

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas - ICEB
Departamento de Computação - DECOM

Algoritmos Heurísticos e Metaheurísticos para o Problema de Minimização de Pilhas Abertas

Bolsista: Júnior Rhis Lima

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Moreira de Carvalho – DECOM/UFOP

Nota: Relatório Semestral referente ao período de 01/08/2014 a 27/02/2015, apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto, como parte das exigências do programa de iniciação científica - PIBIC

Local: Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil

Data: 25 de fevereiro de 2015

Resumo

Problemas de corte são problemas combinatórios, encontrados em sua maioria em indústrias e outros sistemas produtivos, onde frequentemente surge o cenário da produção de itens menores a partir do processamento de itens maiores, envolvendo o corte, a estocagem, a preparação de máquinas, o atendimento de demandas específicas, a utilização de recursos e a minimização de desperdícios. Correlatos aos problemas de corte, os problemas de sequenciamento de padrões consistem na fase subsequente do processo produtivo e possuem influência direta das etapas anteriores. Tais problemas são caracterizados pela ordem em que os itens maiores são processados, envolvendo dentre outros, a manipulação, o transporte e também o atendimento de demandas específicas. Tais problemas possuem grande impacto financeiro no processo de produção e têm se tornado mais relevantes a cada dia, ganhando cada vez mais espaço no planejamento industrial em contextos em que metal, papel, vidro ou madeira são utilizados como matéria prima. O presente projeto de pesquisa propõe o desenvolvimento de abordagens heurísticas e metaheurísticas para o Problema de Minimização de Pilhas Abertas, um problema de sequenciamento de padrões de ampla aplicação prática.

Assinatura do orientador(a): _____
Nome Completo do orientador(a)

Assinatura do co-orientador(a): _____
Nome Completo do co-orientador(a)

Assinatura do bolsista: _____
Nome Completo do bolsista

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Descrição do Problema	2
2	Objetivos	5
2.1	Objetivos Específicos	5
3	Fundamentos Teóricos e Revisão	6
4	Materiais e Métodos	8
5	Resultados e Discussões	9
6	Conclusão	10

Capítulo 1

Introdução

Com a evolução e a disseminação da tecnologia, cada vez mais os setores industriais confiam o tratamento de questões operacionais a métodos computacionais, os quais têm sido aplicado com sucesso, contribuindo para a otimização de sistemas de produção.

Os problemas de corte são problemas de otimização combinatória, abordados frequentemente devido à sua aplicabilidade prática em contextos industriais. Entre os problemas de corte citam-se problemas de corte de estoque, carregamento de paletes e contêineres, alocação de tarefas e balanceamento de linhas de produção, entre outros. Estes problemas consistem em cortar unidades menores a partir de unidades maiores que possuem formas e medidas bem especificadas, satisfazendo-se algum objetivo, como por exemplo, minimizar as sobras das unidades maiores, dado que dificilmente aproveita-se o todo. As unidades maiores podem ser barras, bobinas, chapas e outros objetos feitos de papel, madeira, vidro ou metal, que devem ser cortados em peças menores.

A disposição de unidades menores (ou peças) dentro de unidades maiores para realização do corte define um plano (ou padrão) de corte. Geralmente em problemas de corte, as peças a serem cortadas possuem grande demanda, implicando no corte de vários objetos em estoque e na repetição de vários padrões de corte. A este tipo de problema denomina-se Problema de Corte de Estoque, onde o objetivo pode ser minimizar o número de unidades maiores (diminuindo assim as sobras ou desperdício) ou minimizar os custos dos objetos cortados. Os custos variam de acordo com os critérios de qualidade estabelecidos.

Após a definição dos padrões de corte (ou simplesmente padrões), passa-se à etapa do corte (ou processamento) dos mesmos. Porém, a ordem na qual os padrões são processados pode afetar a produtividade e os custos relacionados ao processo caso alguns critérios de qualidade sejam desrespeitados. Torna-se desejável então determinar o sequenciamento dos padrões a serem processados de acordo com tais critérios, definindo assim os problemas de sequenciamento de padrões.

Depois de produzida, cada peça é mantida em uma pilha ao redor da máquina que a produziu; cada pilha armazena somente peças de um mesmo tipo. Quando a última peça de um tipo for produzida, a respectiva pilha pode ser removida de perto da máquina que a 3 processou para outro local. Admite-se a existência de uma limitação física para o armazenamento de pilhas ao redor da máquina de produção, de tal forma que não haja espaço suficiente para que uma pilha para cada tipo de peça esteja aberta ao mesmo tempo. Sendo assim, deseja-se minimizar o número de pilhas abertas simultaneamente pelo sequenciamento dos padrões, caracterizando assim o Problema de Minimização de Pilhas Abertas.

1.1 Descrição do Problema

O Problema de Minimização de Pilhas Abertas (ou MOSP, de Minimization of Open Stacks Problem), como descrito por [11] remonta à um ambiente de produção em que peças com demandas específicas são produzidas por uma única máquina de corte. O processamento dos padrões de corte a partir das quais as peças são cortadas se dá em lotes, ou seja, todas as cópias de um mesmo padrão de corte devem ser cortadas antes que um padrão de corte diferente seja processado. A produção é dividida em estágios, e é considerado que em cada estágio um lote de um determinado padrão de corte diferente é processado. Durante a produção de um determinado tipo de peça, todas as suas cópias são armazenadas temporariamente em uma pilha mantida ao redor da máquina que as produziu; cada pilha armazena somente um único tipo de peça. Quando a primeira peça de um dado tipo tiver de ser produzida, a respectiva pilha é considerada aberta e este estado permanece até que a última peça do mesmo tipo seja produzida, quando então a pilha é considerada fechada, podendo ser removida para outro local para dar continuidade ao processo de produção.

A Figura 1 apresenta um exemplo de instância MOSP, em que são fornecidos dados sobre a composição dos padrões. Note que informações relativas à quantidade de peças de um mesmo tipo na composição de um dos padrões não são relevantes para este problema específico – esta, entre outras informações como limite máximo para a altura das pilhas e diferentes tempos de processamento para diferentes tipos de peças não são consideradas no MOSP. O conjunto de todos os tipos de peças é P , e os tipos de peças são enumerados de 1 a 6, representadas na vertical. O conjunto dos padrões de corte é S , e os padrões são enumerados de p_1 a p_6 , representados na horizontal. O símbolo \otimes indica que o padrão p_i contém a peça j . Espaços em branco indicam o contrário. Por exemplo, o padrão p_1 é composto pelas peças 1, 2 e 4, e o padrão p_2 é composto pelas peças 2, 4, 5 e 6.

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
1	\otimes			\otimes		\otimes
2	\otimes	\otimes				
3			\otimes	\otimes		
4	\otimes	\otimes	\otimes		\otimes	
5		\otimes		\otimes	\otimes	\otimes
6		\otimes				\otimes

Figura 1.1: Um exemplo de instância do MOSP

A Figura 2 apresenta dois possíveis sequenciamentos do conjunto S do exemplo anterior. Uma pilha é associada a cada peça, e também é representada na horizontal. Na vertical, são representados os estágios de produção, nos quais um lote de determinado padrão é processado. A notação é definida a seguir:

- O símbolo Δ indica a abertura de uma determinada pilha;
- O símbolo \square indica que uma peça do tipo j foi produzida a partir do padrão p_i ;
- O símbolo ∇ indica o fechamento de uma pilha;
- O símbolo $-$ indica que uma pilha permanece aberta, embora não esteja sendo produzida nenhuma cópia da peça correspondente naquele estágio de processamento, o que caracteriza uma descontinuidade em sua produção;
- As pilhas abertas são contabilizadas a cada estágio, na vertical, de modo que no referido sequenciamento (à esquerda na referida figura), no primeiro estágio, quando o padrão p_3 é processado, duas pilhas são abertas – referentes às peças 3 e 4. No segundo estágio, quando o padrão p_4 é processado, existem 4 pilhas abertas – referentes às peças 1, 3, 4 e 5. Note que apesar de a peça 4 não ser produzida a partir do padrão p_4 , sua pilha permanece aberta e por isto deve ser contabilizada. Note também que a pilha referente à peça 3 é fechada após o término deste segundo estágio e também é contabilizada na quantidade de pilhas abertas.

No primeiro sequenciamento 2(a), a lista que contém a ordenação dos padrões $L_{pa} = p_3, p_4, p_5, p_1, p_2, p_6$, o que indica que no primeiro estágio serão processadas as cópias do padrão p_3 , no segundo estágio serão processadas as cópias do padrão p_4 e assim sucessivamente até que no último estágio sejam processadas as cópias do padrão p_6 .

	p_3	p_4	p_5	p_1	p_2	p_6
1		Δ	$-$	\square	$-$	∇
2				Δ	∇	
3	Δ	∇				
4	Δ	$-$	\square	\square	∇	
5		Δ	\square	$-$	\square	∇
6					Δ	∇

(a)

	p_2	p_1	p_6	p_3	p_4	p_5
1		Δ	\square	$-$	∇	
2	Δ	∇				
3				Δ	∇	
4	Δ	\square	$-$	\square	$-$	∇
5	Δ	$-$	\square	$-$	\square	∇
6	Δ	$-$	∇			

(b)

Figura 1.2: Duas possíveis sequências para processamento de padrões.

Neste sequenciamento (à esquerda na referida figura), o número máximo de pilhas abertas é 5; no quinto estágio, após o processamento do padrão p_2 , as peças 2 e 4 terão suas pilhas fechadas (linha 2 e colunas 4-5 e linha 4 e colunas 1-5), mas o padrão p_2 também abre a pilha associada à peça 6 (linha 6 e colunas 4-5). O segundo sequenciamento (à direita na referida figura) apresenta uma solução com sequenciamento de padrões diferente, $L_{pa} = p_2, p_1, p_6, p_3, p_4, p_5$, e com número máximo de pilhas abertas igual a 5.

Neste problema, não é suficiente apenas gerar uma agenda de processamento associada ao conjunto S de padrões e consequente fabricação do conjunto P de peças de forma a atender as demandas; também, é necessário atingir a melhor utilização do espaço físico disponível,

agilizando a linha de produção. Admite-se a existência de uma limitação física para o armazenamento de pilhas ao redor da máquina de produção, de tal forma que não haja espaço suficiente para que as pilhas de cada tipo de peça estejam abertas simultaneamente. Sendo assim, pode ser necessária a remoção temporária de pilhas ainda não fechadas do ambiente de produção para que novas pilhas sejam abertas e as peças continuem sendo produzidas. Posteriormente, quando as peças referentes a estas pilhas removidas forem produzidas, as mesmas são trazidas de volta para o ambiente de produção, eventualmente devendo outras serem removidas para liberação do espaço necessário.

A remoção constante de pilhas abertas afeta o custo associado à produção das peças, exigindo a alocação de mão-de-obra, maquinário e tempo adicionais para o transporte e a administração das pilhas removidas temporariamente. Além disso, alguns tipos de peças são frágeis, como na indústria de vidro, em que o manuseio excessivo pode gerar outros prejuízos. É desejável então que as pilhas de peças sejam removidas uma única vez, depois de fechadas, para diminuir os custos relacionados à produção das peças.

Este é um problema NP-Difícil [4] e possui aplicações em diferentes áreas, bem como diferentes problemas de formulação equivalente [5]: Problema de Corte Modificado (*Modified Cutwidth*), Leiaute de Matrizes de Portas (*Gate Matrix Layout*), Dobradura de Arranjos Lógicos Programáveis (*Programmable Logic Array Folding*, ou *PLA Folding*), *Interval Thickness*, *Node Search Game*, *Edge Search Game*, *Narrowness*, *Split Bandwidth*, *Graph Pathwidth*, *Edge Separation* e *Vertex Separation*.

Capítulo 2

Objetivos

1. Elaborar heurísticas consistentes e robustas que possam ser utilizadas no contexto do problema abordado que permitam a obtenção rápida de soluções próximas da solução ótima sem que se perca a vantagem da busca sistemática – inicialmente considerando problemas específicos, mas com uma possibilidade de generalização;
2. Avaliar o comportamento heurístico de diferentes formulações para o problema abordado;
3. Pesquisar técnicas para melhoria fina de soluções (polishing) obtidas por heurísticas usando programação linear inteira;
4. Ampliar o conjunto de problemas testes com soluções ótimas já conhecidas através da execução de testes sistemáticos usando formulações já desenvolvidas;
5. Será buscada ainda a aplicação prática dos métodos desenvolvidos em contextos reais, a fim de que também seja constituído um avanço para as indústrias nacionais;
6. Além dos objetivos principais, outros produtos deste projeto de pesquisa serão trabalhos publicados em periódicos e eventos nacionais e internacionais, os quais contribuem para a promoção dos centros de pesquisas nacionais e também da tecnologia.

2.1 Objetivos Específicos

1. Propor um modelo de otimização que contemple apropriadamente as especificidades de diferentes aplicações do problema abordado com o uso dos modelos descritos na literatura;
2. Implementação computacional de um software para determinação de soluções de alta qualidade para o problema abordado usando ferramentas de Inteligência Computacional, o que inclui a utilização de métodos heurísticos e metaheurísticos;
3. Avaliação do software implementado considerando dados reais e também com problemas teste publicamente disponíveis;
4. Promover o Departamento de Computação e a Universidade Federal de Ouro Preto por meio da divulgação dos resultados obtidos neste projeto de pesquisa.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos e Revisão

O projeto visa elaborar algoritmos eficientes para um problema de grande importância prática na indústria, sendo relevante nas indústrias que realizam o processamento de matérias-primas tais como metal, madeira, vidro e papel para a fabricação de bens de consumo. O problema em questão é bastante genérico e modela com sucesso além de um grande conjunto de problemas de escalonamento.

O trabalho de (LINHARES; YANASSE, 2002) [4] apresenta diversos resultados teóricos sobre o MOSP. A complexidade do MOSP é provada NP-Difícil devido a equivalência com o *Problema de Largura de Corte Modificado em Grafos (Modified Cutwidth)*.

Visando diminuir o tamanho do problema, métodos de pré-processamento podem ser utilizados. Em (YANASSE; SENNE, 2010)[9], sete métodos de pré-processamento para o MOSP são discutidos, sendo que todos visam reduzir o tamanho dos problemas tratados por meio da decomposição desses problemas ou da eliminação de redundâncias - dados que podem ser desconsiderados ao se resolver o problema por não alterarem sua estrutura básica e, portanto, não interferir em sua solução. Estes métodos envolvem a análise de algumas propriedades do problema e também sua representação em *grafos* MOSP - nos quais os vértices correspondem às peças presentes em uma instância MOSP, sendo conectados os vértices presentes na composição de uma mesmo padrão de corte.

Devido a sua complexidade e equivalência com vários outros problemas, além da aplicação em manufatura, em 2005 o MOSP foi escolhido como tema do *First Constraint Modelling Challenge* (SMITH; GENT, 2005)[8]. O modelo vencedor do desafio foi o proposto por Banda e Stuckey (2007)[1].

Posteriormente, Chu e Stuckey (2009)[3] propuseram uma nova estratégia ao modelo utilizado por Banda e Stuckey (2007)[1]. Na nova estratégia as peças são sequenciadas primeiro e logo em seguida ocorre o sequenciamento dos padrões de acordo com a lista de peças formada. Dessa forma, os padrões não são sequenciados diretamente, ao contrário do método anterior. De acordo com os autores, esta estratégia é mais efetiva por fornecer dados que proporcionam um maior controle sobre a abertura e o fechamento das pilhas.

Os trabalhos pioneiros (YUEN, 1991; YUEN, 1995)[10] [11] contém as heurísticas mais difundidas para o tratamento do MOSP. Nestes trabalhos são apresentadas seis heurísticas rápidas e simples envolvendo pilhas abertas e padrões ainda não sequenciados. Entre estas heurísticas se encontra a *Yuen3*, considerada como a de melhor desempenho durante um período de tempo.

A *Heurística de Nó de Custo Mínimo* (BECCENERI; YANASSE; SOMA, 2004)[2] é considerada como a de melhor desempenho atualmente. Os experimentos comprovam a superioridade dessa heurística em relação a qualidade da solução quando comparada ao método *Yuen3*, que por sua vez, possui um custo computacional menor que o da *Heurística de Nó de Custo Mí-*

nimo. A heurística é baseada em grafos MOSP e consiste no sequenciamento das arestas. Cada vértice incidido pelas arestas é considerado *aberto* e o objetivo é sequenciar todas as arestas que incidem sobre tais vértices, evitando ao máximo que novos vértices sejam *abertos*. Os vértices a serem *abertos* são aqueles de menor grau entre os vértices ainda não visitados presentes no grafo MOSP. Os graus dos vértices são atualizados a cada aresta sequenciada, a fim de que se tenha o controle das pilhas que já foram abertas. Posteriormente, a sequência de padrões é obtida por meio do sequenciamento dos vértices, de tal forma que, assim que todos os vértices que representam as peças que compõem um determinado padrão forem *abertos*, tal padrão é sequenciado.

Face à importância do problema, o mesmo foi escolhido como tema de grupos de cooperação acadêmica internacional como o *SCOOP Project (Sheet Cutting and Process Optimization for Enterprises)* [7] e *OPTSICOM Project (Optimization of Complex Systems)* [6], que reúnem universidades da Alemanha, Espanha, Estados Unidos, Itália, México e Portugal, uma das mais importantes sociedades internacionais de praticantes das áreas de Pesquisa Operacional, Engenharia e Ciência da Administração.

A criação de novos modelos para solução do problema em questão pode ainda contribuir para melhoria da eficiência da indústria nacional de bens de consumo, amplamente discutida como insuficiente no cenário mundial.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

A metodologia que será aplicada no desenvolvimento deste projeto inclui as seguintes etapas:

1. Estudo dos principais métodos de resolução apresentados na literatura como de sucesso para a resolução do problema considerado e correlatos;
2. Revisão de literatura considerando heurísticas para o problema tratado e problemas correlatos;
3. Avaliação de técnicas de inteligência computacional promissoras que não foram ainda consideradas na literatura para o problema abordado;
4. Projeto e análise experimental de um algoritmo construtivo para o problema;
5. Projeto e análise experimental de um algoritmo de busca local para o problema;
6. Implementação da(s) técnica(s) consideradas mais promissoras para a resolução do problema;
7. Avaliação computacional das implementações utilizando as bases de dados do *SCOOP Project* [7], *OPTSICOM* [6], *Constraint Modelling Challenge* [8] e também bases de dados disponíveis na literatura ou dados reais de empresas nacionais;
8. Escrita de um relatório técnico;
9. Escrita de artigos científicos;
10. Documentação do software;

Capítulo 5

Resultados e Discussões

As etapas do cronograma referentes a primeira parte do projeto foram cumpridas, sendo realizado um estudo dos principais métodos de resolução do problema presentes na literatura. Foi realizado ainda uma revisão da literatura considerando heurísticas para o problema tratado e problemas correlatos.

Foram feitas avaliações de técnicas de inteligência computacional consideradas promissoras e ainda inexistentes na literatura para o problema abordado.

A fim de se verificar a eficiência das novas técnicas computacionais, foram realizados uma série de experimentos com os quais foi possível se verificar quais fatores influenciam na obtenção de melhores resultados para o problema tratado.

Capítulo 6

Conclusão

Nessa primeira etapa do projeto muito já foi feito, mas para que todos os objetivos sejam alcançados, ainda há muito trabalho pela frente.

Os resultados obtidos ainda deixam a desejar quando comparados a soluções ótimas já conhecidas, o que é justificável levando em consideração a dificuldade em se resolver problemas do tipo.

Na próxima etapa do projeto, novas soluções serão buscadas, a fim de que melhores resultados sejam encontrados e os objetivos enfim, possam ser alcançados.

Referências Bibliográficas

- [1] Banda, M. G. de la, Stuckey, P. J. Dynamic programming to minimize the maximum number of open stacks. 2007.
- [2] Becceneri, J.C., Yanasse, H. H., Soma, N. Y. A method for solving the minimization of the maximum number of open stacks problem within a cutting process. 2004.
- [3] Chu, G., Stuckey, P. G. Minimizing the maximum number of open stacks by customer search. 2009.
- [4] Linhares, A., Yanasse, H.H. Connections between cutting-pattern sequencing, VLSI design, and flexible machines. 2002.
- [5] Möhring, R. Graph problems related to gate matrix layout and PLA folding. 1990.
- [6] OPTSICOM Project, 2010. Optimization of Complex Systems. Disponível em: <http://www.optsicom.es/>. Acessado em 07 de Novembro de 2013.
- [7] SCOOP Team, 2009. *Sheet cutting and process optimization for furniture industry* - SCOOP Project. Disponível em: <http://www.scoop-project.net>. Acessado em 07 de Novembro de 2013.
- [8] Smith, B. M., Gent, I. P. (eds). Proceedings of IJCAI'05 — *Constraint Modelling Challenge*. 2005.
- [9] Yanasse, H. H., Senne, E. L. F. The minimization of open stacks problem: A review of some properties and their use in pre-processing operations. 2010.
- [10] Yuen, B. J. Heuristics for sequencing cutting patterns. 1991.
- [11] Yuen, B.J. Improved heuristics for sequencing cutting patterns. 1995.