

**SEQUENCIAMENTO DE ORDENS COM OPERAÇÕES EM LOTES  
BIDIMENSIONAIS NÃO-GUILHOTINADOS CONSIDERANDO ATENDIMENTO DE  
DATAS E OCUPAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA**

**Felipe Kesrouani Lemos**

Escola Politécnica/USP  
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, Nº 128  
Cidade Universitária - São Paulo - SP  
felipe.lemos@poli.usp.br

**Miguel Cezar Santoro**

Escola Politécnica/USP  
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, Nº 128  
Cidade Universitária - São Paulo - SP  
santoro@usp.br

**RESUMO**

Este trabalho analisa o sequenciamento de operações de corte bidimensional não-guilhotinado de chapas com o objetivo ponderado de atendimento de datas e utilização da matéria-prima. Ele explora a intersecção de dois temas clássicos na literatura, corte e empacotamento e sequenciamento, a respeito da qual poucos trabalhos foram localizados. Foram testadas dez heurísticas construtivas sob diferentes condições de dimensões dos itens, intensidade de atrasos e ponderação dos critérios de decisão. Os resultados mostraram (i) a vantagem do uso de heurísticas probabilísticas; (ii) a importância do viés escolhido; e (iii) a relevância da coerência entre o sequenciamento inicial e a ponderação entre os dois objetivos almejados. A implantação numa indústria aeronáutica resultou melhor utilização da matéria-prima com melhoria no desvio de datas.

**Palavras-chave: Corte e empacotamento. Sequenciamento. Heurísticas construtivas.**

**ABSTRACT**

This paper analyses non-guillotine bidimensional sheets cutting operations sequencing with the weighed goal of lateness and raw material utilization. It explores the intersection of two classic themes on literature, cutting and packing and sequencing, for what few papers were located. Ten single path heuristics were tested under different conditions of items sizes, tardiness intensity and weighs of decision criteria. The results show (i) the advantage of using probabilistic heuristics; (ii) the importance of the chosen bias; and (iii) the relevance of coherence between initial sequencing and weighs of the objectives targeted. The practice on a aircraft industry has resulted better utilization of raw material with improvement of lateness.

**KEYWORDS: Cutting and packing. Sequencing. Single path heuristics.**

## 1. Introdução e objetivo

O presente trabalho se insere no contexto do apoio à decisão multicriterial, explorando uma intersecção de dois temas clássicos da literatura de pesquisa operacional aplicada à gestão da produção: corte e empacotamento e sequenciamento. Trata-se de um par de problemas voltados a diferentes objetivos de desempenho da produção, o aproveitamento da matéria-prima por um lado e o atendimento de datas por outro. Estas duas métricas são importantes quando vistas isoladamente, porém no “chão de fábrica” retratam um possível dilema quando da escolha da próxima ordem a ser executada.

Este é um caso típico de centros produtivos nos quais há formação de lotes, com diferentes itens em uma mesma operação. Aqui, mais especificamente, foi tratado o caso de corte de itens retangulares bidimensionais não-guilhotinados. Neste tipo de processo, ocorre – ainda que de maneira intuitiva – uma constante ponderação entre o objetivo de atendimento de datas e a boa utilização de recursos produtivos, sobretudo o aproveitamento da matéria-prima, questão que doravante será tratada por “ocupação”.

A motivação para tal estudo advém de um projeto realizado em uma fábrica de produtos estampados para a indústria aeronáutica. No caso específico deste objeto, o estudo do sequenciamento também é particularmente relevante: na verdade, trata-se de uma decorrência da extrema importância que o atendimento de datas toma por ser uma produtora de peças primárias e submontagens, cuja inserção de seus *outputs* se dá no contexto de grandes montagens. Em outras palavras, o atraso com relação a prazos acarreta paradas nas linhas de montagem intermediárias e finais, almejando-se sempre uma boa sincronização.

Esta interface entre atendimento de datas e ocupação de matéria-prima é uma intersecção pouco explorada de dois temas clássicos da literatura de pesquisa operacional: por um lado, o sequenciamento de ordens almejando atendimento de datas; e por outro, a melhor ocupação da matéria-prima através de problemas de corte e empacotamento.

O objetivo deste trabalho é explorar abordagens que residam nesta intersecção, de modo que possam contemplar ambos satisfatoriamente na escolha das próximas ordens a serem executadas.

## 2. Revisão bibliográfica

Operações em que há formação de lotes recaem, em geral, em um ramo da pesquisa operacional que têm ganhado grande importância nas últimas décadas, os chamados problemas de corte e empacotamento (C&E). Arenales e Morábito (1995) definem um corte não-guilhotinado de primeira ordem como aquele que produz cinco novos retângulos de forma que não formem um padrão de corte guilhotinado.

Segundo Bichoff e Wäscher (1995), o crescente interesse em pesquisas desta área pode ser explicado pela aplicabilidade do assunto; diversidade de problemas reais; e complexidade dos problemas. A vastidão de usos é, de fato, facilmente verificável, tanto em aplicações imediatas (indústria de aço, vidro, papel, alumínio etc.), como também em situações semelhantes que recaem na mesma formulação teórica. Brown (1971 apud Bischoff; Wäscher, 1995, p. 1) e Dyckhoff (1990 apud Bischoff; Wäscher, 1995, p. 1) apontam exemplos disso, como balanceamento de linhas, formulação de orçamentos e *layout* de unidades de produção ou mesmo de publicações de imprensa, esta última ressaltada por Downsland e Downsland, (1995).

Em que se pese a enunciação bastante simples do problema, sua complexidade é, com efeito, alta suficiente para classificá-lo como NP-difícil em termos de processamento, mesmo para os casos simplificados com unidimensionalidade, conforme Dyckhoff (1990 apud Poldi e Arenales, 2006, p. 474), ou ainda para o caso de itens retangulares, conforme Downsland e Downsland (1992).

Abordagens otimizantes para o problema bidimensional não-guilhotinado foram vistas por Haessler e Sweeney (1991), através de programação linear assistidas por heurísticas para determinar limitantes inferiores; Morabito e Arenales (1995) através de grafos e-ou; e

Hadconstantinou e Chistofides (1995) por busca em árvore. Em termos de heurísticas de busca, são explorados procedimentos como busca tabu ou *simulated annealing*, como em Binkley e Hagiwara (2007); ou na comparação destes com construtivos e otimizantes de Lodi, Martello e Vigo (1999).

Heurísticas construtivas para o problema bidimensional não-guilhotinado foram exploradas por Wang (1983 apud Oliveira e Ferreira, 1990, p. 257-258) através da avaliação de subpadrões de corte por seu desperdício interno, sendo melhorada por Oliveira e Ferreira (1990) através de um procedimento de *branch-and-bound*. Wu et al. (2002) desenvolve uma heurística construtiva determinística denominada *Less Flexible First* (“menos flexível primeiro”, em uma tradução livre), em um desenvolvimento de um princípio cognitivo de origem na Antiguidade, que considera os cantos como sendo elementos “menos flexíveis” em termos de alocação de peças, já que enrijecem duas arestas no posicionamento.

A grande maioria das abordagens conjuntas entre corte e empacotamento e sequenciamento encontradas na literatura se preocupa com o problema de estoque gerado e seu armazenamento, em classes de problemas denominadas por Yanasse (1997) de MOSP (*minimization of open stack problem*) e MORP (*minimization of order spread problem*). Este último é demonstrado ser NP-difícil por Fink e Voß (1999), ainda que Foerster e Wäscher (1998) o classifiquem como NP-completo por ser uma generalização do problema do caixeiro viajante. O primeiro também é demonstrado ser NP-difícil por Linhares e Yanasse (2002).

Segundo Pileggi, Morabito e Arenales (2007), uma pilha é chamada de “aberta” se a manufatura da ordem em questão foi começada, porém não finalizada – o que só ocorre quando após o processamento do último item desta. Uma vez que os lotes de peças podem estar segmentados em inúmeros padrões de corte, as dificuldades de espaço e fluxo no processo são trazidas à tona. Yanasse (1997) aponta como inconvenientes de ordens inacabadas o alto custo de estoque, manipulação de materiais, potenciais atrasos em entregas (e, possivelmente, de faturamento) ou custos de transporte pela dispersão dos lotes.

Tal abordagem foi explorada por heurísticas construtivas, por Yuen (1991), Yuen (1995) e Armbruster (2002); através de algoritmos otimizantes por Yanasse (1997), Faggioli e Bentivoglio (1998); e através de heurísticas de busca por Foerster e Wäscher (1998), Fink e Voß (1999).

### 3. Método

Em termos de ambiente de produção (*shop environment*), segundo a classificação de Graham et al. (1979 apud Allahverdi et al., 2008, p. 988), será considerado um sequenciamento em ambiente de máquinas única ( $\alpha = 1$ ). Esta escolha se justifica, sobretudo, pelo escopo do estudo, que não se propõe a interferir no método de sequenciamento dos demais centros de trabalho.

Já em relação ao modelo de solução, segundo a hierarquização de Pacheco e Santoro (1999), considera-se que o uso de **heurísticas construtivas** é o mais adequado para tratar o problema: o porte dos problemas deve ser necessariamente grande, pois os centros de trabalho têm listas de ordens que podem facilmente chegar à casa das centenas; o esforço computacional pequeno é uma característica muito desejável; a acessibilidade do conhecimento envolvido também se torna decisiva, já que almeja-se a disseminação da ferramenta; e, por fim, a baixa exploração do domínio das alternativas viáveis pode ser mitigada através de múltiplas rodadas em geração de diversas sequências probabilisticamente.

Tendo em vista o tipo de modelo de solução escolhida e o ambiente de produção a ser considerado, propõe-se a seguinte lógica para sequenciamento de ordens:

1. Separação dos itens em n filas, sendo n o número de critérios de agrupamento;
2. Ordenação inicial de cada fila por um critério a ser explicitado posteriormente;
3. Toma o próximo critério de agrupamento:
  - a. Um padrão de corte é formado para cada objeto disponível do critério de agrupamento;
  - b. Os padrões de corte formados são comparados entre si e o melhor é escolhido por critérios ponderados de atendimento de datas e ocupação, explicados adiante;

- c. Os itens do padrão de corte escolhido são inativados para as próximas iterações e o objeto tem uma unidade debitada de seu estoque inicial;
- d. Retorna ao item a enquanto houver itens ativos na fila.
4. Passa ao próximo agrupamento técnico e retorna a 3 enquanto houver algum com itens ainda ativos.
5. Todos os padrões gerados nos diferentes agrupamentos técnicos são sequenciados através de uma comparação entre eles, levando em conta atendimento de datas e ocupação ponderadamente.

Assim, a lógica proposta pressupõe alguns critérios nos passos lógicos: em 2, necessita-se um critério de ordenação inicial; em 3a uma regra para escolha dos itens na fila e corte de itens nos objetos; em 3b e 5 um critério de avaliação e comparação dos padrões de corte.

Como critérios de **ordenação inicial**, escolheram-se três: prioridade por data, ordenação crescente por folga dinâmica, que retrata a urgência do item no centro de trabalho; prioridade por ocupação, em consonância com modelos construtivos da literatura, a prioridade por ocupação será dada por ordem decrescente da altura do item (LODI, MARTELLO e VIGO, 1999; WU et al, 2002; POLDI e ARENALES, 2006; BINKLEY e HAGIWARA, 2007); prioridade por critério ponderado, normalização e ponderação dos critérios anteriormente mencionados.

Já quanto ao **procedimento de escolha do próximo item a ser empacotado**, 4 critérios foram considerados: probabilístico sem viés (escolha aleatória), em que a cada item em fila é atribuída uma probabilidade igualmente distribuída de ser o próximo a ser empacotado; probabilístico com viés linear, em que a cada item em fila é atribuída uma probabilidade de ser empacotado que decai linearmente ao longo da fila, de acordo com a ordenação inicial; probabilístico com viés exponencial, em que a cada item em fila é atribuída uma probabilidade de ser empacotado que decai exponencialmente ao longo da fila; determinístico, em que o primeiro item da ordenação inicial proposta é escolhido para empacotamento. No limite, pode-se entender como um probabilístico com viés de 100% de probabilidade para o primeiro item.

Portanto, combinando os critérios de ordenação inicial com os procedimentos de escolha do próximo item a ser empacotado, forma-se um total de 10 variantes da heurística proposta, já que os o procedimento probabilístico sem viés independe da ordenação inicial.

Como **critérios de parada** para os procedimentos probabilísticos foram considerados os seguintes: número máximo de iterações (500 iterações); número máximo de iterações sem ganho (100 iterações); e tempo máximo de processamento (60 segundos).

Para determinar os valores de tais parâmetros, foi feito um estudo inicial para cada um dos critérios, tomando o procedimento de formação de padrão de corte aleatoriamente (probabilístico sem viés), com ponderação 100% para o critério de atendimento de datas e, posteriormente, com 100% para ocupação. O gráfico 3.1 ilustra o desempenho dos critérios em relação ao número máximo de iterações como critério de parada. Estudos análogos foram feitos para os outros 2 critérios, sendo o valor de parada aquele em que os ganhos de desempenho são assintóticos.

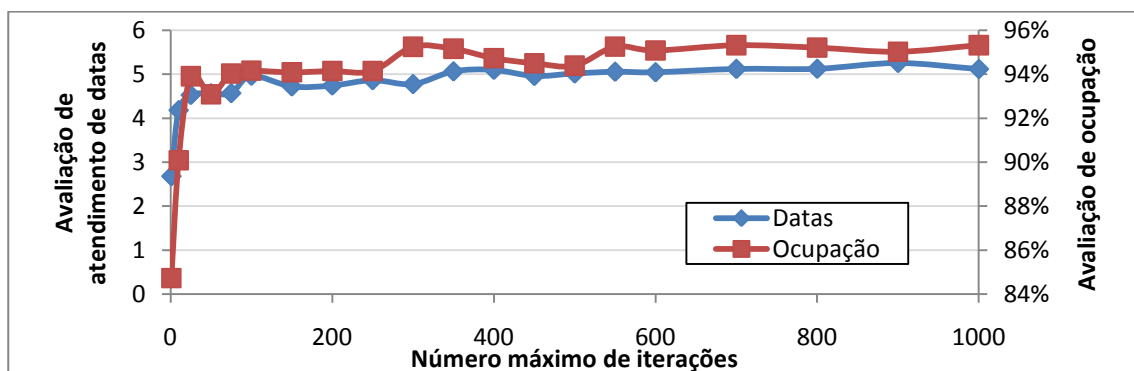


Gráfico 3.1 – Desempenho da heurística probabilística versus número máximo de iterações

O **procedimento de corte** dos itens no objeto se baseou no método proposto por Wu et al. (2002), com o princípio do LFF (*less flexible first*), posicionando os itens sempre nos cantos da placa. A escolha do canto foi modificada, contemplando aquele em que a menor distância até o próximo canto for mínima.

Finalmente o procedimento de avaliação dos padrões de corte, em consonância com a proposta maior deste trabalho, contempla os dois objetivos principais: ocupação e atendimento de datas. A **avaliação da ocupação** é facilmente definida: o quociente entre a somatória das áreas dos itens pelo tamanho do objeto já define fisicamente a ocupação do objeto.

Por outro lado, a **avaliação** da satisfação do critério de **atendimento de datas** apresenta alguma complicação adicional. Como dito anteriormente, a indústria onde foi feita a aplicação prática deste estudo utiliza a folga dinâmica como priorizador de atendimento de datas. Porém, esta pode assumir valores positivos e negativos. Assim, a somatória das folgas não é um valor que reflete o valor de um padrão de corte. Em segundo lugar, há que se ter em mente que as folgas negativas são mais do que proporcionalmente desejáveis do que as positivas. Isto porque as primeiras representam atrasos locais que precisam ser encaminhados, enquanto estas últimas são potenciais geradoras de estoque em processo.

Partindo destas observações, formulou-se um indicador, denominado de “folga dinâmica corrigida” (3.1). O valor de atendimento de datas de um padrão de corte é a somatória deste indicador ponderada por um peso da posição da ordem dentro do padrão, conforme (3.3). Tal peso, cujo valor segue (3.2) serve para fazer com que o valor de atendimento de datas de um padrão de corte seja representado preponderantemente por seus itens mais atrasados.

$$Folga\ dinâmica\ corrigida = \begin{cases} -Folga\ dinâmica & ,\ se\ Folga\ dinâmica < 0 \\ \frac{1}{(2 + Folga\ dinâmica)} & ,\ se\ Folga\ dinâmica \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Peso_{i-\acute{e}simo\ item\ do\ padr\ ao} = 0,2 \times 0,8^{(i-1)} \quad (3.2)$$

$$Valor\ de\ atendimento\ de\ datas = \sum_i Peso_i \times Folga\ dinâmica\ corrigida_i \quad (3.3)$$

Ao longo do procedimento descrito, há várias comparações entre padrões (padrões gerados probabilisticamente para um mesmo objeto; padrões de diferentes objetos para um mesmo conjunto de itens de um critério de agrupamento; padrões de diferentes agrupamentos a serem seqüenciados). Fica notório que a faixa de valores abrangida nos diferentes critérios é muito distinta. Enquanto o valor de ocupação é uma faixa entre 0 e 1, o valor de atendimento de datas é uma faixa de 0 a  $+\infty$ . Assim, recorre-se a um procedimento de normalização dos valores quando de sua comparação entre padrões. A relação (3.4) mostra o critério adotado, que é a proporção em base percentual com relação aos extremos da série comparada.

$$Valor\ normalizado_i = \frac{Valor\ calculado_i - \min_i(Valor\ calculado_i)}{\max_i(Valor\ calculado_i) - \min_i(Valor\ calculado_i)} \quad (3.4)$$

Por fim, havendo uma mesma base de pontuação, a ponderação dos valores é feita atribuindo pesos a cada um dos objetivos, conforme (3.5).

$$Valor\ do\ padr\ ao = Peso_{ocup} \times Valor_{ocup} + Peso_{at.datas} \times Valor_{at.datas} \quad (3.5)$$

#### 4. Resultados computacionais

Antes de proceder com as aplicações práticas, julgou-se necessário uma avaliação comparativa das variantes heurísticas propostas, tanto de sua robustez perante diferentes situações, quanto da importância de cada um dos critérios que compõem o método.

Foram identificados 5 fatores importantes no projeto de cenários para teste dos métodos heurísticos propostos, cada um com 2 a 3 níveis, além de um sexto fator que é a própria variantes heurística, este, portanto, com 10 níveis.



- **Dimensão média dos itens:** centro da distribuição uniforme a ser utilizada para gerar aleatoriamente as dimensões dos itens. O nível alto corresponderá à distribuição com centro de 30% da dimensão do objeto; e o baixo, com centro de 15% da dimensão do objeto;

- **Variabilidade das dimensões dos itens:** amplitude da distribuição uniforme a ser utilizadas para gerar aleatoriamente as dimensões dos itens. O nível alto corresponderá à distribuição com amplitude de 20% da dimensão do objeto; enquanto o nível baixo será aquele com amplitude de 10% da dimensão do objeto;

- **Folga dinâmica média dos itens:** centro da distribuição uniforme a ser utilizadas para gerar aleatoriamente as folgas dinâmicas dos itens. O nível alto corresponderá à distribuição com centro de 0 de folga dinâmica (em média, as ordens estão “em dia”); enquanto o nível baixo será aquele com centro de -10 de folga dinâmica (em média, as ordens estão atrasadas);

- **Variabilidade da folga dinâmica dos itens:** amplitude da distribuição uniforme a ser utilizadas para gerar aleatoriamente as folgas dinâmicas dos itens. O nível alto corresponderá à distribuição com amplitude de 30 unidades; enquanto o nível baixo será aquele com amplitude de 10 unidades;

- **Peso dos critérios** (ocupação e atendimento de datas): aqui serão definidos 3 níveis, um deles com prioridade maior para atendimento de datas, que refletirá em peso de 80% para tal critério (e, conseqüentemente, 20% para ocupação); outro com prioridade maior para ocupação (80% para ocupação e 20% para atendimento de datas); e, finalmente, prioridades iguais (ou seja, 50% para cada critério).

- **Métodos heurísticos:** são 10 níveis, de acordo com as variantes propostas.

Assim, 480 combinações de experimentos foram testadas, considerando as 10 variantes do procedimento heurístico proposto, sendo 48 situações para cada uma delas. Foram feitas 5 réplicas de cada um dos experimentos nos três tipos de problemas propostos, para cada uma das 10 heurísticas, totalizando um conjunto de 2400 experimentos.

Em cada rodada, obteve-se como saída uma lista de padrões de corte a serem executados e sua respectiva ordem de corte, bem como o valor de ocupação ( $V_{ocupação}$ ) e de atendimento de datas ( $V_{at.datas}$ ) para cada um destes padrões, ambos descritos anteriormente. Para fins de avaliação do desempenho da heurística, foi considerada uma média ponderada dos 4 primeiros padrões na fila (pesos de 60% para o primeiro padrão, 25% para o segundo, 10% para o terceiro e 5% para o quarto), já que para o caso prático só são relevantes os primeiros padrões.

Os valores de ocupação e de atendimento de cada experimento foram considerados de acordo com a média dos valores calculados obtidos nas 5 réplicas. Um terceiro valor encontrado – utilizado com finalidade de decisão – é a normalização e ponderação de ambos, conforme os pesos do respectivo experimento. A normalização ocorre numa escala de 0 a 1 através da comparação com os resultados das demais heurísticas para as situações em que os outros cinco fatores são idênticos, conforme (4.1).

$$V_{ponderado} = w_{ocupação} \times \left( \frac{V_{ocupação} - V_{ocupação}^{mínimo}}{V_{ocupação}^{máximo} - V_{ocupação}^{mínimo}} \right) + w_{at.datas} \times \left( \frac{V_{at.datas} - V_{at.datas}^{mínimo}}{V_{at.datas}^{máximo} - V_{at.datas}^{mínimo}} \right) \quad (4.1)$$

Para entender o desempenho dos métodos heurísticos, inicialmente houve a intenção de utilizar o método estatístico da análise de variância com múltiplos fatores. Entretanto, pelo teste de Levene (para distribuições contínuas em geral) não se verifica a condição de homocedasticidade. Assim, a análise das diferenças entre as heurísticas foi feita através do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que testa a hipótese nula de que as medianas de duas ou mais populações são iguais (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Foi possível verificar que em todos os testes o valor-p foi pequeno suficiente (todos nulos) para que a hipótese nula da igualdade das medianas seja rejeitada para níveis de significância de até 0,1%.

Para a avaliação da influência dos fatores tomou-se uma das heurísticas como *benchmarking*, analisando o desempenho das demais em relação a esta. Foi escolhida a heurística 4 (probabilística sem viés) por seu caráter de aleatoriedade na escolha dos itens a serem

posicionados (embora seu procedimento geral probabilístico já lhe garanta certa eficácia melhorada).

As medidas adotadas para tal comparação foram:

- i. Variação percentual média em relação à heurística 4;
- ii. Porcentagem de sucessos em relação à heurística 4, ou seja, em quantos dos casos analisados, a heurística obteve desempenho superior ao *benchmarking*.

Para ter uma visão completa dos experimentos em relação aos fatores estudados, foram feitos diferentes cortes dos resultados, como visto nos gráficos a seguir.

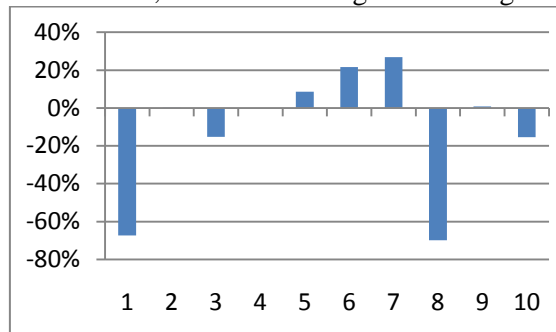


Gráfico 4.1 – Variação percentual média do critério ponderado

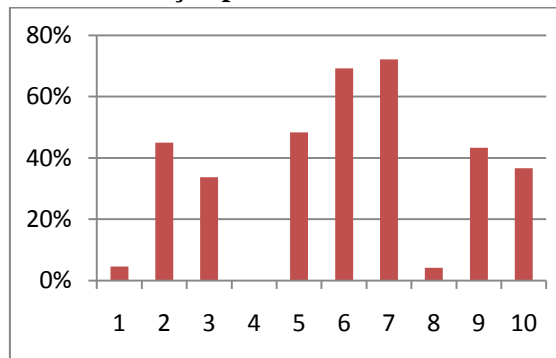


Gráfico 4.2 – Porcentagem de sucesso em critério ponderado

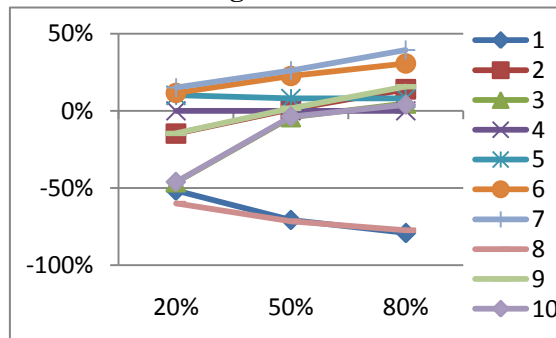


Gráfico 4.3 – Variação percentual média em relação ao peso da ocupação

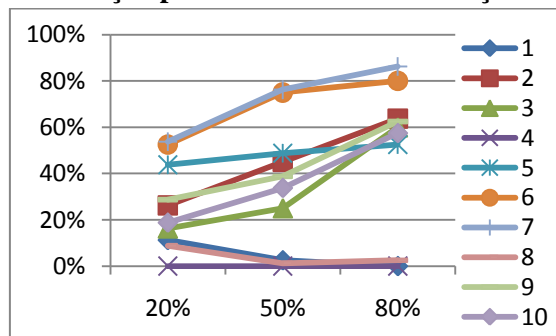
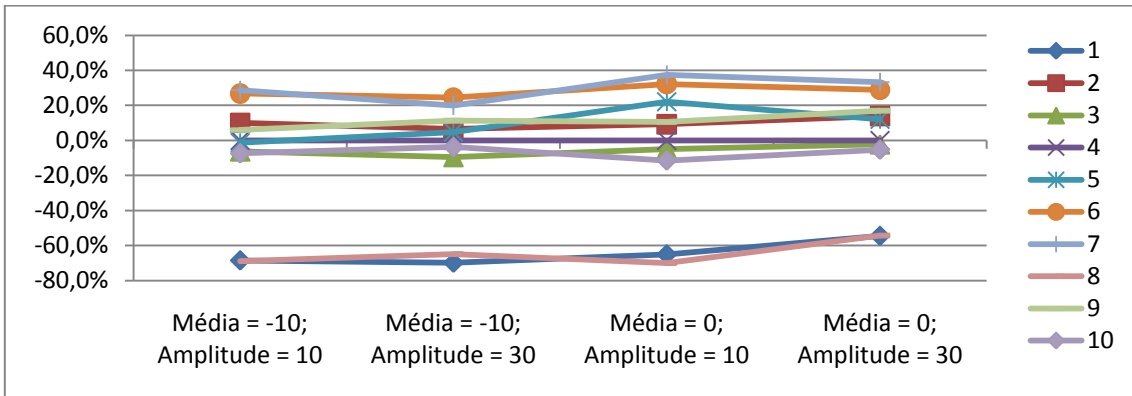
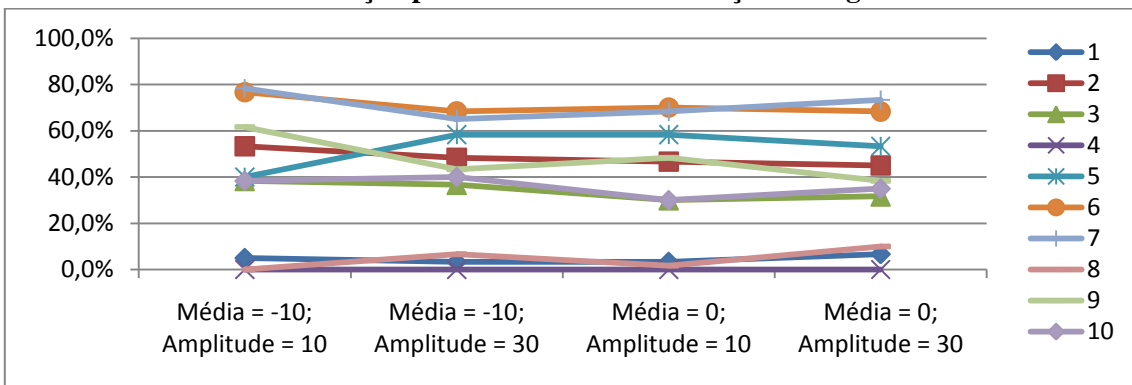


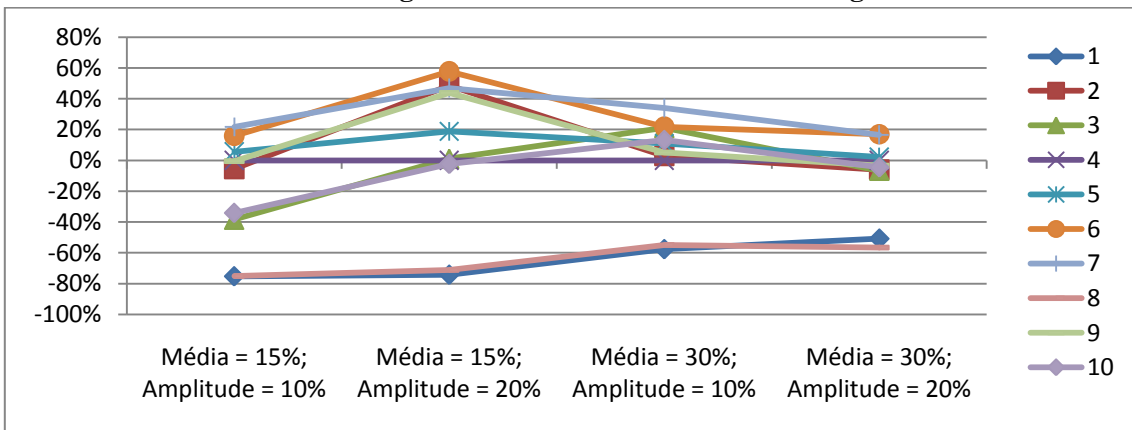
Gráfico 4.4 – Porcentagem de sucesso por peso de ocupação



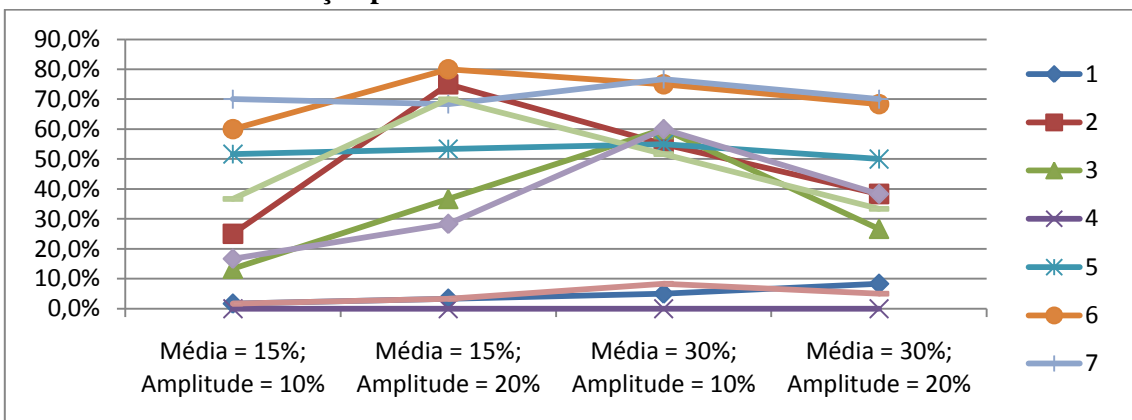
**Gráfico 4.5 – Variação percentual média em relação às folgas dinâmicas**



**Gráfico 4.6 – Porcentagem de sucesso de acordo com as folgas dinâmicas**



**Gráfico 4.7 – Variação percentual média de acordo com as dimensões dos itens**



**Gráfico 4.8 – Porcentagem de sucesso de acordo com as dimensões dos itens**



## 5. Discussão

A característica que mais chama atenção no conjunto de dados selecionados é a comparação entre os tipos de **viés de escolha de itens** no procedimento construtivo das heurísticas. Há uma superioridade nítida do conjunto que apresenta viés linear, que é mais tênue que os demais, com uma robustez que abarca os dois critérios de avaliação (bem como sua ponderação) e mantém resultados bons mesmo em diferentes ordenações iniciais.

Embora não haja grandes vantagens em média em relação à heurística 4 (probabilística sem viés), em geral duas ou as três versões deste viés conseguem manter-se com uma porcentagem de mais de 50% de sucesso comparativamente àquela.

Além dos bons resultados gerais, os corte analisados mostram que tal vantagem é suficientemente robusta em diferentes cenários: as três heurísticas apresentam-se superiores ou, no mínimo, próximas das melhor sucedidas em cada caso.

Outro fato interessante é a qualidade do procedimento probabilístico sem viés, ainda que o seu componente de escolha na fila de ordens disponíveis seja – por definição – aleatório. A exploração de trocas pela natureza probabilística se mostra tão rica que impõe um resultado que em média supera as heurísticas mais viesadas.

Pensando nas heurísticas determinísticas como o limite superior do viés de uma heurística probabilística (em que o primeiro item da fila tem 100% de chance de ser escolhido), pode-se inferir dos resultados que a diversificação das soluções construídas é mais benéfica que a ordenação inicial imposta aos itens. O estudo mostra não só que em média os resultados mais viesados (exponencial e determinístico) provêm piores soluções, como também o quanto são “sensíveis” a mudanças do entorno.

Surge o questionamento se existe uma região de “viés ótimo”, já que o viés tênue foi superior tanto à falta quanto ao excesso de tendências de escolha dos próximos itens.

Com relação à **ordenação inicial dos itens**, a intuição sugere que esta impacta nos resultados das heurísticas, potencializando o critério que privilegia. Isso fica especialmente visível quando os indicadores são olhados isoladamente. O que chama a atenção, na verdade, é a discrepância de desempenho entre tais conjuntos de heurística: as heurísticas 1 e 8 – ambos ordenadas inicialmente por folga dinâmica – tiveram uma *performance* nitidamente inferior às demais. À luz de um corte por distribuição das folgas dinâmicas, tais métodos são consistentemente mais fracos mesmo no critério em que teoricamente seriam diferenciados. Tais heurísticas ordenadas por data, pelo contrário, potencializam seu desempenho quando da avaliação exclusiva por esse critério.

Outro resultado interessante diz respeito à ordenação inicial por critério ponderado. Além de não ser imediata a relação detectada de melhor desempenho das heurísticas quando nesta situação, verifica-se que estas apresentam – via de regra – valores de atendimento de datas muito competitivos, o que não ocorre com tanta facilidade em termos de ocupação. Uma possível inferência da qualidade das soluções que se iniciam com esta ordenação é que esta impõe uma ordem que privilegia o critério mais importante, de acordo com os pesos atribuídos; porém promove uma “diversificação dirigida”, ou seja, mescla itens com menor qualidade no critério mais pesado, tendo estes o viés de terem alta qualidade no outro critério.

Os recortes por folga dinâmica e dimensão das peças mostraram poucos resultados interessante, convergindo mais ao esperado pela intuição.

Da implementação prática também surgem certas reflexões. Como o critério de atendimento de datas é preponderante pela parametrização, a ordem sequenciada dos padrões tem sua “espinha dorsal” ditada pelos valores deste critério. A dispersão dos pontos que concernem a avaliação de ocupação é maior do que do outro critério, evidenciando sua menor influência na decisão final. Entretanto, a ocupação apresenta-se ativa em dois tipos de situação, via de regra:

- em casos de valores muito próximos no valor de atendimento de datas, a ocupação serve como uma espécie de critério de desempate, enriquecido pela propriedade de eventualmente compensar o que poderia se chamar de “empate técnico” (valores normalizados muito próximos);

- em casos extremos de aproveitamento da ocupação, esta pode causar um salto qualitativo na prioridade do sequenciamento de um padrão de corte. Isto quer dizer que um padrão muito pior ocupado do que os demais precisam ter um valor de atendimento de data muito forte para se equivaler. O oposto também vale: ocupações muito maiores que o normal priorizam o padrão de corte em relação aos demais, mesmo sendo mais fraca em termo de urgência. Isso é particularmente relevante para casos em que há falta de ordens de um padrão de corte.

## 6. Estudo de caso

As heurísticas propostas foram implementadas na forma de um sistema em linguagem Visual Basic, com interface em uma planilha em Microsoft Excel®. Tal sistema está em fase de implantação atualmente, tendo como fator crítico de implementação a coleta sistemática dos dados de dimensões dos itens envolvidos. Em geral, tais informações existem de forma desestruturada (campos descritivos) no ERP (*enterprise resources planning*) da empresa, de forma a dificultar seu uso. Coletas paliativas estão suprindo seu uso durante os testes e adaptações estão sendo feitas para seu uso perene.

A coleta de dados dos itens e objetos foi feita junto aos centros de trabalho com ajuda dos supervisores e monitores das áreas, tanto do setor de PCP (planejamento e controle da produção) quanto de fabricação.

A heurística escolhida, com base nos resultados obtidos foi a probabilística ordenada inicial por critério ponderado com viés linear (heurística 7). Os motivos para tal residem não apenas no fato de ter sido o método com maior resultado geral observando os critérios ponderados, mas também pela robustez em relação a diferentes cenários de dimensões e folgas dinâmicas das peças.

A rodada foi parametrizada com 80% de importância para atendimento de datas e 20% para ocupação, de maneira alinhada com a característica deste ambiente de produção, em que paradas de linha de montagem têm um impacto muito forte no resultado geral da fábrica. Os critérios de parada foram mantidos os mesmos dos experimentos, já que os tempos computacionais encontrados não foram considerados proibitivos, por serem muito menores do que o tempo de execução de um lote.

O piloto realizado tomou a máquina de corte por fresamentos (*nesting*). Tomou-se uma fila real, que apresentava um total de **516 ordens**, que consolidavam **6332 peças**. As ordens estão distribuídas em **49 critérios de agrupamento**, que diferem entre si pelas espessuras e materiais das placas.

Foram gerados **63 padrões de corte** para o total de **1260 peças**. As avaliações de atendimento de datas e ocupação dos padrões estão retratadas no gráfico 5.1. Como a fila em questão é bastante grande, é apresentado um recorte dos primeiros padrões gerados no gráfico 5.1, pois são os que, de fato, serão executados com tais características.

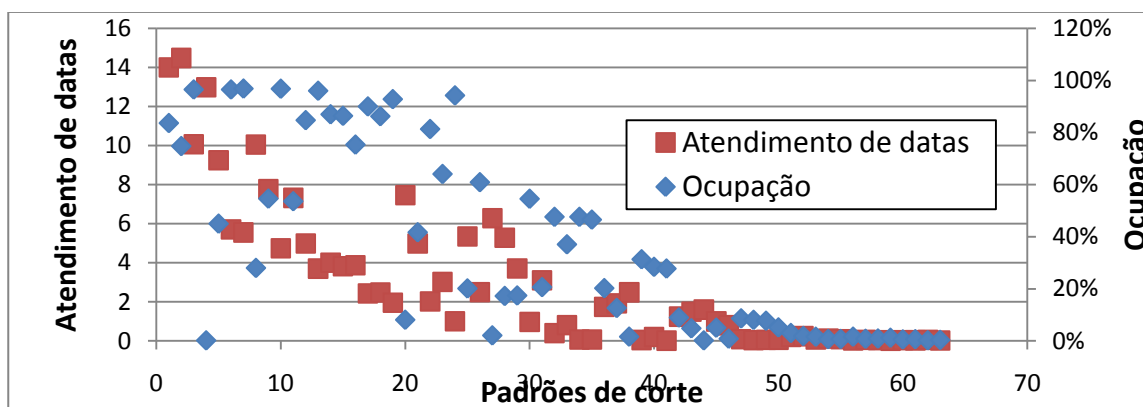


Gráfico 5.1 – Avaliações de atendimento de datas e ocupação dos padrões de corte gerados para o corte de chapas (caso bidimensional não-guilhotinado)

Como o critério de atendimento de datas é preponderante pela parametrização, a ordem sequenciada dos padrões tem sua “espinha dorsal” ditada pelos valores deste critério. A dispersão dos pontos que concernem a avaliação de ocupação é maior do que do outro critério, evidenciando sua menor influência na decisão final. Entretanto, a ocupação apresenta-se ativa nas situações evidenciadas no fim da seção 5.

## 7. Conclusões

O presente trabalho propôs-se a estudar o sequenciamento de ordens em centro de trabalho que apresentam a característica de operações em lotes, com a preocupação de equilibrar os objetivos de utilização da matéria-prima e atendimento de datas. A revisão da literatura mostra que se trata de uma intersecção pouco explorada de dois problemas bastante clássicos.

O estudo possibilitou a operacionalização de uma metodologia de apoio à decisão que efetuou o equilíbrio entre estas duas perspectivas. Em essência, a problemática proposta é retrato de um dos *trade-offs* vividos em sistemas produtivos entre o PCP e a fabricação. Neste sentido, uma metodologia flexível – por sua adaptabilidade em termos de pesos das ponderações, priorização dos objetos a serem escolhidos e uso de diferentes métodos heurísticos – dá à solução uma característica de robustez para enfrentar diferentes realidades encontradas nos centros produtivos ao longo do tempo.

Foram escolhidas as heurísticas construtivas, por sua agilidade de processamento, consonante com o contexto dinâmico de uma fábrica com milhares de itens e os mais diferentes roteiros de produção. A discussão do uso de heurísticas construtivas probabilísticas parece promissora no sentido de mitigar uma das deficiências iniciais de sua versão determinística: a de explorar de maneira muito pobre o espaço de soluções viáveis.

Da porção experimental do trabalho emergiram questões interessantes, tanto do ponto de vista teórico, quanto prático. Para o primeiro, ficam pontos a ser melhor debatidos como a influência de parâmetros como diferentes ordenações iniciais e vieses na eficácia das heurísticas. Do ponto de vista mais pragmático, as heurísticas mostraram desempenho satisfatório em termo de ocupação (acima de 80% para os primeiros padrões com um número de itens suficientes para tal), com o benefício de ter uma seleção orientada também ao atendimento de datas.

Como sugestões de estudos futuros, aponta-se:

- Exploração em maior profundidade da eficácia e eficiência de heurísticas construtivas probabilísticas, comparando com heurísticas de busca ou algoritmos otimizantes;
- Exploração de novos parâmetros na mesma lógica, sobretudo no que diz respeito ao viés de escolha e a ordenação inicial da fila;
- Desenvolvimento de procedimento análogo para o casos unidimensional, bidimensional guilhotinado, tridimensional.

## 8. Referências bibliográficas

- ALLAHVERDI, A.; NG, C. T.; CHENG, T. C. E.; KOVALYOV, M. Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 187, p. 985-1032, 2008.
- ARENALES, M.; MORABITO, R. An AND/OR-graph approach to the solution of two-dimensional non-guillotine cutting. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 87, p. 599-617, 1995.
- ARMBRUSTER, M. A solution procedure for a pattern sequencing problem as part of a one-dimensional cutting stock problem in the steel industry. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 141, p. 328-340, 2002.
- BICHOFF, E. E.; WÄSCHER, G. Cutting and Packing. Editorial. **European Journal of Operational Research**, v. 84, p. 503-505, 1995.

- BINKLEY, K. J.; HAGIWARA, M. Applying self-adaptive evolutionary algorithms to two-dimensional packing problems using a four corner's heuristic. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 183, p. 1230-1248, 2007.
- BROWN, A. R. Optimum Packing and Depletion: The Computer in Space – and Resource – Usage Problems. London: MacDonal & Co., 1971. 107 p.
- DOWNSLAND, K. A.; DOWNSLAND, W. B. Packing Problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 56, p.2-14, 1992.
- DOWNSLAND, K. A.; DOWNSLAND, W. B. Solution approaches to irregular nesting problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 84, p.506-521, 1995.
- DYCKHOFF, H. A typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 44, p. 145–159, 1990.
- FAGGIOLI, E.; BENTIVOGLIO, C. A. Heuristic and exact methods for the cutting sequencing problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 110, p. 564-575, 1998.
- FINK, A.; VOß, S. Applications of modern heuristic search methods to pattern sequencing problems. **Computers & Operations Research**, Oxford, v.26, p. 17-34, 1999.
- FOERSTER, H.; WÄSCHER, G. Simulated annealing for order spread minimization in sequencing cutting patterns. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 110, p. 272-281, 1998.
- GRAHAM, R. L.; LAWLER, E. L.; LENSTRA, J. K.; KAN, A. H. G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. **Annals of Discrete Mathematics**, Amsterdam, v.5, p. 287-326, 1979.
- HAESSLER, R. W.; SWEENEY, P. E. Cutting stock problems and solution procedures. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 54, p.141-150, 1991.
- LINHARES, A.; YANASSE, H. H. Connections between cutting-pattern sequencing, VLSI design, and flexible machines. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 29, p. 1759-1772, 2002.
- LODI, A.; MARTELLO, S.; VIGO, D. et al. Heuristic and Metaheuristic Approaches for a class of two-dimensional bin packing problems. **INFORMS Journal on Computing**, [Ottawa], v.11, p. 345-357, 1999.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 463 p.
- OLIVEIRA; FERREIRA. An improved version of Wang's algorithm for two-dimensional cutting problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 44, p. 256-266, 1990.
- PACHECO, R. F.; SANTORO, M. C. Proposta de Classificação Hierarquizada dos Modelos de Solução para o Problema de Job Shop Scheduling. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 6, n. 1, p. 1-15, 1999.
- PILEGGI, G. C. F.; MORABITO, R.; ARENALES, M. N. Heurísticas para os problemas de geração e sequenciamento de padrões de corte bidimensionais. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 27, p. 549-568, 2007.
- POLDI, K. C.; ARENALES, M. N. Heurística para o problema de corte de estoque unidimensional inteiro. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.26, n.3, p. 473-492, 2006.
- WANG, P. Y. Two algorithms for constrained two-dimensional cutting stock problems. **Operations Research**, Linthicum, v. 31, p. 573-586, 1983.
- WU, Y. L.; HUANG, W.; LAU, S. C.; WONG, C. K.; YOUNG, G. H. An effective quase-human based heuristic for solving the rectangle packing problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 141, p. 341-358, 2002.
- YANASSE, H. H. On a pattern sequencing problem to minimize the maximum number of open stacks. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 100, p. 454-463, 1997.
- YUEN, B. J. Heuristics for sequencing cutting patterns. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 55, p. 183-190, 1991.
- YUEN, B. J. Improved heuristics for sequencing cutting patterns. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 87, p. 57-64, 1995.