Método de Solução para o Problema de Dimensionamento de Lotes com Máquinas Paralelas Flexíveis

Diego Jacinto Fiorotto
Universidade Estadual de Campinas - UNCAMP/FCA
R. Pedro Zaccaria, 1300, Limeira - SP, 13484-350
diego.fiorotto@fca.unicamp.br

Melka C. F. CATELAN
Departamento de Matemática Aplicada, IBILCE, Universidade Estadual Paulista
R. Cristóvão Colombo, 2265, 15054-000, São José do Rio Preto, SP, Brasil
melka_cfc@hotmail.com

Silvio Alexandre de Araujo
Departamento de Matemática Aplicada, IBILCE, Universidade Estadual Paulista
R. Cristóvão Colombo, 2265, 15054-000, São José do Rio Preto, SP, Brasil
silvio.araujo@unesp.br

RESUMO

Este trabalho trata do problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas flexíveis, que consiste basicamente em determinar a quantidade de itens a serem produzidos, em cada uma das máquinas, em um horizonte de tempo finito, satisfazendo uma demanda pré-estabelecida. No problema padrão, cada item pode ser produzido em qualquer uma das máquinas, ou seja, têm-se a flexibilidade total de máquinas. No entanto, nem sempre é viável ter flexibilidade total das máquinas, devido aos altos custos relacionados. Portanto, pode ser interessante implementar apenas uma flexibilidade limitada. Neste trabalho propõe-se um método de solução heurístico para o problema, com intuito de buscar boas soluções em baixos tempos computacionais. A heurística foi comparada com a resolução do modelo via pacote de otimização e observou-se que conforme o número de itens e de máquinas foram aumentando, os resultados obtidos foram melhores.

PALAVRAS CHAVE. Problema de dimensionamento de lotes, Flexibilidade de máquinas, Métodos de solução.

Tópicos (OC - Otimização Combinatória, PO na industria e PM - Programação Matemática)

ABSTRACT

This work is related to the lot sizing problem with flexible parallel machines, which basically consists in determining the quantity of items to be produced, on each of the machines, in a finite time horizon, satisfying a given demand. In the standard problem, each item can be produced on any of the machines, i.e., we have the total machine flexibility. However, it is not always feasible to have total machine flexibility due to the costs. Therefore, it may be interesting to implement only a limited amount of flexibility. In this work we have proposed a heuristic solution method for this problem, in order to find good solutions in low computational times. The heuristic was compared to the results obtained with the resolution of the model via optimization package and we have seen that by increasing the number of items and machines, the results improve.

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

KEYWORDS. Lot sizing. Machine flexibility. Solution methods.

Paper topics (OC - Combinatorial optimization, PO in Industry and PM - Mathematical Programming

1. Introdução

Decisões sobre o processo de produção ao longo de um horizonte de planejamento foi o impulso gerador dos estudos sobre dimensionamento de lotes, que consiste basicamente em determinar a quantidade de itens a serem produzidos, em cada período de um horizonte de tempo finito, satisfazendo restrições de recursos que estão disponíveis para os quais há uma demanda a ser atendida, considerando várias máquinas. Esse problema é de origem econômica e envolve custos de produção, estoque e preparação de máquinas.

O problema estudado neste trabalho enfoca o planejamento da produção, em máquinas paralelas com capacidade limitada. A pesquisa foi baseada em Fiorotto et al. [2018] que apresentam uma formulação para o problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas que considera a possibilidade de investir em flexibilidade.

Em geral, o dimensionamento de lotes é uma competência tática e operacional que interpreta as decisões de planejamento estratégico e as transforma em planos de produção concretos. Enquanto a flexibilidade é uma competência estratégica, no qual empresas podem usá-las para ajustar com precisão o número de máquinas, produtos, serviços e processos. Note que, em alguns casos, há uma integração entre ambas as decisões, que podem ser tomadas simultaneamente. Uma aplicação de decisões de flexibilidade neste contexto pode ser encontrada, por exemplo, na indústria de semicondutores, onde uma receita tem que ser qualificada em uma máquina específica, o que pode ser caro e demorado. Portanto, nem todas as receitas são qualificados para todas as máquinas. No entanto, para lidar com as alterações do produto, o processo de qualificação pode ser reconsiderado periodicamente. Em nosso contexto, considera-se que as decisões de flexibilidade são tomadas no início do horizonte e então permanecem fixas para o restante do horizonte.

Na literatura, com exceção de Fiorotto et al. [2018], não existem estudos que determinam os benefícios da flexibilidade no contexto de dimensionamento de lotes, existindo apenas estudos em outros contextos e que consideram um ponto de vista estocástico. Estudos sobre decisões estratégicas em ambientes estocásticos podem ser encontrados em Fine e Freund [1990], Jordan e Graves [1995] e Tang e Denardo [1988].

As contribuições deste trabalho são: desenvolver um método de solução heurístico com o intuito de determinar as ligações entre máquinas e itens, ou seja, determinar quais máquinas podem produzir cada um dos itens, com a finalidade de gerar boas soluções em baixos tempos computacionais; Comparar em um extensivo estudo computacional os resultados obtidas pela implementação da formulação matemática do problema proposta por Fiorotto et al. [2018] com os resultados obtidos pela heurística.

As outras seções deste trabalho estão divididas da seguinte maneira: Na Seção 2 são apresentados estudos sobre flexibilidade e uma formulação para máquinas paralelas flexíveis. Na Seção 3 é proposta uma heurística com o intuito de obter boas soluções com baixos tempos computacionais. Na Seção 4 apresenta-se os resultados computacionais e na Seção 5 são realizadas as conclusões e as ideias para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Correlatos e Modelagem Matemática

Nesta seção apresenta-se alguns estudos relacionados a flexibilidade de máquinas, bem como, a formulação proposta por Fiorotto et al. [2018].

A Figura 1 mostra um exemplo com 6 itens, 6 máquinas e 4 configurações diferentes de flexibilidade. Note que a primeira parte da figura mostra o caso dedicado, onde cada item está sendo produzido em apenas uma máquina específica. A segunda e a terceira parte contém o mesmo número de ligações entre itens e máquinas (mesma quantidade de flexibilidade), no entanto estas ligações foram adicionados de maneira distinta. Em (b) tem-se 3 grupos com 2 máquinas e 2 itens

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

e em (c) tem-se a configuração de cadeia longa, em que todas máquinas itens são interligados. Na última parte da figura tem-se a flexibilidade total, onde todos os itens estão conectados a todas as máquinas.

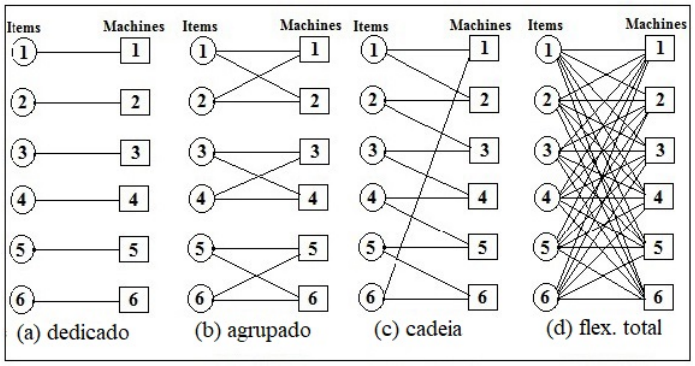


Figura 1: Diferentes configurações de flexibilidade com 6 itens

Jordan e Graves [1995] foram os primeiros que consideraram a concepção e a eficácia de uma quantidade limitada da flexibilidade de máquinas. Eles analisaram o valor da flexibilidade no processo de fabricação em um modelo estocástico com um único período e um único estágio de produção, no qual várias máquinas são capacitadas para produzir vários produtos diferentes. Neste artigo compreende-se que quase todos os benefícios da flexibilidade podem ser alcançados implementando apenas uma pequena quantidade de flexibilidade, mas de uma maneira inteligente. Os autores referem-se a este como o princípio da cadeia (Figura 1 parte (c)).

Vários autores estudaram os benefícios da flexibilidade em um ambiente de produção estocástico. Sheikhzadeh et al. [1998] apresentaram modelos analíticos para a avaliação do desempenho do princípio da cadeia em relação a flexibilidade total. Graves e Tomlin [2003] estenderam o trabalho de Jordan e Graves [1995] para cadeias de fornecimento de múltiplos estágios e desenvolvem ideias sobre estratégias para a implementação da flexibilidade do processo. Inman et al. [2004] mostraram como aplicar o princípio da cadeia ao treinamento cruzado em linhas de montagem. Iravani et al. [2005] demonstraram que usar a aplicação de treinamento cruzado em sistemas com menos números de ligações pode superar os sistemas com mais números de ligações. Muriel et al. [2006] desenvolveram modelos analíticos para estudar o impacto da flexibilidade sobre a escassez e estoques de componentes para sistemas de manufatura sob encomenda de múltiplos produtos com várias plantas. Mak e Shen [2009] ressaltaram que é fundamental avaliar a compensação entre o custo do investimento em flexibilidade e os benefícios resultantes. Eles mostram que a heurística de encadeamento fortemente defendida às vezes pode ter um desempenho insatisfatório quando os recursos não são perfeitamente flexíveis. Simchi-Levi e Wei [2012] apresentaram um estudo teórico sobre a efetividade do princípio da cadeia.

2.1. Formulação com Flexibilidade de Máquina como uma Variável de Decisão

Nesta seção será apresentada uma formulação que se baseia na formulação clássica do problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas, considerando a possibilidade de haver atrasos, proposta por Fiorotto et al. [2018]. O investimento de atualizar uma máquina para um produto específico torna-se uma variável binária e há um orçamento global sobre as decisões de investimento. Tal modelo também nos permitirá verificar a estrutura de flexibilidade ideal para vários níveis de parâmetros de entrada.

Para a formulação matemática do problema considere os seguintes parâmetros:
$I = \{1, ..., n\}$: conjunto de itens;
$J = \{1, ..., r\}$: conjunto de máquinas;

$T = \{1, ..., m\}$: conjunto de períodos;
d_{it}: demanda do item *i* no período *t*;
$sd_{it\tau}$: soma da demanda para o item *i*, do período *t* até o período τ ($\tau \geq t$);
hc_{it}: custo unitário de estoque do item *i* no período *t*;
bc_{it}: custo unitário de atraso do item *i* no período *t*;
sc_{ijt}: custo de preparação do item *i* na máquina *j* no período *t*;
vc_{ijt}: custo de produção do item *i* na máquina *j* no período *t*;
st_{ijt}: tempo de preparação do item *i* na máquina *j* no período *t*;
vt_{ijt}: tempo de produção do item *i* na máquina *j* no período *t*;
fc_{ij}: custo de flexibilidade para produzir o item i na máquina j;
$Fmax$: orçamento para investir em flexibilidade;
Cap_{jt}: capacidade (em unidade de tempo) da máquina *j* no período *t*.

As variáveis de decisão são definidas por:
x_{ijt}: quantidade produzida do item *i* na máquina *j* no período *t*;
y_{ijt}: variável binária, indicando a produção ou não do item *i* na máquina *j* no período *t*;
s_{it}: quantidade de estoque do item *i* no final do período *t*;
b_{it}: quantidade de atraso do item *i* no final do período *t*;
z_{ij}: variável binária, indicando se a máquina j pode produzir o item i ou não;

Desta forma, a formulação do problema é dada por:

$$Min \sum_{j\in J}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}(sc_{ijt}y_{ijt} + vc_{ijt}x_{ijt}) + \sum_{i\in I}\sum_{t\in T}(hc_{it}s_{it} + bc_{it}b_{it}) \tag{1}$$

Sujeito a:

$$s_{i,t-1} + b_{it} + \sum_{j\in J} x_{ijt} = d_{it} + s_{it} + b_{i,t-1} \qquad \forall i \in I, t \in T \tag{2}$$

$$x_{ijt} \leq min\{(Cap_{jt} - st_{ijt})/vt_{ijt}, sd_{i1m}\}y_{ijt} \qquad \forall j \in J, i \in I_j, t \in T \tag{3}$$

$$\sum_{i\in I}(st_{ijt}y_{ijt} + vt_{ijt}x_{ijt}) \leq Cap_{jt} \qquad \forall j \in J, t \in T \tag{4}$$

$$y_{ijt} \leq z_{ij} \qquad \forall j \in J, i \in I, t \in T \tag{5}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} fc_{ij}z_{ij} \leq Fmax \tag{6}$$

$$y_{ijt} \in \{0,1\},\ z_{ij} \in \{0,1\},\ x_{ijt} \geq 0 \qquad \forall j \in J, i \in I_j, t \in T \tag{7}$$

$$s_{it} \geq 0,\ s_{i0} = 0,\ s_{im} = 0,\ b_{it} \geq 0,\ b_{i0} = 0 \qquad \forall i \in I, t \in T \tag{8}$$

A função objetivo (1) minimiza os custos de preparação, produção, estoque e de atrasos. As restrições (2) garantem o equilíbrio do estoque em cada período considerando a possibilidade de atrasos. A seguir estão as restrições de preparação da máquina (3) e o limite de capacidade (4). A fim de tornar a formulação mais forte, limitamos a produção para cada item na restrição (3) tanto pela soma da demanda quanto pelo limite máximo possível com a capacidade disponível. As restrições (5) garantem que uma máquina possa ser preparada para produzir um item somente se esta máquina tem a flexibilidade para produzir este item. A restrição (6) limita o orçamento para o investimento em flexibilidade. Finalmente, (7) e (8) definem os domínios das variáveis.

3. Heurística de Solução

A ideia de propor uma heurística de solução surgiu depois de vários experimentos computacionais que mostraram que tempo computacional necessário utilizando CPLEX 12.6.1 para obter as soluções para essa formulação eram muito altos, especialmente para instâncias com um número

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

elevado de itens e máquinas. A ideia da heurística será descrita a seguir. Observe que, assim como em Fiorotto et al. [2018], nas restrições (6) fixa-se os custos de flexibilidade fc_{ij} igual a um e $Fmax$ igual ao número de ligações que são permitidas para serem adicionadas. Assim, limita-se o número total de ligações que podem ser utilizadas, isto é, impõem-se um limite no número de combinações possíveis entre máquinas e itens.

A heurística de solução determina as ligações (z_{ij}) entre os itens e as máquinas que serão adicionados utilizando para a escolha do item aquele com o maior custo de atraso na solução atual. Para escolher a máquina estimam-se as economias na solução realizadas com a adição de cada uma das máquinas e escolhe-se aquela com a maior economia.

A heurística pode ser descrita da seguinte maneira:

Passo 1: Criar a configuração inicial das máquinas.
Constrói-se a configuração dedicada de máquinas como na parte (a) da Figura 1. Para tanto, considera-se $Fmax$ igual ao número de itens da instância que está sendo resolvida ($Fmax = n$) e fixa-se as variáveis $z_{ii} = 1, \forall i.$;

Passo 2: Determinar o plano de produção.
Resolve-se o problema com as variáveis binárias z_{ii} $\forall i$ fixas usando o CPLEX. Observe que as outras z_{ij} estão fixas em zero.

Passo 3: Verificar a solução.
Verifica-se se há algum item com atraso. Em caso afirmativo, escolhe-se o item com o maior atraso na solução atual, para adicionar uma ligação;

Passo 4: Adicionar uma ligação.
Para escolher a máquina para adicionar uma ligação estimam-se as economias simulando a inclusão de uma ligação para cada uma das máquinas e a máquina com maior economia é escolhida. Depois de escolher uma ligação a ser adicionada (fixar variável z_{ij}), fixa-se $Fmax = Fmax + 1$ e volta-se para o passo 2.

Esse procedimento é realizado até adicionar todos as ligações, de forma que o número de ligações adicionadas é igual a $2n$ ($Fmax = 2n$). Será descrito a seguir o processo que é utilizado para a escolha da máquina a ser adicionada (Passo 4).

A estimativa das economias geradas pela inclusão de uma ligação não é uma tarefa simples, haja vista que essa estimativa depende de vários fatores, como por exemplo, os custos de produção, a capacidade atualizada das máquinas, os atrasos de cada item, etc. Note que, na formulação apresentada (2.1)-(2.8), com as variáveis x_{ijt} não é possível determinar a quantidade exata de atraso. Isso acontece porque essas variáveis determinam a quantidade produzida dos itens, mas não em quais períodos essas quantidades vão ser utilizadas. A Tabela (1) ilustra esse fato para um exemplo com um item e três períodos. Observe que no período 2 têm-se uma produção de 9 unidades e não há informação se parte desta produção é utilizada para satisfazer as 5 unidades de atraso do período 1 (e assim criar 3 unidades de atraso no período 2) ou se essa produção será utilizada para satisfazer toda demanda do período 2 e apenas parte do atraso do período 1. Para aproximar a quantidade total de itens em atraso ($atraso_i$), supõe-se que, se a produção de um período é maior o que a demanda, utiliza-se a produção para satisfazer a demanda do período em questão e então abre-se a possibilidade de satisfazer itens em atraso. Desta forma, a quantidade de atraso do exemplo apresentado na Tabela (1) é de 5 unidades a partir do período 1.

Para calcular uma estimativa das economias, primeiro calcula-se a capacidade mínima total para produzir os itens em atraso:

Tabela 1: Exemplo

demanda	10	7	5
produção	5	9	8

$$\alpha_{ij} = atraso_i * vt_{it} + \frac{atraso_i}{\frac{cap_j - st_{ij}}{vt_{ij}}} * st_{ij}$$

Depois disso, compara-se a capacidade necessária para produzir os itens em atraso com a capacidade disponível ($folga_j$) de cada máquina e então calcula-se uma estimativa das economias ($beneficio_{ij}$) produzidas por cada uma das máquinas. Se a capacidade disponível de uma máquina for maior do que a capacidade total necessária para resolver o atraso ($\alpha_{ij} \leq folga_j$), o custo total de atraso pode ser eliminado. Denotando por $Q := \frac{cap_j - st_{ij}}{vt_{ij}}$ a quantidade máxima que pode ser produzida por período, o benefício é dado pelo custo total de atraso menos o custo total para produzir a quantidade de itens em atrasos:

$$beneficio_{ij} = totalatraso_i * b_i - atraso_i * vc_{ij} - \frac{atrasos_i}{Q} * sc_{ij}$$

Por outro lado, se a capacidade disponível for menor do que a capacidade total necessária para resolver o atraso ($\alpha_{ij} > folga_j$), pode-se eliminar apenas parte do custo de atraso. Denotando por $P := (\frac{folga_j - \frac{folga_j}{Cap_j} * st_{ij}}{vt_{ij}})$ a quantidade total aproximada de itens que podem ser produzidos com a capacidade disponível, o benefício será dado por:

$$beneficio_{ij} = P * (b_i - vc_{ij}) - \frac{P}{Q}$$

Depois de calcular as economias aproximadas ($beneficio_{ij}$) adquiridas ao adicionar uma ligação em todas as máquinas escolhe-se o link com os maiores benefícios. Então, utiliza-se o CPLEX para resolver o problema com a ligação adicionada.

4. Resultados Computacionais

Os dados utilizados neste trabalho são os mesmos que foram utilizados em Fiorotto et al. [2018], os quais consistem de uma adaptação, dos dados propostos por Trigeiro et al. [1989] para o problema de dimensionamento de lotes com uma única máquina. Mais especificamente, foram utilizados os conjuntos $F1 - F20$ e $G51 - G60$. O conjunto $F1 - F20$ contém 20 instâncias com 6 itens e 15 períodos. O conjunto $G51 - G55$ é composto por 5 instâncias com 12 itens e 15 períodos e o conjunto $G56 - G60$ contém 5 instâncias com 24 itens e 15 períodos. Para cada uma dessas 30 instâncias são criados problemas com máquinas paralelas idênticas, isto é, as capacidades são idênticas e para um determinado item, os tempos e os custos são os mesmos em todas as máquinas. A escolha da capacidade das máquinas foram baseadas em testes preliminares e varia de 40 até 150 (unidades de tempo) com o intuito de apresentar uma ampla variação de problemas para os quais as soluções tenham diferentes níveis de atraso. Foram utilizados 16 níveis diferentes de capacidades, resultando em um total de 480 instâncias (16 níveis de capacidade multiplicado por 30 instâncias em cada nível). Os demais parâmetros que são utilizados estão descritos na Tabela 2.

Para analisar os resultados, foram considerados três fatores: variação de capacidade (CAP), limitante superior (L.S.) e tempo computacional em segundos (T(s)). Observa-se que os limitantes superiores encontrados pela formulação foram fixados em 100% e a partir desses valores, calculam-se os valores referente a heurística, isto é, utiliza-se a fórmula $(\frac{HEUR}{FORM}) * 100$.

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

Tabela 2: Parâmetros

PARÂMETROS	INTERVALOS
Tempo de produção vt_{ijt}	1
Custo unitário de estoque hc_{it}	[1,5]
Tempo de preparação st_{ijt}	[10,50]
Custo de preparação sc_{ijt}	[400, 1000]
Custo de produção vc_{ijt}	0
Demanda d_{it}	[0,180]
Custo unitário de atraso bc_{it}	$100 * hc_{it}$

A formulação (2.1)-(2.8) e a heurística foram implementadas em C ++ usando o concert e o CPLEX 12.6.1 como pacotes de otimização. Os testes foram feitos em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-4790, memória RAM 16GB, com sistema operacional Windows.

Foram criadas diferentes configurações de flexibilidade, de acordo com cada método de solução, para cada um dos conjuntos de instâncias, de forma que o número de ligações adicionadas em cada uma destas configurações é determinado pelo número de itens e de máquinas da instância em questão, isto é, para o conjunto com 12 itens foram adicionadas 12 ligações (além da configuração inicial dedicada) e com 24 itens foram adicionadas 24 ligações. A ordem que estas ligações são adicionadas é determinada de acordo com a heurística de solução.

O limite do tempo computacional foi fixado em 60 segundos para a configuração inicial dedicada, adicionando mais 60 segundos para cada ligação que pode ser adicionada. Desta forma, o limite do tempo computacional para as instâncias com 12 itens e 12 máquinas foi fixado em 780 segundos e para 24 itens e 24 máquinas foi fixado em 1500 segundos.

Observa-se que os resultados apresentados nas tabelas a seguir correspondem a média aritmética dos resultados obtidos para cada conjunto de instâncias.

Na Tabela 3 são apresentados os limitantes superiores (colunas L.S.) e o tempo computacional em segundos (colunas T(s)) para a formulação (1) - (8) (coluna FORM) e para a heurística proposta (colunas HEUR) para as instâncias com 12 itens e 12 máquinas. Para a formulação (1) - (8) também são apresentados os valores obtidos para o *gap* (coluna GAP), que correspondem aos valores (em porcentagem) encontrados pelo CPLEX.

A Tabela 3 mostra que, em geral, a formulação matemática é eficiente em termos de gaps de solução para problemas com capacidade muito apertadas (entre 40 e 90), de forma que os gaps encontrados pela formulação para estas classes não ultrapassam 1%. No entanto, para problemas com capacidade média (entre 100 e 135) os gaps encontrados são relativamente altos, chegando até a $22,00\%$.

Para os tempos computacionais, nota-se que a formulação utilizou o tempo máximo fixado (780 segundos) para quase todos os níveis de capacidade. Por outro lado, a heurística de solução apresenta tempos computacionais bastante inferiores quando comparados a formulação de forma que, na maioria dos casos, o tempo utilizado pela formulação é 13 vezes maior do que o utilizado pela heurística.

Em relação aos limitantes superiores, observa-se que a heurística obteve resultados melhores do que a formulação para 11 dos 16 níveis de capacidade considerados. Além disso, na média, as soluções encontradas pela heurística são 2.1% melhores do que as soluções encontradas pela formulação.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para as instâncias grandes, com 24 itens e 24 máquinas. Nota-se que os *gaps* encontrados pela formulação são muito altos para vários níveis de capacidade, principalmente para os problemas com capacidade média. O *gap* mais alto (84%) é encontrado na classe com capacidade igual a 125, e têm-se um gap médio de 20%. No entanto,

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

Tabela 3: 12 itens, 12 máquinas e 15 períodos

FORM				HEUR	
Cap	L. S.	T(s)	GAP	L. S.	T(s)
40	100%	110	0,09	100%	1
50	100%	14	0,09	100%	2
60	100%	643	0,15	100%	181
70	100%	780	0,28	99%	58
80	100%	780	0,42	99%	55
90	100%	780	1,02	99%	62
100	100%	780	2,43	99%	62
110	100%	780	6,77	97%	63
115	100%	780	13,00	96%	63
120	100%	780	22,00	93%	62
125	100%	780	21,00	88%	62
130	100%	780	18,58	99%	61
135	100%	780	3,30	99%	61
140	100%	780	2,05	99%	55
145	100%	780	1,43	100%	60
150	100%	780	1,11	100%	39
Média	100%	682	5,86	97,9%	59

assim como na Tabela 3, os *gaps* são menores do que 1% para os problemas com capacidade folgada.

A Tabela 4 mostra ainda que, mesmo para as instâncias grandes, a heurística de solução se mostrou bastante eficiente (104 segundos na média) de forma que os tempos computacionais são, em média, 14 vezes menores dos que foram encontrados pela formulação.

Em relação a qualidade das soluções, a heurística se mostra muito melhor do que a formulação matemática. Note que em geral, a heurística encontra limitantes superiores 20% melhores em relação a formulação. Em termos práticos, esses resultados mostram que para os problemas de grande porte, a heurística proposta é muito eficiente tanto em relação aos tempos computacionais quanto a qualidade das soluções.

5. Conclusões e Propostas Futuras

Neste trabalho foi estudado um problema de dimensionamentos de lotes com máquinas paralelas, com enfoque no caso em que as máquinas são flexíveis e possuem restrições de capacidade, isto é, cada uma das máquinas pode ou não ser flexíveis para produzir cada um dos itens.

A pesquisa foi baseada em Fiorotto et al. [2018], que apresentam a formulação (1) - (8), para o problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas flexíveis e que considera a possibilidade de investir na flexibilidade das máquinas. O objetivo desse trabalho foi desenvolver um método de solução heurístico para essa formulação, com o intuito de encontrar boas soluções em baixos tempos computacionais, visto que em Fiorotto et al. [2018] os autores relatam que, para instâncias maiores, obter boas soluções para o problema é uma tarefa difícil.

Após a implementação do método de solução foram realizados os testes computacionais, com a utilização do solver CPLEX 12.6.1.. Os testes foram realizados para 480 instâncias conhecidas da literatura. As análises foram feitas considerando-se instâncias de diferentes tamanhos e diferentes níveis de capacidade. As soluções foram analisadas através dos limitantes superiores, os tempos computacionais, os atrasos e o tamanho do *gap* encontrado pela formulação matemática do problema.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que conforme aumenta-se o número de itens e

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br

Tabela 4: 24 itens, 24 máquinas e 15 períodos

FORM				HEUR	
Cap	L. S.	T(s)	GAP	L. S.	T(s)
40	100%	822	0,11	101%	76
50	100%	1500	0,27	98%	94
60	100%	1500	0,26	97%	99
70	100%	1500	0,97	91%	114
80	100%	1500	1,60	98%	130
90	100%	1500	3,48	97%	146
100	100%	1500	7,36	95%	160
110	100%	1500	16,49	88%	167
115	100%	1500	38,11	50%	168
120	100%	1500	62,78	44%	64
125	100%	1500	84,33	12%	89
130	100%	1500	64,67	40%	124
135	100%	1500	26,54	71%	65
140	100%	1500	9,66	96%	70
145	100%	1500	2,77	98%	50
150	100%	1500	1,85	99%	40
Média	100%	1458	20,08	79,7%	104

de máquinas (tamanho do problema), o desempenho da heurística melhora em relação ao desempenho da formulação matemática, principalmente para problemas com nível de capacidade média. Além disso, em geral o tempo computacional da heurística é muito inferior ao tempo computacional da formulação matemática.

Tendo em vista estender o trabalho, bem como melhorar os resultados computacionais sugere-se: aperfeiçoar o procedimento heurístico; propor novas heurísticas e estudar problemas não balanceados em que o número de itens e máquinas são diferentes.

Referências

Fine, C. H. e Freund, R. M. (1990). Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Management Science*, 36(4):449–466. URL https://doi.org/10.1287%2Fmnsc.36.4.449.

Fiorotto, D. J., Jans, R., e de Araujo, S. A. (2018). Process flexibility and the chaining principle in lot sizing problems. *International Journal of Production Economics*, 204:244–263. URL https://doi.org/10.1016%2Fj.ijpe.2018.07.030.

Graves, S. C. e Tomlin, B. T. (2003). Process flexibility in supply chains. *Management Science*, 49 (7):907–919. URL https://doi.org/10.1287%2Fmnsc.49.7.907.16381.

Inman, R. R., Jordan, W. C., e Blumenfeld, D. E. (2004). Chained cross-training of assembly line workers. *International Journal of Production Research*, 42(10):1899–1910. URL https://doi.org/10.1080%2F00207540410001666224.

Iravani, S. M., Oyen, M. P. V., e Sims, K. T. (2005). Structural flexibility: A new perspective on the design of manufacturing and service operations. *Management Science*, 51(2):151–166. URL https://doi.org/10.1287%2Fmnsc.1040.0333.

Jordan, W. C. e Graves, S. C. (1995). Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. *Management Science*, 41(4):577–594. URL https://doi.org/10.1287%2Fmnsc.41.4.577.

Mak, H.-Y. e Shen, Z.-J. M. (2009). Stochastic programming approach to process flexibility design. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 21(3-4):75–91. URL https://doi.org/10.1007%2Fs10696-010-9062-3.

Muriel, A., Somasundaram, A., e Zhang, Y. (2006). Impact of partial manufacturing flexibility on production variability. *Manufacturing & Service Operations Management*, 8(2):192–205. URL https://doi.org/10.1287%2Fmsom.1060.0099.

Sheikhzadeh, M., Benjaafar, S., e Gupta, D. (1998). Machine sharing in manufacturing systems: Total flexibility versus chaining. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10 (4):351–378.

Simchi-Levi, D. e Wei, Y. (2012). Understanding the performance of the long chain and sparse designs in process flexibility. *Operations Research*, 60(5):1125–1141. URL https://doi.org/10.1287%2Fopre.1120.1081.

Tang, C. S. e Denardo, E. V. (1988). Models arising from a flexible manufacturing machine, part i: Minimization of the number of tool switches. *Operations Research*, 36(5):767–777. URL https://doi.org/10.1287%2Fopre.36.5.767.

Trigeiro, W. W., Thomas, L. J., e McClain, J. O. (1989). Capacitated lot sizing with setup times. *Management science*, 35(3):353–366.

https://proceedings.science/p/106748?lang=pt-br