

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

**Novos Algoritmos Heurísticos para o Problema de Minimização de Troca
de Ferramentas**

Bolsista: Gustavo Silva Paiva

Orientador: Marco Antonio Moreira de Carvalho – DECOM/UFOP

Nota: Relatório Parcial referente ao período de 01/03/2015 a dd/MM/AAAA, apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto, como parte das exigências do programa de iniciação científica -PIP

Local: Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil

Data: 22 de maio de 2015

Título do Resumo

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

Assinatura do bolsista: _____
Nome Completo do bolsista

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Introdução	1
1.2	Descrição do Problema	2
2	Objetivos	4
2.1	Objetivos Gerais	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3	Fundamentos Teóricos e Revisão	5
4	Materiais e Métodos	7
5	Resultados e Discussões	8
6	Conclusão	9

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

Atualmente, com a concorrência cada vez mais acirrada as empresas se vêem com a necessidade de flexibilizar, ainda mais, a sua produção visando otimizar a utilização dos recursos. Para isto o sistema de manufatura flexível (*Flexible Manufacturing System* – FMS) está sendo, comumente, adotado em muitas empresas que possuem uma ampla matriz de produtos. Este sistema é caracterizado por permitir uma maior flexibilidade no planejamento da produção, por exemplo, ao permitir uma rápida adequação à produção de um conjunto novo de produtos utilizando o maquinário já existente na linha de produção e também ao permitir uma rápida readequação da linha de produção frente a imprevistos.

Um tipo muito comum de FMS, principalmente em empresas metalúrgicas, é aquele que utiliza máquinas flexíveis. Uma máquina flexível é definida pela sua capacidade de efetuar diferentes tipos de operações sem que haja uma brusca troca entre uma operação e outra, tornando a produção mais dinâmica. Além disto, este tipo de máquina possui um compartimento de capacidade fixa em que *ferramentas* são carregadas. Cada produto requer que um conjunto de ferramentas (e.g., lâminas de corte, brocas de perfuração, etc) específico seja carregado na máquina flexível para sua produção. O compartimento de ferramentas, geralmente é suficiente para armazenar todas as ferramentas necessárias para fabricação dos produtos isoladamente, porém, não é suficiente para armazenar todas as ferramentas existentes simultaneamente.

A utilização do FMS fornece um grande mecanismo para diversificação da produção, entretanto, a operacionalização de um FMS é também influenciada por outros fatores, principalmente, o planejamento da produção e o escalonamento das ferramentas em máquinas flexíveis. Com a diversificação concedida pelo FMS é possível a manufatura de diferentes tipos de produtos, que por sua vez podem requerer diferentes tipos de ferramentas. Como o compartimento de ferramentas é limitado e os diversos produtos podem requerer diferentes conjuntos de ferramentas, ao se produzir diferentes produtos em sequência, eventualmente serão necessárias trocas de ferramentas para dar continuidade à produção. Estas trocas de ferramentas implicam na interrupção da linha de produção, pois a máquina deverá ser desligada para que receba a nova configuração de ferramentas. A interrupção da linha de produção aumenta o custo da produção e é desejável, portanto, que seja realizada o menor número de vezes possível.

A partir de uma demanda por produtos, predeterminada, é necessário a criação de um plano de produção para que uma máquina cumpra esta demanda. Este plano é dividido em *tarefas* e tem como objetivo a minimização do tempo ocioso da máquina de produção, de forma a maximizar a produtividade e diminuir os custos relacionados.

O plano de produção consiste em:

1. Determinar a ordem em que as tarefas serão executadas; e
2. Decidir quando realizar cada troca de ferramentas e quais ferramentas serão trocadas, de maneira a viabilizar a produção.

O *Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas* é definido como o problema de determinar o melhor plano de produção possível, gerando a sequência em que as tarefas devem ser executadas de forma a minimizar o número de trocas de ferramentas necessário durante o processo de produção.

1.2 Descrição do Problema

Em um sistema de manufatura flexível, existem tarefas que devem ser realizadas por uma máquina que possui um compartimento limitado de ferramentas. Um plano de produção determina como estas tarefas devem ser sequenciadas na linha de produção. Cada tarefa requer um conjunto de diferentes ferramentas para que seja realizada.

Para executar diferentes tarefas em sequência em uma mesma linha de produção, tornam-se obrigatórias as trocas de ferramentas quando o número total de ferramentas necessárias para realizar as tarefas for maior do que a capacidade do respectivo compartimento – o que é o caso comum. A quantidade destas trocas deve ser minimizada de forma a aumentar a produtividade pela diminuição das interrupções na linha de produção e consequentemente o tempo ocioso da máquina de produção.

O Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (*Minimization of Tool Switch Problem* – MTSP) consiste em determinar uma sequência de tarefas, que serão executadas minimizando o número de trocas de ferramentas.

Existem diferentes versões do MTSP apresentadas na literatura. O caso geral do MTSP considera que os tamanhos das ferramentas são uniformes (logo a localização das mesmas no compartimento é irrelevante) e que os custos de troca de ferramentas também são uniformes (isto é, o custo para trocas de ferramentas é o mesmo). Já na versão do MTSP que considera ferramentas de tamanho não uniformes, a localização destas ferramentas é relevante, pois uma ferramenta pode ocupar um espaço proporcional a duas ou mais ferramentas no compartimento, restringindo a utilização do mesmo. Versões mais recentes do problema consideram um ambiente dinâmico (*on-line*) para MTSP, no qual não se sabe *a priori* todas as tarefas que deverão ser realizadas: as demandas por produtos são conhecidas somente após o término da produção.

Como demonstrado por [Tang and Denardo \(1988\)](#), o MTSP pode ser classificado em dois casos:

1. O problema de carregamento das ferramentas, no qual deve ser determinado o número mínimo de trocas de ferramentas, a partir de uma sequência fixa de tarefas;
2. O problema de sequenciamento de tarefas, no qual deve ser determinado a sequência que possui o menor número de trocas de ferramentas.

Trataremos o problema de sequenciamento de tarefas como sendo o problema principal do MTSP, pois o problema de carregamento é simples e pode ser resolvido em tempo determinístico polinomial pelo algoritmo KTNS (*Keep Tool Needed Soonest*), vide [Tang and Denardo \(1988\)](#).

Uma instância do MTSP pode ser descrita pelos seguintes dados: o conjunto de tarefas que devem ser realizadas $T = \{1, \dots, N\}$, o conjunto de ferramentas disponíveis $F = \{1, \dots, M\}$, o conjunto de ferramentas T_j necessárias para executar a tarefa $j \in T$ e a capacidade C do compartimento de ferramentas da máquina.

Uma solução do MTSP é representada pela permutação T_ϕ do conjunto T e também de um plano de trocas de ferramentas. O plano e o número de trocas de ferramentas de T_ϕ podem ser determinados pelo algoritmo KTNS, como observado anteriormente.

A Tabela 1 apresenta um exemplo numérico de uma instância do MTSP. A primeira linha representa as tarefas (enumeradas de 1 a 5) e sua ordem de execução. Em seguida, as próximas linhas apresentam as ferramentas necessárias para realizar a tarefa da respectiva coluna. Por fim a última linha apresenta a capacidade do compartimento de ferramentas da máquina.

Tabela 1: Exemplo de uma instância do MTSP.

Tarefas	1	2	3	4	5
Ferramentas	1	1	3	2	1
	2	3	4	3	4
	4	5	7	5	6
	7			6	
Capacidade do compartimento = 4					

Uma solução da instância apresentada na Tabela 1 é apresentada na Tabela 2. A sequência de tarefas realizadas nesta solução é $T_\phi = \{5, 1, 4, 2, 3\}$. As ferramentas sublinhadas não são necessárias para executar a tarefa da respectiva coluna, mas foram mantidas no compartimento para que, eventualmente, minimizem o número de trocas para execução de uma tarefa subsequente. Para execução desta solução são necessárias 11 trocas de ferramentas sendo estas: quatro trocas para inserção das ferramentas iniciais na máquina (ferramentas 1, 2, 4 e 6), uma troca

na transição entre as tarefas 5 e 1 (ferramenta 6 pela ferramenta 7), três trocas na transição entre as tarefas 1 e 4 (ferramentas 1, 4 e 7 pelas ferramentas 3, 5 e 6), uma troca na transição entre as tarefas 4 e 2 (ferramenta 2 pela ferramenta 1) e outras duas trocas na transição entre as tarefas 2 e 3 (ferramentas 5 e 6 pelas ferramentas 4 e 7).

Tabela 2: Exemplo de uma solução do MTSP.

Tarefas	5	1	4	2	3
Ferramentas	1	1	2	1	<u>1</u>
	<u>2</u>	2	3	3	3
	4	4	5	5	4
	6	7	6	<u>6</u>	7
Capacidade da Compartimento = 4					

A Tabela 3 apresenta a solução ótima para a instância apresentada na Tabela 1. A sequência de tarefas nesta solução é $T_{\phi}^* = \{1, 3, 5, 2, 4\}$, exigindo 8 trocas de ferramentas para que seja executada, sendo estas: quatro trocas para inserção das ferramentas iniciais na máquina (ferramentas 1, 2, 4 e 7), uma troca na transição entre as tarefas 1 e 3 (ferramenta 2 pela ferramenta 3), uma troca na transição entre as tarefas 3 e 5 (ferramenta 7 pela ferramenta 6), uma troca na transição entre as tarefas 5 e 2 (ferramenta 4 pela ferramenta 5) e uma última troca na transição entre as tarefas 2 e 4 (ferramenta 1 pela ferramenta 2).

Tabela 3: A solução ótima da instância da Tabela 1 MTSP.

Tarefas	1	3	5	2	4
Ferramentas	1	<u>1</u>	1	1	2
	2	3	3	3	3
	4	4	<u>4</u>	5	5
	7	7	6	<u>6</u>	6
Capacidade da Compartimento = 4					

Através de estudos, foi constatado que empresas que utilizam FMS possuem planos de produção que podem ser melhorados, logo, trabalhos realizados sobre o MTSP possuem grandes aplicabilidades práticas, desde metalúrgicas até fabricantes de aeronaves. O MTSP foi caracterizado NP-Difícil por [Crama et al. \(1994\)](#).

Na eletrônica é possível observar que a utilização de métodos de montagem de placas de circuitos impressos (*Printed Circuit Board* – PCB) pode caracterizar um caso do MTSP. Um dos métodos mais utilizados é o método de Tecnologia de Montagem Superficial (*Surface Mount Technology* – SMT). O SMT possibilita a utilização de sistemas de manufatura mais robustos para a montagem de PCBs, como por exemplo o FMS. Neste cenário, deseja-se montar PCBs inserindo componentes eletrônicos nos mesmos. É possível fazer uma analogia da montagem dos PCBs como sendo as tarefas que devem ser realizadas e os componentes eletrônicos como sendo as ferramentas necessárias para execução das tarefas.

Uma máquina flexível seria capaz de executar métodos de montagem de PCBs da seguinte forma: ao invés de ferramentas esta máquina comportaria alimentadores de diferentes componentes eletrônicos, assim sendo possível a fixação destes em um PCB. Logo, o MTSP pode ser aplicado também para otimizar a montagem de PCBs, demonstrando uma das aplicações industriais deste problema.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

1. Elaborar heurísticas consistentes e robustas que possam ser utilizadas no contexto de problemas de minimização de trocas de ferramentas 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 problemas de sequenciamento;
3. Pesquisar técnicas para melhoria de soluções 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. Buscar 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.

2.2 Objetivos Específicos

1. Propor um modelo de otimização que contemple apropriadamente as especificidades de diferentes aplicações do problema com o uso dos modelos descritos na literatura;
2. Implementação computacional de um *software* para determinação do número mínimo de troca de ferramentas usando ferramentas de Engenharia de Produção e Inteligência Computacional, o que inclui a utilização de métodos heurísticos e meta-heurísticos;
3. Avaliação do *software* implementado considerando dados reais e também com problemas teste publicamente disponíveis;

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos e Revisão

Serão tratados, nesta seção, os trabalhos mais relevantes referentes ao problema de Minimização de Trocas de Ferramentas.

Tang and Denardo (1988) apresentaram uma política ótima que minimiza o número total de trocas de ferramentas dada uma sequência de tarefas fixa, denominada KTNS (*Keep Tools Needed Soonest*). Caso sejam necessárias trocas de ferramentas, essa política será responsável por manter na máquina, as ferramentas que serão utilizadas mais cedo dentre as próximas tarefas da sequência.

Crama et al. (1994) mostrou uma prova formal de que o problema é NP-Difícil quando $C \geq 2$. Foi proposta a heurística gulosa MSG (*Multiple Start Greedy*) que verifica, a cada iteração, a melhor tarefa a ser adicionada em uma sequência inicialmente vazia. Também foi proposta, uma formulação do MTSP baseada na formulação do problema do caixeiro-viajante, de forma a ser possível a utilização das heurísticas desse clássico problema, já bastante estudado. Com essa mesma idéia, Hertz et al. (1998) propuseram diferentes métricas para calcular os pesos das arestas na mesma formulação de Crama et al. (1994). Também foi adaptada uma função objetivo, para que as heurísticas desenvolvidas originalmente para o problema do caixeiro-viajante se adequassem ao MTSP.

Matzliach and Tzur (1998) estudaram o MTSP com ferramentas de tamanho não uniforme em um ambiente dinâmico. Foram desenvolvidas três heurísticas para este problema, utilizando o conceito da política LRU (*Least Recently Used*) do problema de paginação de memória em computadores. Assim, essas heurísticas tentam manter na máquina as ferramentas que foram recentemente utilizadas. Uma dessas heurísticas considera também, a mudança de hábitos na demanda dos produtos, isto é, uma mudança da frequência em que um produto é demandado, adaptando-se a um ambiente mais realístico.

Shirazi and Frizelle (2001) fizeram uma comparação entre as heurísticas de Crama et al. (1994) e outras heurísticas da literatura em instâncias reais de indústrias. Percebeu-se que os métodos utilizados na prática, poderiam ser melhorados pelas heurísticas descritas anteriormente. Também foi observado que as instâncias reais são mais fáceis do que as instâncias geradas pela literatura, pois existem ferramentas que são utilizadas por grande parte da linha de produção e as máquinas, geralmente, possuem um compartimento de ferramenta com capacidade superior do que as necessárias.

Para o MTSP com máquinas idênticas que operam paralelamente, Fathi and Barnette (2002) utilizaram buscas locais e a heurística do problema de escalonamento de tarefas em máquinas paralelas *List-Processing heuristic*, que consiste na criação de uma lista de tarefas que são executadas assim que uma máquina se torna disponível.

Al-Fawzan and Al-Sultan (2003) desenvolveram uma busca tabu com memórias de curto e de longo prazo e com a utilização de mecanismos estratégicos e probabilísticos para a análise do espaço de soluções. Laporte et al. (2004) propuseram um modelo de programação linear inteira. Para resolver este modelo, foi implementado um algoritmo *branch-and-cut*. Foi também apresentado um esquema *branch-and-bound* que consegue resolver instâncias pequenas, com até 25 tarefas e 25 ferramentas.

Zhou et al. (2004) apresentaram uma aplicação da metaheurística *beam-search*, baseada em um novo esquema *branch-and-bound*, limitando o número de nós que serão explorados em cada nível da árvore de busca. (Resultados)

Crama and Talloen (2007) revisitaram o MTSP, mostrando que quando se considera ferramentas de tamanho não uniforme, especificamente com uma sequência fixa de tarefas, o problema se mantém NP-Difícil pela redução deste ao problema de *3-Partition*. No entanto, com um valor fixo de C , é possível a resolução desse problema em tempo determinístico polinomial, porém, a um alto custo exponencial.

Amaya et al. (2008), pela primeira vez, utilizaram algoritmos meméticos para abordar o MTSP. Foram apresentados uma busca local, um algoritmo genético e um algoritmo memético, sendo o último obtido pelo aprimoramento de um algoritmo genético com uma busca local. Essas metaheurísticas, principalmente o algoritmo

memético, atingiram resultados convincentes obtendo um número de trocas menor comparado com o *beam-search* de Zhou et al. (2004).

Yanasse et al. (2009) propôs um algoritmo *branch-and-bound*. Apesar de mostrar resultados mais satisfatórios do que o *branch-and-bound* de Laporte et al. (2004) para instâncias onde o mesmo falhava, esse novo algoritmo não foi capaz de resolver outros casos e não foi possível solucionar instâncias com 25 tarefas e 15, 20 e 25 ferramentas. Senne et al. (2009) apresentaram metaheurísticas *beam-search* baseadas no algoritmo de *branch-and-bound*. O resultado dessas podem ser utilizados como limitante superior para acelerar métodos exatos reduzindo o espaço de busca.

Amaya et al. (2011) abordou o problema novamente com a ideia de algoritmos meméticos cooperativos formando uma cadeia de agentes meméticos que se comunicam entre si por meio de topologias famosas de redes: Anel, *Broadcast* e Aleatório. Estes novos algoritmos meméticos obtiveram resultados superiores quando comparados com os algoritmos propostos por Amaya et al. (2008) e, conseqüentemente, por Zhou et al. (2004).

Chaves et al. (2012) propôs uma heurística de duas fases: uma fase de criação, onde é gerada uma solução viável, e outra de aprimoramento, no intuito de encontrar o máximo local da solução gerada anteriormente. A solução obtida por essa heurística foi utilizada como limitante superior no algoritmo *branch-and-bound* de Yanasse et al. (2009), diminuindo em alguns casos até 70% o tempo de execução e número de nós examinados. O número de exemplares solucionados por esse algoritmo também aumentou de 109 para 189 dos 260 exemplares testados.

Amaya et al. (2013) aprimorou seus algoritmos meméticos com a técnica de *Cross-Entropy*, uma abordagem de Monte Carlo para problemas de otimização combinatória, melhorando ainda mais os resultados obtidos por Amaya et al. (2011), mostrando que a utilização de metaheurísticas é uma opção viável para a solucionar o MTSP.

Novamente o MTSP com ferramentas não uniformes foi estudado, desta vez por Marvizadeh and Choobineh (2013) que formularam um modelo de programação inteira. Além disso, foram apresentadas três heurísticas: duas de fusão de conjuntos, com o objetivo de unir conjuntos de tarefas que podem ser executadas sem que haja trocas de ferramentas entre elas, e também um algoritmo genético. Pode-se perceber que para pequenas instâncias a distância entre a solução gerada pela heurísticas e a solução ótima é pequena e também foi observado que o algoritmo genético proposto obteve os melhores resultados para instâncias de indústrias reais, em um tempo aceitável.

Recentemente, Catanzaro et al. (2015) apresentaram uma revisão dos modelos de programação inteira para o MTSP destacando características de cada modelo no intuito de melhorá-los. Foram então desenvolvidos dois novos modelos que possuem um relaxamento linear melhor do que todos os anteriores.

Raduly-Baka and Nevalainen (2015) apresentaram o MTSP modular, no qual existem módulos que suportam mais do que uma ferramenta e podem ser trocados com custo unitário. Além disto foi provado que o MTSP modular também é NP-Difícil.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Nesta primeira etapa do projeto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura a respeito do problema tratado e também dos problemas relacionados, conforme descrito no capítulo anterior. Todos os trabalhos foram classificados de acordo com o problema tratado, abordagem e data. Desta forma, foi traçado um panorama acurado do estado da arte da pesquisa relacionada ao problema tratado.

Ainda, foram coletadas instâncias e geradores de instâncias adotados pela comunidade acadêmica para o problema tratado, recursos estes que serão utilizados em fases subsequentes do projeto.

O material gerado durante o período aqui relatado será utilizado para desenvolver uma ferramenta para a solução aproximada do Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas. Esse *software* irá incorporar as tecnologias estado-da-arte em otimização para a resolução de um modelo construído com base em experiências encontradas na literatura e eventualmente em estudos em empresas que estabeleçam um convênio com a universidade. Os métodos desenvolvidos permitirão que a produção com máquinas flexíveis seja mais eficiente, gerando melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e menor custo associado.

Após a validação dos resultados obtidos, será realizada uma avaliação crítica a respeito do trabalho desenvolvido, abrangendo todas as estruturas e estratégias de solução empregadas, a fim de analisar o desempenho individual de cada uma.

Os resultados obtidos pelos métodos propostos serão comparados com resultados obtidos por métodos que compõem o estado da arte em relação a cada problema específico. Na comparação, serão analisados e discutidos a relação entre o desempenho dos métodos propostos e as propriedades de cada solução obtida.

Os algoritmos e programas desenvolvidos serão documentados de forma apropriada e as propostas e resultados experimentais serão divulgados para a comunidade científica.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

O cronograma do projeto foi cumprido rigorosamente. Conforme apresentado no Capítulo 3, uma revisão sistemática da literatura foi realizada.

Um relatório técnico foi gerado e será aproveitado em futuras publicações relacionadas ao tema ao longo da execução do projeto.

falar de implementações preliminares e análise experimental, incluindo métodos da literatura...

Os produtos futuros deste projeto de pesquisa serão também avaliados por pares (comitês científicos e corpos editoriais) na forma de artigos submetidos para periódicos nacionais e internacionais. Um artigo científico será submetido para uma revista indexada com reconhecida relevância na área e também será submetido ao prêmio de iniciação científica promovido pela Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. Como resultados adicionais esperados temos a participação em congressos e conferências onde os temas pesquisados serão discutidos com a comunidade científica.

Capítulo 6

Conclusão

Este relatório parcial de iniciação científica relatou o trabalho de pesquisa realizado durante quatro meses de duração de parte de um projeto. O cronograma do projeto foi cumprido rigorosamente, sendo gerada toda a base conceitual para as etapas seguintes. Um relatório técnico foi gerado e será aproveitado em futuras publicações relacionadas ao tema ao longo da execução do projeto.

Referências Bibliográficas

- M. A. Al-Fawzan and K. S. Al-Sultan. A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *Computers & Industrial Engineering*, 44(1):35–47, January 2003. ISSN 0360-8352. doi: 10.1016/S0360-8352(02)00183-3. WOS:000179686800003.
- Jhon Edgar Amaya, Carlos Cotta, and Antonio J. Fernández. A Memetic Algorithm for the Tool Switching Problem. In María J. Blesa, Christian Blum, Carlos Cotta, Antonio J. Fernández, José E. Gallardo, Andrea Roli, and Michael Sampels, editors, *Hybrid Metaheuristics*, number 5296 in Lecture Notes in Computer Science, pages 190–202. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-88438-5, 978-3-540-88439-2. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88439-2_14.
- Jhon Edgar Amaya, Carlos Cotta, and Antonio J. Fernández-Leiva. Memetic cooperative models for the tool switching problem. *Memetic Computing*, 3(3):199–216, June 2011. ISSN 1865-9284, 1865-9292. doi: 10.1007/s12293-011-0059-6. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s12293-011-0059-6>.
- Jhon Edgar Amaya, Carlos Cotta, and Antonio J. Fernández-Leiva. Cross entropy-based memetic algorithms: An application study over the tool switching problem. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 6(3):559–584, May 2013. ISSN 1875-6891. doi: 10.1080/18756891.2013.792542. URL <http://dx.doi.org/10.1080/18756891.2013.792542>.
- Daniele Catanzaro, Luis Gouveia, and Martine Labbé. Improved integer linear programming formulations for the job Sequencing and tool Switching Problem. *European Journal of Operational Research*, 2015. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.02.018. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715001198>.
- Antônio Augusto Chaves, Horacio Hideki Yanasse, and Edson Luiz França Senne. Uma nova heurística para o problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 19(1):17–30, 2012. ISSN 0104-530X. doi: 10.1590/S0104-530X2012000100002. SCIELO:S0104-530X2012000100002.
- Yves Crama and Ellen Talloen. The Tool Switching Problem Revisited. *European Journal of Operational Research*, 2007.
- Yves Crama, Antoon W. J. Kolen, Alwin G. Oerlemans, and Frits C. R. Spieksma. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 6(1):33–54, January 1994. ISSN 0920-6299, 1572-9370. doi: 10.1007/BF01324874. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/BF01324874>.
- Y. Fathi and K. W. Barnette. Heuristic procedures for the parallel machine problem with tool switches. *International Journal of Production Research*, 40(1):151–164, January 2002. ISSN 0020-7543. doi: 10.1080/00207540110076115. URL <http://dx.doi.org/10.1080/00207540110076115>.
- Alain Hertz, Gilbert Laporte, Michel Mittaz, and Kathryn E. Stecké. Heuristics for minimizing tool switches when scheduling part types on a flexible machine. *IIE Transactions*, 30(8):689–694, August 1998. ISSN 0740-817X. doi: 10.1080/07408179808966514. URL <http://dx.doi.org/10.1080/07408179808966514>.
- G. Laporte, J. J. Salazar-Gonzalez, and F. Semet. Exact algorithms for the job sequencing and tool switching problem. *Iie Transactions*, 36(1):37–45, January 2004. ISSN 0740-817X. doi: 10.1080/07408170490257871. WOS:000220824200005.
- S. Zamiri Marvizadeh and F. F. Choobineh. Reducing the number of setups for CNC punch presses. *Omega*, 41(2):226–235, April 2013. ISSN 0305-0483. doi: 10.1016/j.omega.2012.06.001. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048312000965>.

- B. Matzliach and M. Tzur. The online tool switching problem with non-uniform tool size. *International Journal of Production Research*, 36(12):3407–3420, December 1998. ISSN 0020-7543. doi: 10.1080/002075498192120. WOS:000077598600009.
- Csaba Raduly-Baka and Olli S. Nevalainen. The modular tool switching problem. *European Journal of Operational Research*, 242(1):100–106, April 2015. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2014.09.052. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714007917>.
- Edson Luiz França [UNESP Senne, Horacio Hideki Yanasse, M. Jha, C. Long, N. Mastorakis, and C. A. Bulucea. Beam Search Algorithms for Minimizing Tool Switches on a Flexible Manufacturing System. *Proceedings of The 11th Wseas International Conference on Mathematical and Computational Methods In Science and Engineering (macmese '09)*, pages 68–72, January 2009. URL <http://base.repositorio.unesp.br/handle/11449/9362>.
- R. Shirazi and G. D. M. Frizelle. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine: an empirical study. *International Journal of Production Research*, 39(15):3547–3560, October 2001. ISSN 0020-7543. doi: 10.1080/00207540110060888. WOS:000171519700014.
- Christopher S. Tang and Eric V. Denardo. Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part I: Minimization of the Number of Tool Switches. *Operations Research*, 36(5):767–777, October 1988. ISSN 0030-364X. doi: 10.1287/opre.36.5.767. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.36.5.767>.
- Horacio Hideki Yanasse, Rita de Cássia Meneses Rodrigues, and Edson Luiz França Senne. Um algoritmo enumerativo baseado em ordenamento parcial para resolução do problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 16(3):370–381, 2009. ISSN 0104-530X. doi: 10.1590/S0104-530X2009000300005. SCIELO:S0104-530X2009000300005.
- Bing-Hai Zhou, Li-Feng Xi, and Yong-Shang Cao. A beam-search-based algorithm for the tool switching problem on a flexible machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10): 876–882, February 2004. ISSN 0268-3768, 1433-3015. doi: 10.1007/s00170-003-1925-2. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-003-1925-2>.