

Uma abordagem de solução híbrida baseada em algoritmo genético para o problema de planejamento e sequenciamento da produção em indústria de papel e celulose

Marcos Mansano Furlan

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, Av.
Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13560-970, Brasil
mafurlan@icmc.usp.br

Bernardo Almada-Lobo

INESC-TEC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n,
Porto 4200-465, Portugal
balobo@fe.up.pt

Maristela Oliveira Santos

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, Av.
Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13560-970, Brasil
mari@icmc.usp.br

Reinaldo Morabito Neto

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, Rod.
Washington Luís KM 235, São Carlos 13565-905, Brasil
morabito@ufscar.br

RESUMO

Este artigo aborda um problema de planejamento e sequenciamento da produção encontrado em indústria de papel e celulose utilizando um algoritmo genético modificado. A planta industrial considerada tem processo produtivo multi-estágio, onde todos os níveis e unidades produtivas são consideradas de forma integrada. As unidades críticas consideradas são: digestor contínuo, estoques intermediário de celulose e licor negro (resíduos), múltiplas máquinas de papel e linha de recuperação de resíduos. O algoritmo genético proposto agrega um novo processo de diversificação dinâmica que tem início e interrupção de acordo com a dispersão relativa da população. Esta dispersão é calculada com relação a frequência dos genes dentro da população. Apresentamos também novos operadores de mutação, além de verificar operadores da literatura. Os resultados experimentais mostram evidências de que o método proposto é competitivo com outras ferramentas da literatura. Estas evidências são mais claras para instâncias de maior porte (tamanho mais próximo de casos reais).

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo genético; Indústria de papel e celulose; Planejamento e sequenciamento da produção com máquinas paralelas.

1. Introdução

A indústria de papel e celulose é composta em sua maioria por empresas de grande porte e suas linhas produtivas são compostas por diferentes unidades produtivas. Uma indústria básica apresenta: digestor, máquina de papel, tanques de estoque intermediário e planta de recuperação química. Para uma melhor gestão dos recursos produtivos, o planejamento da produção deve ser realizado considerando todas estas unidades de forma integrada, com o objetivo de minimizar custos e garantindo todas as restrições produtivas.

Santos e Almada-Lobo (2012) consideram uma indústria Portuguesa de papel e celulose com uma máquina de papel. O problema é abordado utilizando modelo de programação

inteira mista (MILP) e resolvido por meio de uma abordagem combinada das heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. Figueira et al. (2013) considera características adicionais no problema de Santos e Almada-Lobo (2012) como ciclos de produção e garantias de entrega da demanda atrasada. Neste caso foi apresentada uma meta-heurística do tipo VNS e seus resultados foram superiores aos apresentados pelo método de Santos e Almada-Lobo (2012).

Este trabalho teve o objetivo de estender o modelo matemático de Santos e Almada-Lobo (2012) para tratar o problema com múltiplas máquinas de papel e apresentar novo método de solução. O algoritmo genético desenvolvido introduz novos operadores como, por exemplo, a diversificação dinâmica. O processo é iniciado/interrompido sempre que a dispersão da população ultrapassa um dos limites definidos a priori. O intuito é que a dispersão controlada propicie a continuidade da convergência da solução para mínimos locais melhores. Durante o processo de diversificação, a taxa de mutação é incrementada, para re-introduzir valores de genes perdidos no processo evolutivo. Além disso, aumentamos a taxa de aceitação de indivíduos menos adaptados (soluções piores), desde que estes introduzam mais variabilidade a população.

2. Descrição do problema

Neste trabalho considera-se um meio produtivo como apresentado na Figura 1. Três plantas são integradas pelo fluxo de produtos intermediários (licor negro, celulose virgem e reciclada). A planta de polpa é composta de digestor contínuo (produz celulose e licor negro), planta de produção de celulose reciclada e tanques de estocagem de celulose virgem e reciclada. A planta de papel é composta pelas máquinas de papel (produz bobinas jumbo de papel por meio da mistura de celulose virgem e reciclada) e pelas bobinadeiras/cortadoras (produção de bobinas menores e retângulos). Estas últimas não serão consideradas, pois o problema de corte associado às bobinas/jumbos não será abordado. A planta de recuperação contém estoques intermediários de licor negro fraco e concentrado além do evaporador (concentra o teor sólido do licor negro retirando água), da caldeira de recuperação química (produz vapor e resíduos inorgânico sólido) e turbinas geradoras de energia elétrica.

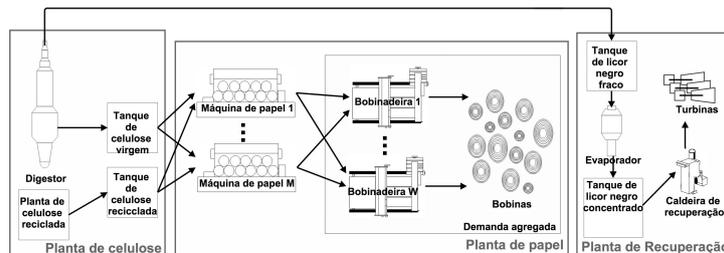


Figura 1: Ilustração de meio produtivo integrado de papel e celulose com múltiplas máquinas.

3. Abordagem de solução

Nesta seção caracterizaremos brevemente o algoritmo genético proposto. Ele é composto por um método de solução exato dentro de um algoritmo genético (AG). O método de solução exato é responsável pela solução dos sub-problemas lineares, enquanto o AG determina o valor das variáveis de decisão (binárias). Ferramentas como o processo de diversificação, ativo por meio da variável *divFlag*, foram desenvolvidos para melhorar o desempenho do método. Outros operadores como, por exemplo, a decodificação do indivíduo e o número variável de micro-períodos entre indivíduos foi determinado para garantir algumas restrições do problema e ajustar melhor a discretização do horizonte de planejamento, respectivamente. Apresentamos a seguir o pseudo-código do método e uma breve descrição de cada procedimento.

População inicial representa a construção das soluções iniciais (*pop*) que pode ser feita

Algorithm 1: Pseudo-código do algoritmo genético híbrido.

```
1 População inicial(pop);
2 Heurística gulosa de sequenciamento(pop);
3 Ajuste de parâmetros(mutprob,  $\varphi$ , divFlag);
4 Avaliação(pop,  $\varphi$ );
5 Seleção(pop);
6 while tempo limite não for atingido do
7   Cruzamento(pop);
8   Ajuste de parâmetros(mutprob,  $\varphi$ , divFlag);
9   Mutação(pop, mutprob);
10  Avaliação(pop,  $\varphi$ );
11  Seleção(pop);
12  Diversificação(pop, divFlag);
13 end
14 Retorna a melhor solução;
```

de forma aleatória ou através de heurística. Neste trabalho testamos as duas opções e optamos pela criação aleatória, pois apresentou melhor desempenho geral do método. A *heurística gulosa de sequenciamento* troca a sequência de produção dentro de cada macro-período do horizonte de planejamento com o intuito de reduzir o custo de preparação de máquina (inicialmente alto). O *ajuste de parâmetros* é responsável pela modificação das probabilidades de mutação (*mutprob*) e pelo ajuste do parâmetro de diversificação φ . O parâmetro de diversificação indica o quanto estamos dispostos a “perder” em qualidade de solução para ganhar em variabilidade. Na *avaliação* são resolvidos os sub-problemas gerados por cada indivíduo e calculadas as aptidões (*fitness*) dos mesmos. Na *seleção* são definidos quais indivíduos sobreviverão para a próxima geração, de acordo com a pressão de seleção ajustada a priori. Neste trabalho optamos por utilizar seleção por torneio de dois, amplamente utilizado em outros trabalhos da literatura.

O *cruzamento* é responsável por misturar duas soluções gerando duas novas soluções. Aqui optamos por outro operador conhecido e amplamente utilizado, o cruzamento de dois pontos. Na *mutação* passamos por um conjunto de seis diferentes mutações: mutação simples, que troca o valor de um único gene; mutação por troca, que muda o valor de dois genes (troca os valores entre eles); mutação por inserção, que adiciona um valor em uma posição aleatória, empurrando todos os genes para frente até uma outra posição escolhida aleatoriamente que é removida; mutação por sequencia, que troca a sequencia de produção de forma aleatória dentro de um macro-período; mutação de micro-períodos, que altera a quantidade de micro-períodos do indivíduo; e mutação por campanha, que tenta aumentar o tamanho das campanhas produtivas de um mesmo item trocando o valor do gene para o mesmo valor de um “vizinho”.

O início e final do processo de diversificação são definidos de acordo com cálculos de espalhamento da população (frequência média de cada gene). Quando a similaridade se torna superior a um determinado limitante, o processo de diversificação é iniciado, aumentando gradativamente *mutProb* e mudando φ para o valor φ^{max} definido a priori. Neste caso, soluções piores podem ser aceitas, desde que adicionem a devida variabilidade a população. Quando o espalhamento da população for suficientemente grande (similaridade menor que um limitante inferior), o processo termina e *mutProb* é reposta ao padrão. O parâmetro φ é reduzido de forma gradativa, até o valor φ^{min} , para que a variabilidade não seja excluída da população instantaneamente.

4. Resultados computacionais

As instâncias foram geradas por meio de uma modificação do gerador proposto por Figueira et al. (2013), que usa como base os dados obtidos por Santos e Almada-Lobo (2012) na indústria Portuguesa. As alterações contam ainda com adaptações feitas para ajustar as instâncias para o problema considerado, por exemplo, o uso de múltiplas máquinas de papel. Os perfis de

demanda das instâncias variam entre 65% e 85% da capacidade das máquinas de papel e foram aleatoriamente gerados de acordo com uma distribuição uniforme. Além disso, os valores de estoque inicial foram gerados numa faixa de 80% a 120% do valor original dos dados.

Os preços foram gerados de acordo com a média dos preços de venda da carteira de pedidos e são utilizados para calcular os custos de estoque, preparação de máquina e atraso, na função objetivo. As instâncias geradas têm horizonte de planejamento de 7, 15 e 30 dias (períodos) e 8 ou 16 itens finais. Foram considerados também 3 ou 4 turnos de produção associados a uma ou duas máquinas de papel, totalizando 3 a 4 micro-períodos por dia para o caso com uma máquina e 6 a 8 micro-períodos por dia no caso de duas máquinas. Para cada combinação de valores foram geradas 10 instâncias, totalizando 160 instâncias.

Os resultados são comparados de forma agregada através de gráficos de desempenho (Dolan e More, 2002). Neste tipo de gráfico um conjunto de soluções é comparado entre dois ou mais métodos através da diferença percentual com a menor solução encontrada por este conjunto de métodos. O eixo das abscissas define a diferença percentual τ das soluções de cada método com relação a melhor solução. O eixo das ordenadas, por outro lado, define a porcentagem de soluções de cada método que tem qualidade melhor ou igual a τ , ou seja, a porcentagem de vezes em que $\frac{t_{ps}}{\min(t_{ps}:s \in S)} \leq \tau$ onde t_{ps} representa o valor da solução do problema p pelo método de solução s e S é o conjunto de todas as abordagens de solução avaliadas.

A Figura 2 apresenta a performance de três métodos (GA, VNS e Cplex) para as instâncias com uma máquina de papel. A versão 12.2 do Cplex foi utilizada com os parâmetros padrão, VNS é uma adaptação do método de solução apresentado por Figueira et al. (2013) o algoritmo genético proposto. Neste caso, podemos verificar que o Cplex tem um número maior de melhores soluções ($\tau = 0$), mas é rapidamente ultrapassado pelo GA em $\tau = 1.02$, ou seja, o método proposto apresenta um número maior de soluções com no máximo 2% pior do que a melhor solução encontrada. De uma forma geral, visualmente verificamos que a curva de performance do GA é superior aos demais métodos. Ambas heurísticas resolvem todas as instâncias, enquanto o Cplex resolve cerca de 90% dentro do limite de 3600 segundos. É importante ressaltar que a adaptação do VNS pode ter reduzido sua eficiência quando comparado com o Cplex.

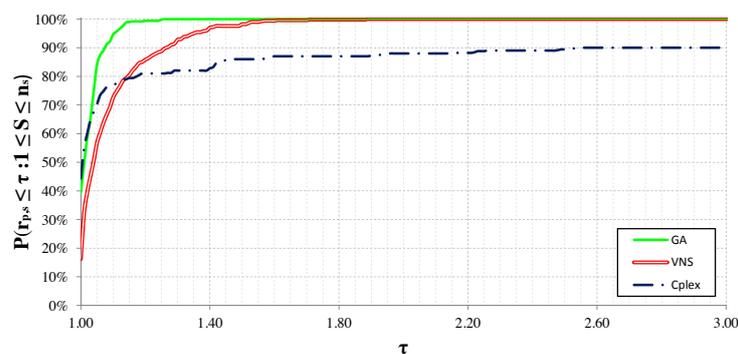


Figura 2: Gráfico de curvas de desempenho para instâncias com uma máquina de papel.

A Figura 3 apresenta as curvas de performance do GA e Cplex para as instâncias com duas máquinas. O VNS de Figueira et al. (2013) não foi testado, pois não foi desenvolvido para esta classe de problemas. A curva de desempenho do GA domina totalmente a curva do Cplex. A porcentagem de melhores soluções do GA é de 74.4% e ele resolve cerca de 81.4% dos casos, enquanto o Cplex inicia com 7.4% de melhores soluções e resolve 62% dos casos testados.

5. Conclusões e perspectivas

Este trabalho aborda o problema de planejamento e sequenciamento da produção na indústria de papel e celulose. O intuito foi estender o modelo matemático de Santos e Almada-

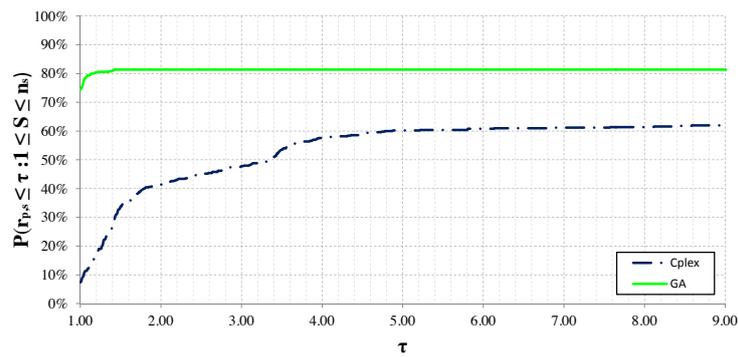


Figura 3: Gráfico de curvas de desempenho para instâncias com duas máquinas de papel.

Lobo (2012) para tratar problemas com múltiplas máquinas de papel e desenvolver método de solução para este caso mais geral. O método de solução é híbrido de algoritmo genético e método de solução exato. Ele conta com um novo processo de diversificação, novos operadores de mutação e representação de indivíduo com tamanho variável. Operadores da literatura também foram implementados e seus resultados foram analisados.

Os resultados demonstraram o bom desempenho do método nos casos testados. Ele obteve melhores soluções na maioria dos casos e resolveu um número maior de problemas, superando os métodos VNS de Figueira et al. (2013) e a ferramenta de solução IBM Cplex 12.2.

Como pesquisa futura, podem ser verificadas melhorias para a modelagem matemática como, por exemplo, reformulações, desigualdade válidas ou outros paradigmas de discretização do horizonte de planejamento. Modelos que misturem planejamento detalhado a curto prazo e agregado no longo prazo também podem ser considerados em combinação com abordagens de solução de horizonte rolante. Com relação ao algoritmo genético, podemos verificar a utilização de outros operadores, a criação de múltiplas populações e a definição de uma quantidade variável de micro-períodos em casa dia do plano de produção, por exemplo.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece subsídios concedidos pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo número 233210/2012-1 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) contrato número 2011/00274-8.

O segundo autor agradece ao Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) pelo subsídio concedido através do projeto NORTE-07-0124-FEDER-000057, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 - O Novo Norte), ao abrigo do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN).

Referências

- Dolan, E. D.; More, J. J.** (2002). Benchmarking optimization software with performance profiles. *Mathematical programming*, 91(2), 201–213.
- Figueira, G.; Oliveira Santos, M.; Almada-Lobo, B.** (2013). A hybrid vns approach for the short-term production planning and scheduling: A case study in the pulp and paper industry. *Computers & Operations Research*.
- Santos, M. O.; Almada-Lobo, B.** (2012). Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 1 – 12.