V. et al. A Comparison of Two Exact Algorithms for the Sequential Ordering Problem. In: IEEE CONFERENCE ON SYSTEMS, PROCESS AND CONTROL (ICSPC 2015), 2015. **Anais...** 2015.

QUDEIRI, J. A.; YAMAMOTO, H.; RAMLI, R. Optimization of Operation Sequence in CNC Machine Tools Using Genetic Algorithm. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v.1, p.272–282, 2007.

RASHID, M. F. F. A. et al. Optimization of Traveling Salesman Problem with Precedence Constraint Using Modified GA Encoding. **Advanced Science Letters**, v.24, p.1484–1487, 2018.

RAZALI, M. N. An Efficient Algorithm for Large Scale Vehicle Routing Problem Subject to Precedence Constraints. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v.195, p.1922–1931, 2015.

REINELT, G. TSPLIB – A Traveling Salesman Problem Library. **ORSA Journal on Computing**, v.3, p.267–384, 1991.

ROBERTI, R.; TOTH, P. Models and algorithms for the Asymmetric Traveling Salesman Problem: an experimental comparison. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v.1, p.113–133, 2012.

SARIN, S. C.; SHERALI, H. D.; BHOOTRA, A. New tighter polynomial length formulations for the asymmetric traveling salesman problem with and without precedence constraints. **Operations Research Letters**, v.33, p.62–70, 2005.

SARIN, S. C.; SHERALI, H. D.; BHOOTRA, A. A precedence-constrained asymmetric traveling salesman model for disassembly optimization. **IIE Transactions**, v.38, p.223–237, 2006.

SESEKIN, A. N.; CHENTSOV, A. A.; CHENTSOV, A. A Generalized Courier Problem with the Cost Function Depending on the List of Tasks. **Systems Analysis and Operations Research**, v.49, 2010.

SHERALI, H. D.; DRISCOLL, P. J. On Tightening The Relaxations of Miller-Tucker-Zemlin Formulations for the Asymmetric Traveling Salesman Problems. **Operations Research**, v.50, p.656–669, 2002.

SHOBAKI, G.; JAMAL, J. An Exact Algorithm for the Sequential Ordering Problem and Its Application to Switching Energy Minimization in Compilers. **Computational Optimization and Applications**, v.61, p.343–372, 2015.

SKINDEROWICZ, R. An improved Ant Colony System for the Sequential Ordering Problem. **Computers and Operations Research**, v.86, p.1–17, 2017.

TAMJIDY, M. et al. Biogeography based optimization (BBO) algorithm to minimise non-productive time during hole-making operations. **International Journal of Production Research**, v.53, p.1880–1894, 2015.

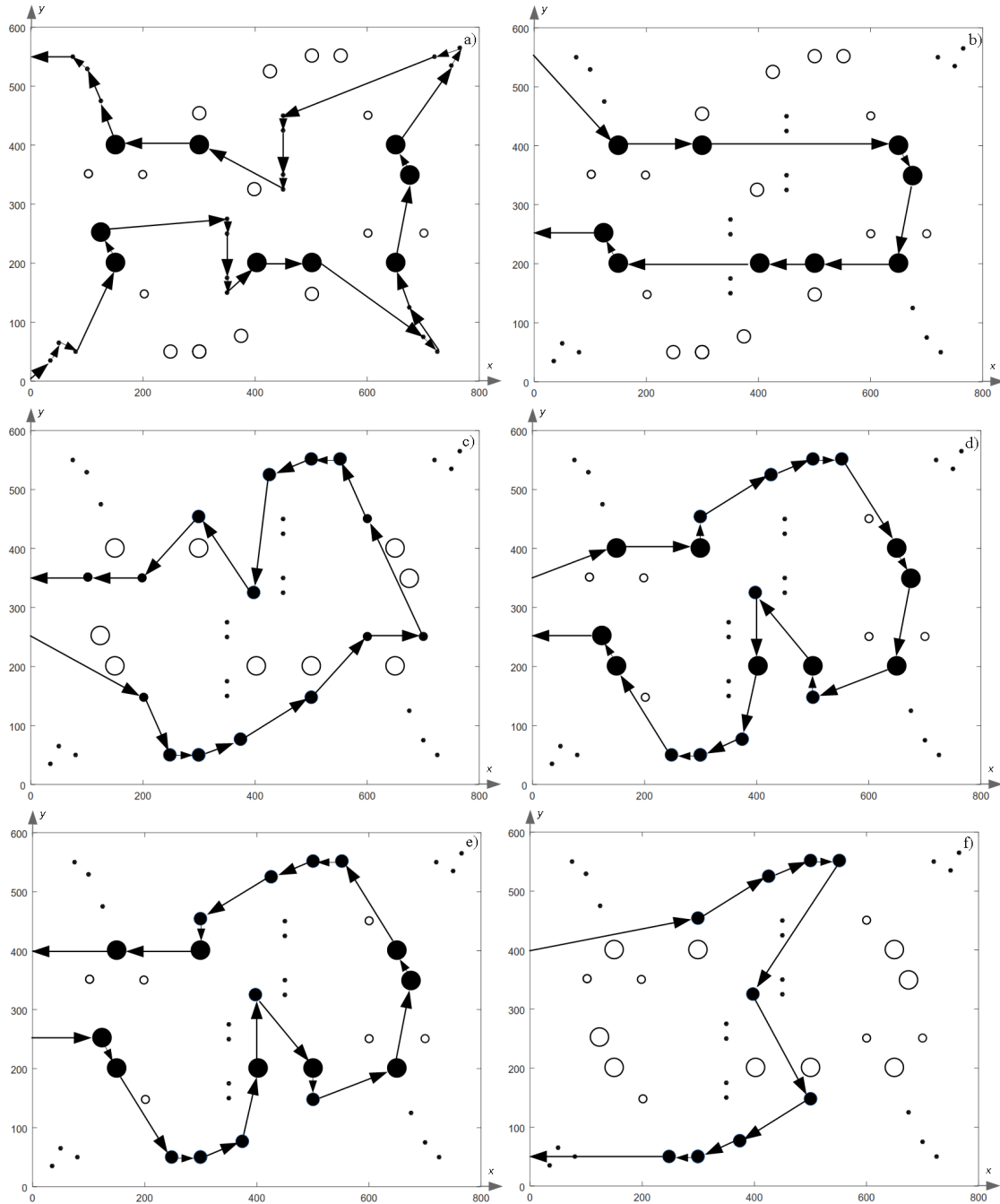
YUN, Y.; MOON, C. Genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.22, p.379–388, 2009.

ZHU, G. Y.; CHEN, L. F. Holes Machining Process Optimization with Genetic Algorithm. **Key Engineering Materials**, v.460-461, p.117–122, 2011.

APÊNDICES

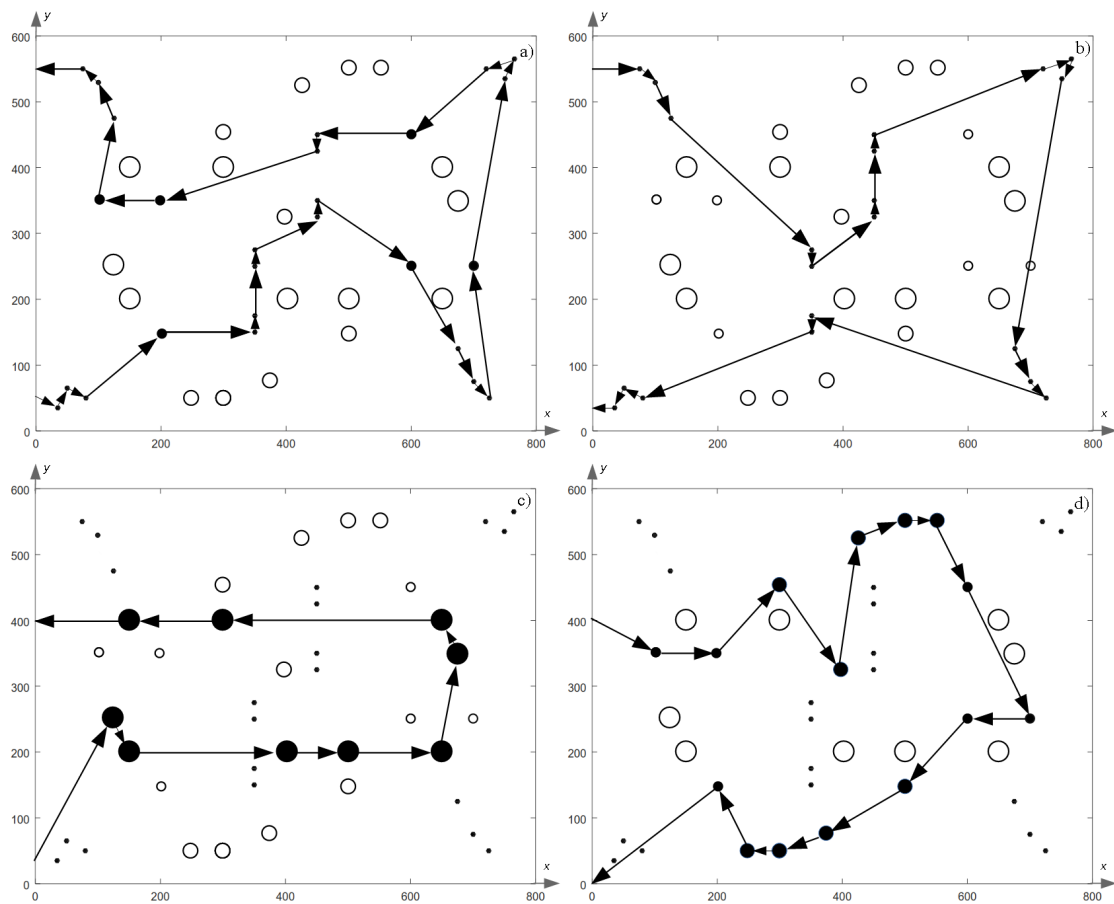
APÊNDICE A – Soluções para as instâncias propostas pelo autor

Figura A.1 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância Euclidiana - ferramentas 1, 4, 2, 5, 7 e 6.



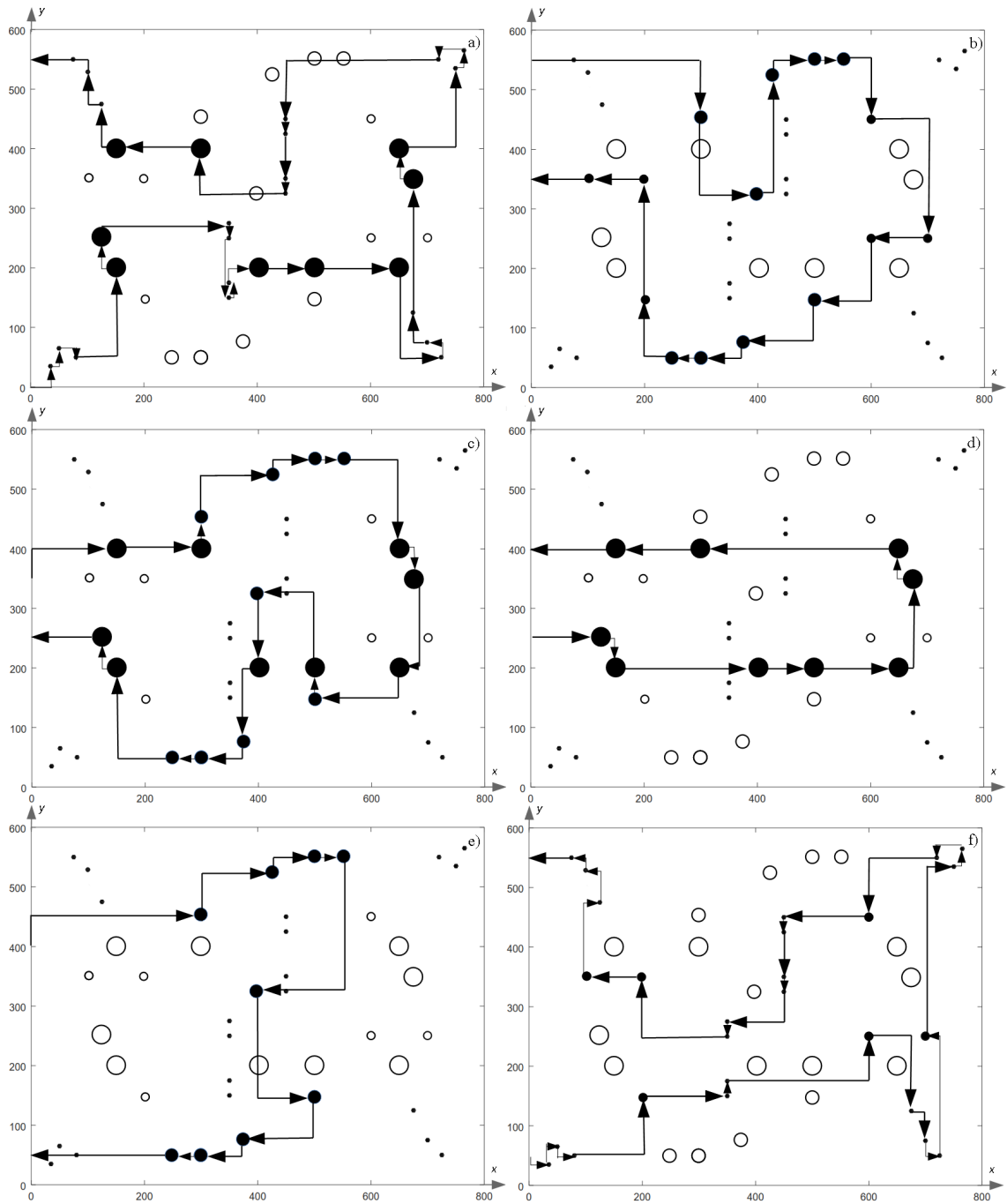
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.2 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância Euclidiana - ferramentas 3, 8, 10 e 9.



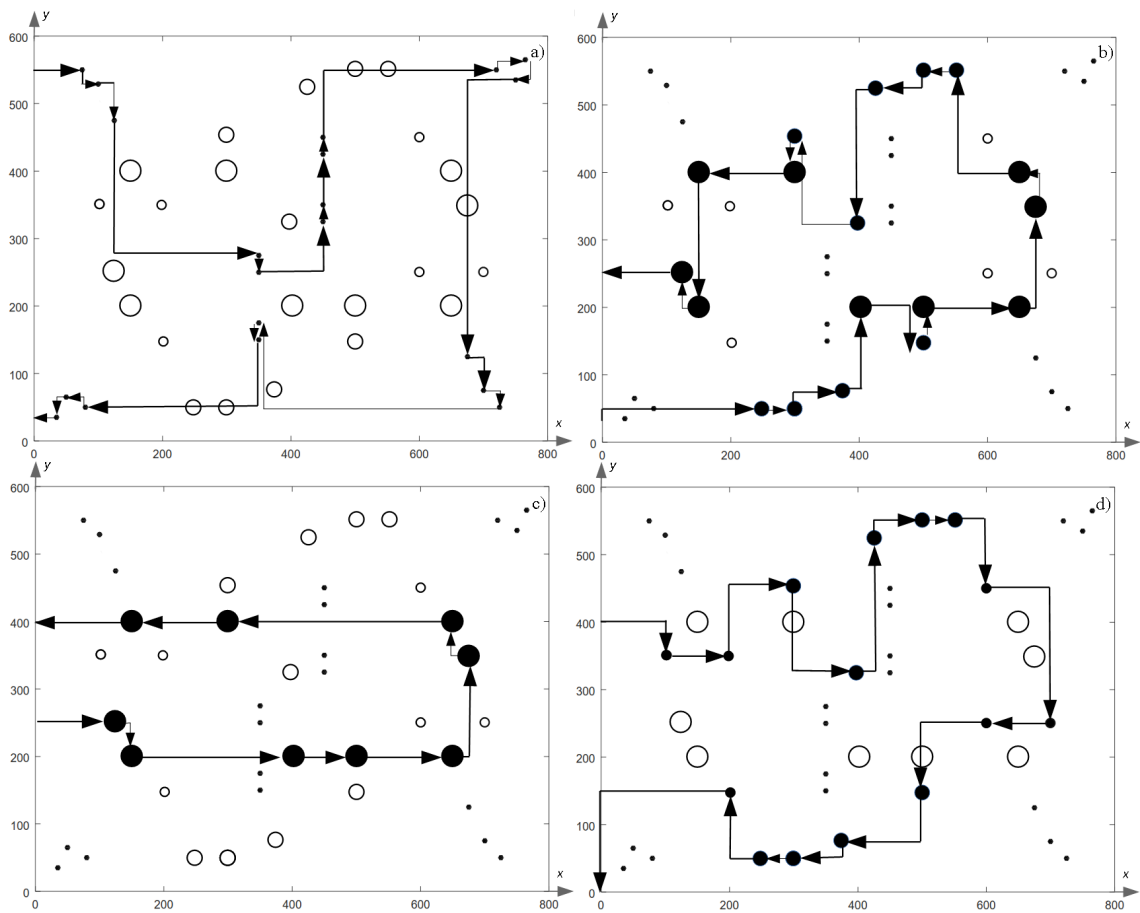
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.3 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância de Manhattan - ferramentas 1, 2, 5, 4, 6 e 3.



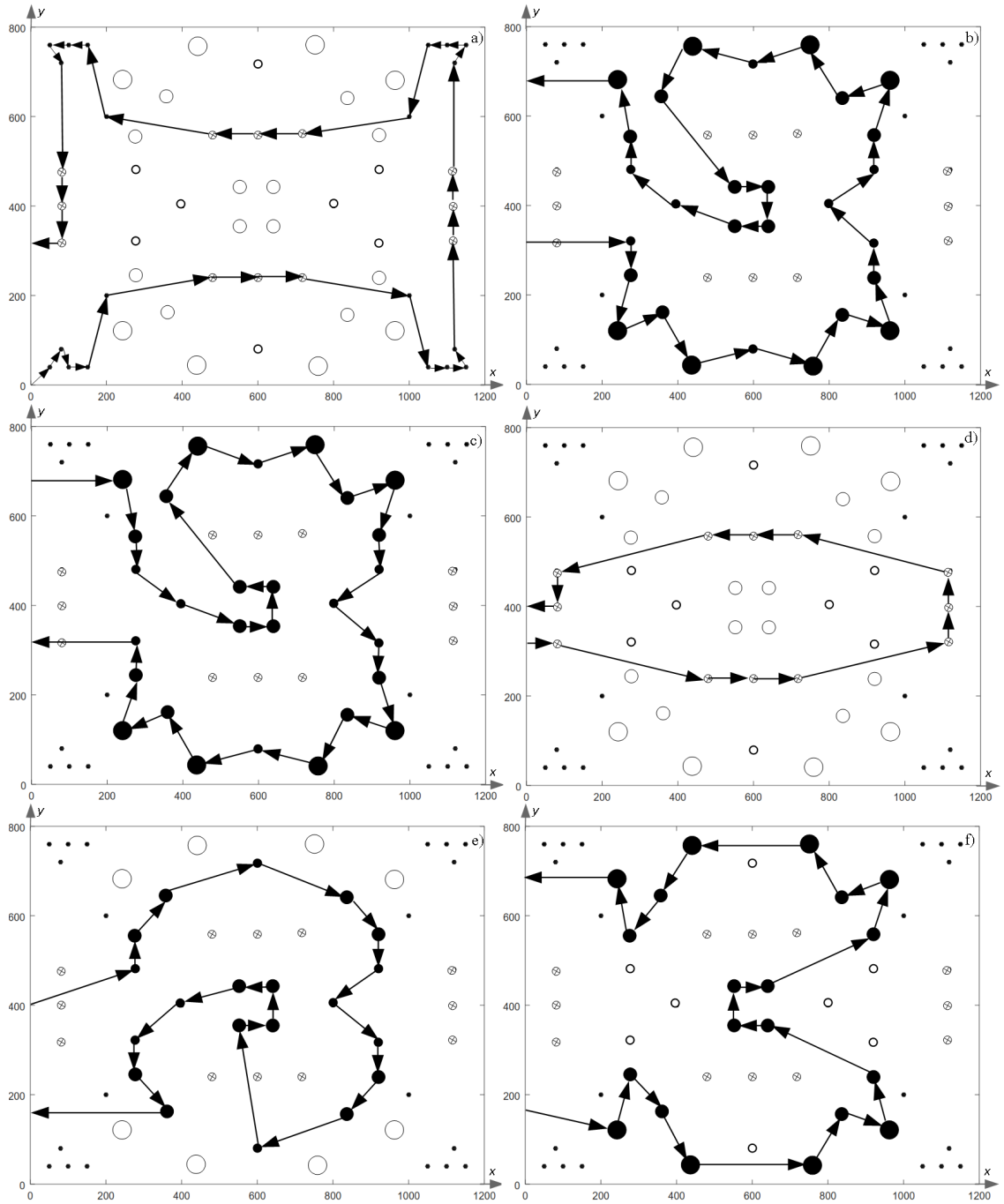
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.4 – Solução da heurística proposta para a instância TA-168 com distância de Manhattan - ferramentas 8, 7, 9 e 10.



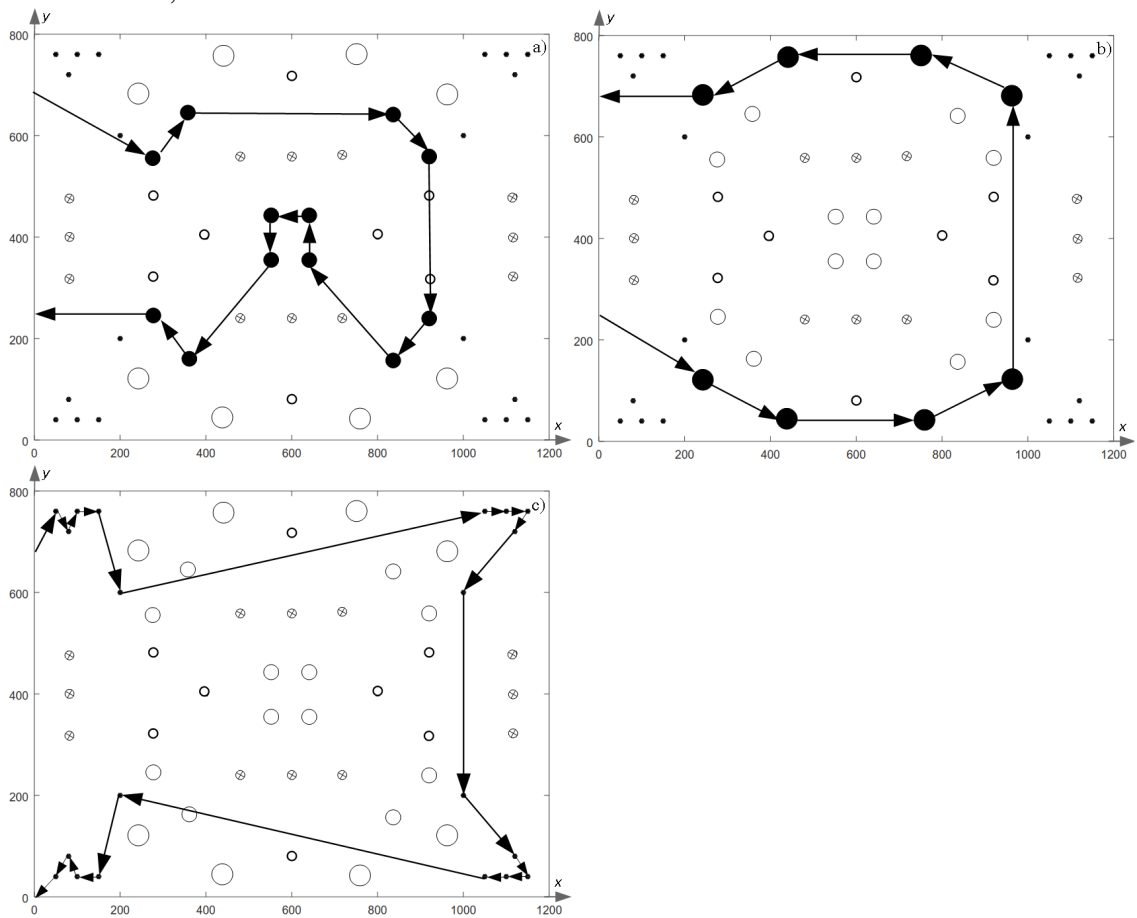
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.5 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância Euclidiana - ferramentas 1, 2, 3, 7, 4 e 5.



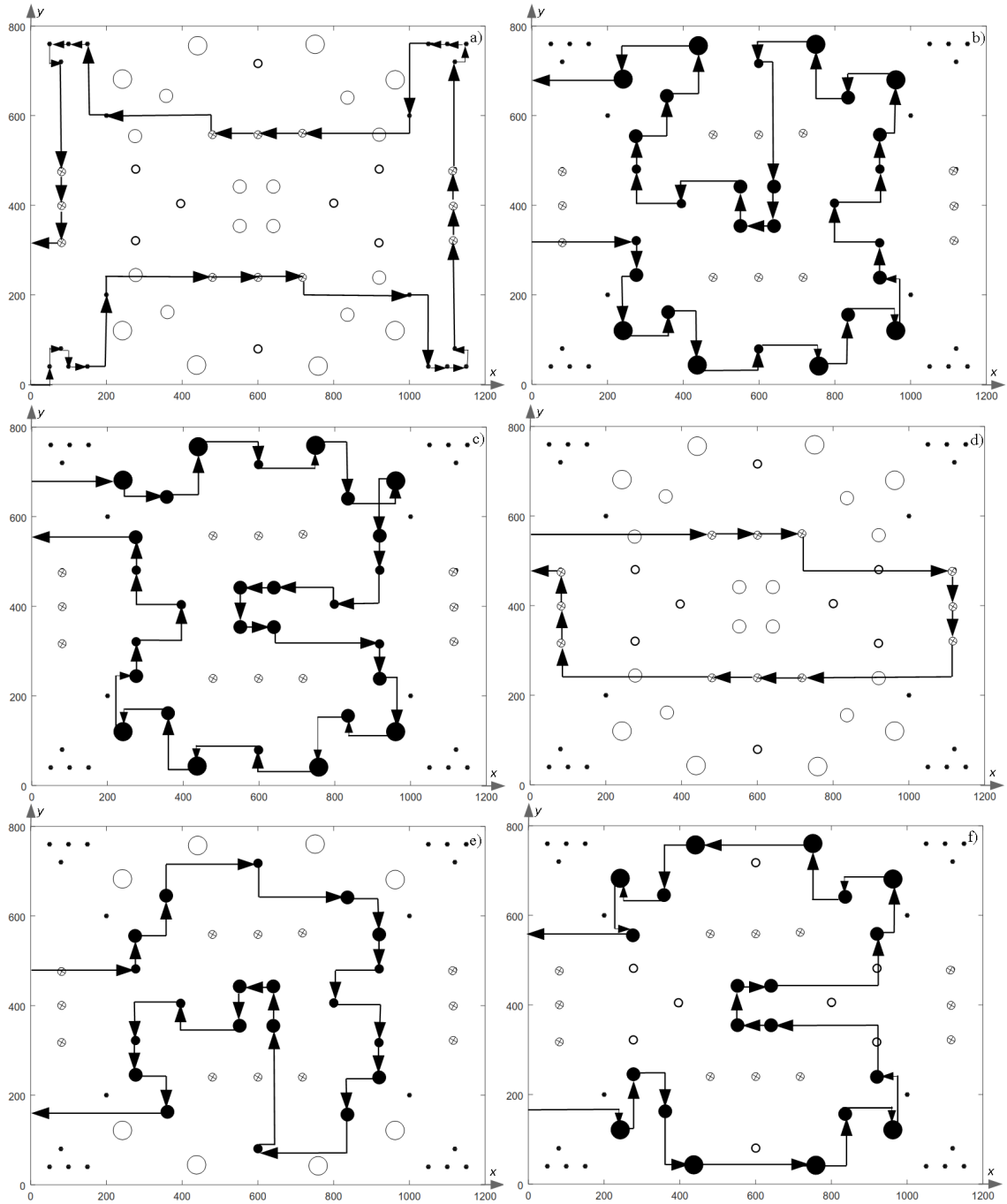
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.6 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância Euclidiana - ferramentas 8, 9 e 6.



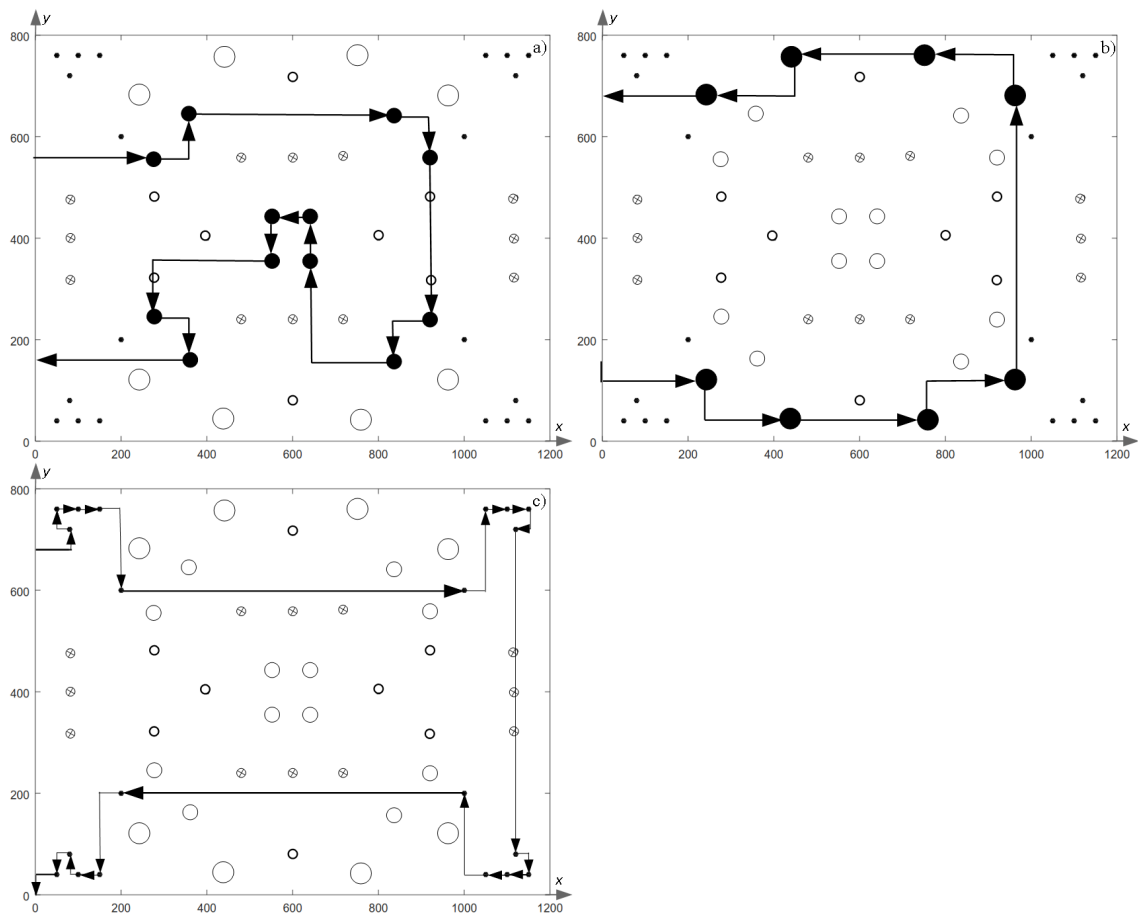
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.7 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância de Manhattan - ferramentas 1, 2, 3, 7, 4 e 5.



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura A.8 – Solução da heurística proposta para a instância TA-180 com distância de Manhattan - ferramentas 8, 9 e 6.



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

APÊNDICE B – Dados das instâncias propostas para o problema teste 1

Tabela B.1 – Coordenadas dos furos da instância TA-168.

Furo	Coordenada x	Coordenada y	Tipo
1	35	35	1
2	50	65	1
3	75	550	1
4	80	50	1
5	100	350	2
6	100	525	1
7	125	250	4
8	125	475	1
9	150	200	4
10	150	400	4
11	200	150	2
12	200	350	2
13	250	50	3
14	300	50	3
15	300	400	4
16	300	450	3
17	350	150	1
18	350	175	1
19	350	250	1
20	350	275	1
21	375	75	3
22	400	200	4
23	400	325	3
24	425	525	3
25	450	325	1
26	450	350	1
27	450	425	1
28	450	450	1
29	500	150	3
30	500	200	4
31	500	550	3
32	550	550	3
33	600	250	2
34	600	450	2
35	650	200	4
36	650	400	4
37	675	125	4
38	675	350	1
39	700	75	2
40	700	250	1
41	720	550	1
42	725	50	1
43	750	535	1
44	765	565	1

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela B.2 – Coordenadas dos furos da instância TA-180.

Furo	Coordenada x	Coordenada y	Tipo
1	50	40	1
2	50	760	1
3	80	80	1
4	80	320	3
5	80	400	3
6	80	480	3
7	80	720	1
8	100	40	1
9	100	760	1
10	150	40	1
11	150	760	1
12	200	200	1
13	200	600	1
14	240	120	5
15	240	680	5
16	280	240	4
17	280	320	2
18	280	480	2
19	280	560	4
20	360	160	4
21	360	640	4
22	400	400	2
23	440	40	5
24	440	760	5
25	480	240	3
26	480	560	3
27	560	360	4
28	560	440	4
29	600	80	2
30	600	240	3
31	600	560	3
32	600	720	2
33	640	360	4
34	640	440	4
35	720	240	3
36	720	560	3
37	760	40	5
38	760	760	5
39	800	400	2
40	840	160	4
41	840	640	4
42	920	240	4
43	920	320	2
44	920	480	2
45	920	560	2
46	960	120	5
47	960	680	5
48	1000	200	1
49	1000	600	1
50	1050	40	1
51	1050	760	1
52	1100	40	1
53	1100	760	1
54	1120	80	1
55	1120	320	3
56	1120	400	3
57	1120	480	3
58	1120	720	1
59	1150	40	1
60	1150	760	1

Fonte: elaborado pelo autor (2020).