



## Heurística construtiva para o problema de planejamento da produção de papel e celulose

### Marcos Furlan

Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologias,  
Universidade Federal da Grande Dourados  
79804-970, Dourados, MS  
E-mail: marcosfurlan@ufgd.edu.br

### Bernardo Almada-Lobo

INESC-TEC, Faculdade de Engenharia,  
Universidade do Porto  
4200-465, Porto, Portugal  
E-mail: almada.lobo@fe.up.pt

### Maristela Santos

Instituto de Ciências Matemáticas e de  
Computação, Univeridade de São Paulo  
13560-970, São Carlos, SP  
E-mail: mari@icmc.usp.br

### Reinaldo Morabito

Departamento de Engenharia de Produção,  
Universidade Federal de São Carlos  
13565-905, São Carlos, SP  
E-mail: morabito@ufscar.br

### Resumo

Este trabalho apresenta uma heurística construtiva para o problema de planejamento da produção em indústria integrada de papel e celulose. A heurística baseia-se na escolha gulosa dos tipos de papéis para gerar rapidamente planos de produções. Outros procedimentos são utilizados para definir níveis de estoque, tamanhos de lotes e velocidades de trabalho do digestor. Um método de factibilização é utilizado quando não for possível gerar soluções factíveis, modificando planos de produção criados inicialmente. Os resultados computacionais indicam que a heurística obtém soluções factíveis em 0,29 segundos na média. Estas soluções podem ser bons pontos de partidas para métodos mais complexos.

**Palavras-chave:** Otimização, Planejamento da Produção, Heurística construtiva, Indústria integrada de papel e celulose.

### Introdução

Este trabalho apresenta uma heurística construtiva gulosa com o objetivo de gerar soluções iniciais para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes aplicado à indústria integrada de produção de papel e celulose. Neste processo produtivo, a celulose produzida no primeiro estágio é consumida pelas máquinas de papel do segundo estágio. Além do equipamento de produção de celulose, denominado digestor, e das máquinas produtoras de papel, este processo produtivo contém ainda tanques de estocagem de celulose e uma linha de recuperação química de licor negro fraco, como apresentado na Figura 1. A linha de recuperação química é composta por tanques de estocagem, evaporador e caldeira. Além disso, pode possuir turbinas de geração de energia elétrica, alimentadas pelo vapor gerado na caldeira. O vapor pode ser utilizado no digestor (processo de cozimento), no evaporador (evaporação da água), nas máquinas de papel (secagem das folhas de papel), entre outros.

Variados problemas da indústria de papel e celulose foram investigados na literatura. Svensson et al. [10] e Jönsson et al. [6] abordam o problema de utilização do vapor produzido, e Claassen [1] trata o problema de mistura de celulosas e da alocação de refinadores. O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes aplicado a este tipo de processo produtivo foi anteriormente estudado em [9], [3], [4] e [5]. Santos and Almada-Lobo [9] consideram um problema integrado de planejamento da produção em uma empresa portuguesa produtora de papel e celulose. Figueira et al. [3] estendem o modelo matemático de [9], para considerar ciclos de produção de papel, nos quais o papel produzido no início de cada ciclo deve ser igual ao papel que finaliza-o e os atrasos no atendimento da demanda existentes no seu início devem ser atendidos até o final do mesmo. Em [4] é desenvolvido um sistema de suporte a decisões para a empresa produtora de papel e celulose considerada em [9], onde o problema de planejamento da produção

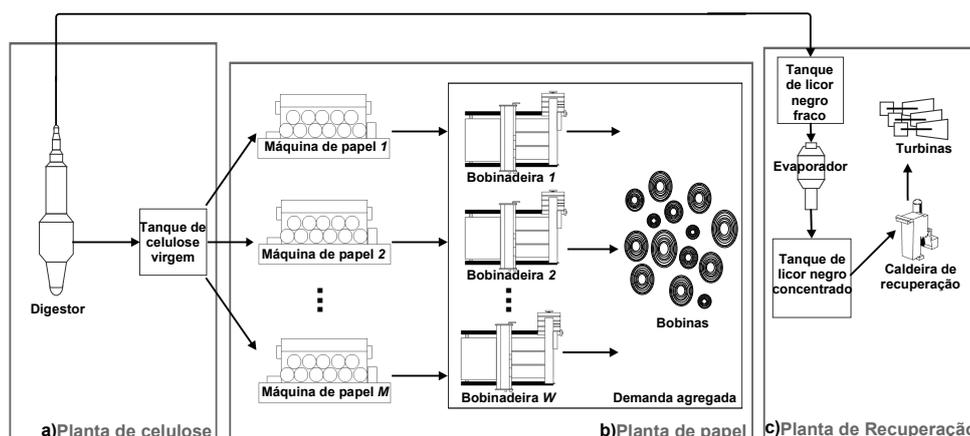


Figura 1: Ilustração do problema abordado neste trabalho.

é integrado a entrega de produtos finais para clientes com diferentes tipos de prioridades. Furlan et al. [5] estendem o modelo matemático de [9] para o contexto de múltiplas máquinas produtoras de papel.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma heurística construtiva que possa gerar soluções iniciais para o problema de planejamento da produção considerado. O método de solução deve definir as quantidades e a sequência de tipos de papéis produzidos em cada máquina, além da velocidade de trabalho do digestor durante o horizonte de planejamento. Na função objetivo do problema são utilizados os custos de estoque de tipos de papéis, custos associados a atrasos na entrega de demanda dos clientes e custos decorrentes das preparações de máquinas para a produção dos papéis. Desta forma, o método desenvolvido deve gerar planos de produção que reduzam os custos associados a produção de papel e sejam factíveis para todos os recursos limitados. A heurística construtiva foi desenvolvida para ser executado rapidamente e ser capaz de gerar soluções de qualidade razoável. Isto possibilita que suas soluções sejam utilizadas como ponto de partida de métodos de melhoria ou sejam injetadas como soluções iniciais em ferramentas de solução de problemas inteiros mistos.

### Heurística construtiva gulosa

Uma heurística construtiva gulosa tem por objetivo gerar rapidamente soluções de qualidade aceitável. Estas heurísticas são também conhecidas como “heurísticas míopes”, por resolverem o problema iterativamente, escolhendo as melhores decisões em cada passo sem se preocupar com os passos futuros. Isto gera decisões de alta qualidade nas iterações iniciais, no entanto, tende a construir soluções globais pouco eficientes por deixar para os últimos passos as tarefas mais problemáticas [8]. A heurística construtiva gulosa desenvolvida parte da ordenação dos tipos de papel pelo valor monetário da tonelada dos mesmos (*price*), dividido pela sua taxa de produção (*b*). Desta forma, é possível definir o valor monetário gerado ao produzir um papel *j* por uma hora da seguinte forma:  $rp_j = price_j/b_j$ . Primeiramente, os papéis são ordenados pelo valor de  $rp_j$  de forma decrescente e as alocações ocorrem de acordo com a demanda  $D_j$ . Como os custos de atraso e de estoque são calculados a partir do preço dos papéis, espera-se que alocar a demanda dos papéis mais caros antes possa gerar um custo total menor. Por outro lado, esta prática não leva em consideração a redução nos custos de preparação de máquina, podendo gerar altos custos nesta parcela da função objetivo. Por este motivo, uma heurística de re-sequenciamento é usada para reduzir este custo de produção. Esta heurística foi proposta em [5], sendo aplicada nos indivíduos da população inicial do algoritmo genético.

As velocidades do digestor são definidas por meio de uma heurística recursiva, que tenta determinar uma sequência de velocidades capaz de atender as demandas de celulose virgem da máquina de papel, respeitando os limites de estocagem de celulose virgem e licor negro fraco. Caso não seja possível encontrar



um conjunto de velocidades que atenda essas condições, uma heurística de factibilização é executada. Esta heurística troca alguns papéis alocados, com o intuito de diminuir ou aumentar o consumo de celulose virgem, dependendo do limite de capacidade que está sendo violado. Quando o estoque de celulose torna-se baixo, papéis com alta taxa de consumo de celulose são aleatoriamente escolhidos e trocados por papéis com menor taxa de consumo. No caso de violações do estoque máximo de celulose, os papéis de taxa de consumo menor são trocados por opções com consumo maior. Utilizou-se aqui o conceito de períodos e micro-períodos do modelo matemático GLSP (*General Lotsizing and Scheduling Problem*) [7]. Um período equivale a um dia de trabalho enquanto micro-períodos, são dados em horas de trabalho. Cada período contém um conjunto de micro-períodos e em cada um destes, apenas um tipo de papel pode ser produzido nas máquinas de papel e apenas uma velocidade pode ser utilizada no digestor. No GLSP, os micro-períodos têm tamanho variáveis que são definidos durante a resolução do modelo matemático (variáveis do problema). Para possibilitar uma resolução direta dos tamanhos de lotes de produção e das demais variáveis reais do problema sem o uso de modelos matemáticos e ferramentas de solução LP/MIP, os micro-períodos de produção são divididos em tamanhos iguais. A divisão equitativa dos micro-períodos gera soluções que são factíveis no modelo matemático, no entanto, pode deteriorá-las devido a redução de flexibilidade. Por outro lado, o problema pode ser resolvido através de procedimentos mais rápidos. A heurística conta com um único parâmetro, denominado  $\alpha$ , que deve ser previamente ajustado e fixado para todos os exemplares de teste. Este parâmetro indica qual a demanda mínima exigida para que a produção de um tipo de papel seja alocada em um micro-período. Um papel  $i$  é alocado para ser produzida sempre que a demanda acumulada for superior ao mínimo  $\alpha$  do tamanho do micro-período.

### Método de definição de velocidades de trabalho do digestor

A velocidade de trabalho do digestor é definida de forma iterativa, seguindo o horizonte de planejamento do início para o final. Sempre que uma violação nos limites de estoques for detectada, o processo retorna aos micro-períodos anteriores, ajustando a velocidade de trabalho do digestor sem violar o limite de mudança destas velocidades. Inicialmente, as velocidades do digestor ( $v_s$ ) são alocadas de acordo com a velocidade inicial ( $v_0$ ). Os níveis dos estoques intermediários, a produção e o consumo de cada item são calculados em seguida, levando-se em conta o balanceamento e os limites dos estoques existentes. Se ocorrer falta de celulose virgem simultânea ao excesso de licor negro fraco ou concentrado, não existe conjunto de velocidades capaz de gerar solução factível, pois as quantidades produzidas de licor negro e celulose são diretamente proporcionais. Em seguida, faz-se a redução da velocidade do digestor sempre que o nível de algum dos três estoques for superior ao seu limite máximo. O procedimento retorna iterativamente até encontrar um micro-período no qual a redução de velocidade do digestor não viole o limite de troca. Após a mudança de velocidade, a busca por violações retorna para  $s'$  para verificar se as alterações não geraram novas violações. Finalmente, os níveis de estoque são atualizados e o método retorna a busca por outras violações. O procedimento inverso (de aumento da velocidade do digestor) tem funcionamento similar ao apresentado para o caso anterior.

### Heurística gulosa de melhoria da sequência de produção

Esta heurística visa reordenar os papéis que devem ser produzidos nos micro-períodos de um mesmo período (dia). O método tenta reduzir os custos de preparação de máquina sem alterar custos de estoque e atraso, que são computados apenas no final de cada período. Considere um horizonte de planejamento com três micro-períodos por período e uma máquina de papel. Na primeira iteração podem haver trocas entre os papéis dos micro-períodos 1, 2 e 3. Na segunda iteração, as trocas podem ocorrer entre os papéis dos micro-períodos 4, 5 e 6, e assim por diante. Para múltiplas máquinas, a heurística percorre os micro-períodos da mesma forma, podendo trocar papéis entre máquinas. Este procedimento é feito para todos os períodos do horizonte de planejamento, iniciando a partir do primeiro período.



## Experimentos computacionais

Durante os experimentos computacionais foram utilizados 540 exemplares de testes com características variadas. As instâncias têm 1 e 2 máquinas produtoras de papel; 7, 15 e 30 períodos, contando com 3 e 4 micro-períodos em cada período; quantidades de tipos de papéis produzidos variam entre 8, 16 e 24; além de 15 diferentes cargas de trabalho baseadas nos recursos produtivos. Foram feitos testes computacionais variando o parâmetro  $\alpha$  em intervalos de 0, 1, iniciando com  $\alpha = 0$  e cada exemplar foi resolvido 5 vezes por variante. A heurística construtiva gulosa obteve soluções factíveis rapidamente, com tempo de solução médio de 0,29 segundos para cada exemplar. A Tabela 1 apresenta para cada variante da heurística (de acordo com o valor de  $\alpha$  fixado) os desvios padrões mínimo, médio e máximo, o tempo computacional médio e a quantidade de melhores soluções obtidas. Os desvios percentuais foram calculados com base em limitantes inferiores obtidos pela ferramenta de solução LP/MIP Cplex após uma hora de execução considerando o modelo de [5]. Em geral, os resultados de desvio percentual médio obtidos são próximos e variam 1,44% entre a maior e a menor valores. Os tempos médios de solução são ainda mais próximos e variam de 0,28 a 0,31 segundos. O percentual de melhores soluções teve variação superior aos demais parâmetros de comparação, na qual a variante P1 obteve a maior quantidade de melhores soluções. É importante ressaltar que a soma das quantidades de melhores soluções pode ser superior a 100%, pois dois ou mais métodos podem encontrar uma mesma solução, contabilizada como melhor para ambos os métodos. Para as comparações de curvas de desempenho, foram selecionadas 3 variantes, sendo elas: P1 que obteve a maior quantidade de melhores soluções, P2 que obteve o menor desvio percentual médio e P10 que obteve o menor desvio percentual de todos os testes computacionais.

Tabela 1: Desvio percentual das soluções da heurística gulosa.

Variante	$\alpha$	Mínimo(%)	Médio(%)	Máximo(%)	Tempo médio (s)	Melhores soluções (%)
P0	0,0	11,76	32,20	69,34	0,28	7.44
P1	0,1	10,11	32,04	73,23	0,31	<b>21.74</b>
P2	0,2	11,80	<b>31,81</b>	<b>69,01</b>	0,28	12.93
P3	0,3	11,79	32,14	71,93	0,28	9.85
P4	0,4	11,65	32,74	73,20	0,28	6.11
P5	0,5	11,21	32,96	73,07	0,28	4.96
P6	0,6	10,81	33,13	73,60	0,30	6.93
P7	0,7	10,77	33,25	74,83	0,30	8.00
P8	0,8	10,64	32,86	76,10	0,30	9.44
P9	0,9	10,12	32,60	72,72	0,30	12.63
P10	1,0	<b>9,76</b>	32,26	74,52	0,30	18.56
Total geral		9,76	32,54	76,10	0,29	

A Figura 2 apresenta o gráfico com as curvas de desempenho (DM) [2] que compara as variantes P1, P2 e P10. Podemos verificar neste gráfico que as curvas de desempenho das 3 variantes são bem similares. A variante P1 continua com maior quantidade de melhores soluções em relação às demais curvas ( $\tau = 1$ ), encontrando a melhor solução em 41,41% dos casos. A partir de  $\tau = 1,046$ , a variante P2 se mostra superior, ou seja, ela tem uma porcentagem maior de resultados no máximo 4,6% pior do que as soluções mínimas encontradas. Neste mesmo ponto, P10 alcança desempenho similar a P1, sendo superior em algumas partes e inferior em outras. Mesmo não sendo a melhor variação de  $\alpha$  para  $\tau > 1,046$ , P1 obteve maior quantidade de melhores soluções em relação às demais variantes. Isto destaca esta variante das demais, sendo a mais promissora para o uso de soluções em procedimentos mais complexos.

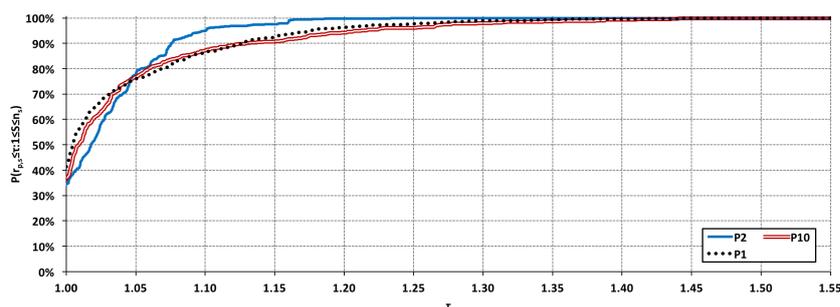


Figura 2: Gráfico de curvas de desempenho dos quatro melhores conjuntos de parâmetros da heurística gulosa.

## Conclusões

A heurística construtiva desenvolvida apresentou bom desempenho, pois foi capaz de resolver todos os exemplares de teste em tempo computacional reduzido. Estes tempos computacionais sugerem que seu uso em conjunto com métodos de melhoria pode ser vantajoso. O ajuste do parâmetro  $\alpha$  gerou variações pequenas nos resultados de desvio médio, mas mostrou considerável variação na quantidade de melhores soluções. Mais estudos são necessários para comparar os resultados obtidos com métodos de solução da literatura. Além disso, a combinação desta heurística com métodos de melhoria e o seu uso para gerar soluções iniciais para ferramentas LP/MIP podem ser considerados em pesquisas futuras.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2011/00274-8.

## Referências bibliográficas

- [1] GDH Claassen. Mixed integer (0–1) fractional programming for decision support in paper production industry. *Omega*, 43:21–29, 2014.
- [2] Elizabeth D Dolan and Jorge J Moré. Benchmarking optimization software with performance profiles. *Mathematical programming*, 91(2):201–213, 2002.
- [3] Gonçalo Figueira, Maristela Oliveira Santos, and Bernardo Almada-Lobo. A hybrid vns approach for the short-term production planning and scheduling: A case study in the pulp and paper industry. *Computers & Operations Research*, 40(7):1804–1818, 2013.
- [4] Gonçalo Figueira, Pedro Amorim, Luís Guimarães, Mário Amorim-Lopes, Fábio Neves-Moreira, and Bernardo Almada-Lobo. A decision support system for the operational production planning and scheduling of an integrated pulp and paper mill. *Computers & Chemical Engineering*, 77(0):85–104, 2015.
- [5] Marcos Furlan, Bernardo Almada-Lobo, Maristela Santos, and Reinaldo Morabito. Unequal individual genetic algorithm with intelligent diversification for the lot-scheduling problem in integrated mills using multiple-paper machines. *Computers & Operations Research*, 59(0):33 – 50, 2015.
- [6] Johanna Jönsson, Inger-Lise Svensson, Thore Berntsson, and Bahram Moshfegh. Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of sweden–part 2: Results for future energy market scenarios. *Energy Policy*, 36(11):4186 – 4197, 2008.
- [7] H. Meyr. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *European Journal of Operational Research*, 120(2):311 – 326, 2000.
- [8] Gerhard Reinelt. *The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1994. ISBN 3-540-58334-3.
- [9] Maristela Oliveira Santos and Bernardo Almada-Lobo. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1):1 – 12, 2012.
- [10] Inger-Lise Svensson, Johanna Jönsson, Thore Berntsson, and Bahram Moshfegh. Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of sweden–part 1: Methodology. *Energy Policy*, 36(11):4178 – 4185, 2008.