

DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES APLICADO À INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE COM SEQUÊNCIAS PRÉ-DEFINIDAS DE PRODUÇÃO

¹Rafael Ribeiro Meireles; ¹rafael.ribeiro.meireles@bol.com.br; ¹Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD);

²Marcos Mansano Furlan; ²marcosfurlan@ufgd.edu.br; ²Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD);

RESUMO: *Devido à importância do setor e a competitividade nacional e internacional, estudos dirigidos a diversas áreas dentro da indústria de papel e celulose são de extrema relevância para melhoramento das ferramentas de planejamento e controle da produção. Neste trabalho, tem-se como foco o planejamento operacional de produção, pois o mesmo tem um maior detalhamento em relação a sua sequência de produção diária e tem horizontes de planejamento estimados em até 30 dias. Com isso o objetivo deste estudo é propor a melhoria no processo de sequenciamento e dimensionamento dos lotes produzidos em uma planta de produção de papel e celulose. O processo produtivo abordado neste trabalho é dividido em três setores: planta de celulose, planta de papel e planta de recuperação química. Dentre os trabalhos estudados verificou-se a existência de uma modelagem matemática que se mostrou adequada para adaptação ao problema tratado. A modelagem foi aplicada a um problema de dois estágios proveniente da indústria de vidro. Como verificado no caso da indústria de papel e celulose, a indústria de vidro tem dois estágios de funcionamento distinto. No primeiro nível, são produzidos recursos de forma contínua que são utilizadas como matéria-prima no segundo estágio que trabalha com produção discreta de produtos. Estas sequências são vantajosas do ponto de vista do tomador de decisão e simplificam o planejamento da produção com a combinação de sequências conhecidas previamente.*

PALAVRAS-CHAVE: *Pesquisa operacional; modelagem matemática; planejamento da produção.*

ABSTRACT: *Due to the importance of the sector and the national and international competitiveness, studies directed to several areas in the pulp and paper industry are extremely relevant for the improvement of production planning and control tools. This work is focused on the operational planning of production, since it has a greater detail in relation to its daily production sequence and it has planning horizons estimated in up to 30 days. Thus, this study objective is to improve the sequencing and sizing of lots produced in a pulp and paper production plant. The productive process addressed in this work is divided into three sectors: pulp mill, paper mill and chemical recovery plant. Among the studied cases, it was verified the existence of an adequate mathematical modeling for adaptation to the treated problem. The modeling was applied to a two-stage problem from the glass industry. As seen in the pulp and paper industry case, the glass industry has two distinct operating stages. In the first level, resources are continuously produced to be used as raw materials in the second stage that works with discrete production. These sequences are advantageous from the decision maker standpoint and simplify production planning with the combination of sequences previously known.*

KEYWORDS: *Operational research; mathematical modeling; production planning.*

1. Introdução

A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) associação responsável pela representação institucional da cadeia produtiva de árvores plantadas, a qual reúne as empresas e entidades que participavam de outras associações relacionadas ao mercado de árvores em geral, inclusive a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa). Esta associação tem como visão que o futuro de plantio de árvores como matéria-prima renovável e reciclável é menos

agressiva ao meio ambiente, e a biodiversidade tem um potencial gigantesco. Ela estimula as empresas do setor a investirem seus recursos, chegando a uma estimativa de investimento de R\$ 40 bilhões até 2020 (IBÁ, 2018). Ainda conforme IBÁ (2018), tem-se um total de 7,8 milhões de hectares de árvores plantadas (eucalipto, pinus e diversos) atualmente, os quais 34% são destinados ao setor de celulose e papel.

Alguns indicadores econômicos expõem o setor de árvores como de relevância nacional, tem-se que em 2015 a receita bruta foi de R\$ 69 bilhões, representando 6% do Produto Interno Bruto (PIB) Industrial. As exportações no período representam um montante de U\$ 9 bilhões equivalentes a 4,7% das exportações brasileiras. O setor gera tributos federais, estaduais e municipais no valor de R\$ 11,3 bilhões, equivalente à 0,9% da arrecadação nacional (IBÁ, 2018).

Segundo Furlan (2016) o problema de sequenciamento da produção envolve decisões mais detalhadas para definir a sequência na qual a produção se dará no curto prazo. Esse problema, em geral, está associado às decisões do dia-a-dia do chão de fábrica. Quando colocado junto ao problema de dimensionamento de lotes, as decisões de sequenciamento tornam-se relevantes e podem influenciar de forma importante os resultados obtidos no dimensionamento de lotes. Isto pode ocorrer devido às preparações de máquina dependentes da sequência ou ainda por causa de outras características do problema.

Diversos estudos são tratados na literatura sobre o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com sequências pré-definidas de produção. Dentre os trabalhos relacionados na literatura pode-se citar: Guimarães *et al.* (2013), Gunther (2014), Furlan *et al.* (2015), cujo sistemas produtivos são similares ao caso estudado neste trabalho e Wei *et al.* (2017), estudo no qual baseou-se a modelagem matemática deste projeto.

O trabalho de Guimarães *et al.* (2013) se refere ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, com uma única máquina com restrição de capacidade e com tempos e custos de preparação de máquina dependente da sequência. Este artigo traz uma nova modelagem matemática com intuito de obter melhores resultados em relação a outros modelos comparados. O modelo foi utilizado como base na concepção de uma metaheurística que incorpora cálculos de custos reduzidos no processo construtivo e de melhoria de heurísticas baseadas na formulação matemática do problema (*MIP-based heuristics*). Este método efetua uma exploração da vizinhança evitando o aprisionamento local e é conduzido a um vizinho

que segue algumas regras de seleção. Este estudo foi realizado com instâncias variadas e efetuou-se comparações, sendo que os autores concluíram que o modelo é eficaz e que este método pode ser aplicável através de testes computacionais a outros tipos de problemas de dimensionamento de lotes ou até mesmo em problema fora dessa conjuntura.

Gunther (2014) estuda o planejamento de blocos contínuos baseados no dimensionamento e sequenciamento dinâmico, o qual trabalha com um conceito de representação contínua dos tempos. O modelo apresentado é uma formulação de otimização linear inteira mista, determinando o tamanho e o tempo dos lotes de produção individual em um sistema de produção em um único estágio, objetivando diminuir o *makespan*. Este modelo insere a concepção de grupos de produtos similares nas mesmas famílias com um setup comum, e a produção de variantes desses produtos dentro de uma família em uma sequência pré-definida. Este trabalho foi aplicado em uma indústria de bebidas o qual se mostrou adequado, conforme resultados obtidos.

Furlan *et al.* (2015) tratam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de papel e celulose envolvendo várias máquinas de papel. Os autores consideram o processo de produção integrado com múltiplas unidades, como o digestor de trabalho contínuo, estoque intermediário de celulose e licor negro, e uma linha de recuperação para os resíduos do processo. Este estudo apresenta um modelo de programação inteira mista, bem como uma abordagem baseada em algoritmo genético com um modelo de programação linear. Os resultados computacionais obtidos mostram a eficácia deste método para resolução de grandes problemas com múltiplas máquinas de papel.

Wei *et al.* (2017) consideram um processo de produção em dois estágios, o primeiro estágio as matérias-primas são transformadas em recursos e são destinadas ao segundo estágio, que são demandadas para produção de itens finais. Os tempos de setup e os custos dependem do processamento no primeiro estágio, cujo sequenciamento da produção depende de uma programação mínima com informações sobre a família de produtos, recursos compartilhados e seus processos de fabricação. Baseado em diferentes modelos matemáticos para a produção no primeiro estágio, os autores desenvolveram um modelo orientado à sequência e um modelo orientado ao produto. Propuseram também heurísticas com base na decomposição para resolver de forma eficiente esse problema. Este modelo pode ser aplicado em vários casos industriais com características similares.

O interesse por problemas integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes é motivado pela crescente integração em várias situações práticas e também pelas dificuldades associadas à integração de dois problemas bastantes tratados na literatura. O objetivo do problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes é definir quando produzir e quanto produzir de cada produto, de forma que atenda a demanda dos clientes, com o menor custo possível.

O problema abordado neste trabalho é dividido em três plantas produtivas: planta de celulose, planta de papel e planta de recuperação. A produção de celulose virgem é realizada no digestor, gerando o licor negro fraco, um resíduo desse processo. A celulose virgem é enviada ao tanque de estocagem para depois ser consumida pelas máquinas de papel, enquanto que o licor negro fraco segue para a linha de recuperação química. As máquinas de papel produzem diversas gramaturas, conforme seu ajuste e demanda do cliente, gerando bobinas jumbos, as quais são posteriormente cortadas em rolos menores ou em forma de retângulos de acordo com o pedido do cliente. A linha de recuperação química tem estoque de licor negro fraco e concentrado, evaporador e caldeira de recuperação química, além de turbinas para geração de energia proveniente do vapor produzido na caldeira.

2. Objetivo

Visto à importância do setor e à competitividade nacional e internacional, estudos dirigidos a diversas áreas dentro dessa indústria é de extrema relevância para melhoramento das ferramentas de planejamento e controle da produção. O problema aqui abordado visa atender com maior foco o nível operacional de produção, pois o mesmo tem um maior detalhamento em relação a sua sequência de produção diária e tem horizontes de planejamento estimados em 30 dias. Com isso o objetivo deste estudo é propor a melhoria no processo de sequenciamento e dimensionamento dos lotes produzidos em uma planta de produção de papel e celulose.

3. Descrição do problema

O problema abordado neste estudo tem como características o trabalho de Furlan (2016), cuja fábrica é dividida em três plantas produtivas, são elas: planta de celulose, planta de papel e planta de recuperação química. A Figura 1 ilustra este problema e a seguir cada planta será descrita com maior detalhamento.

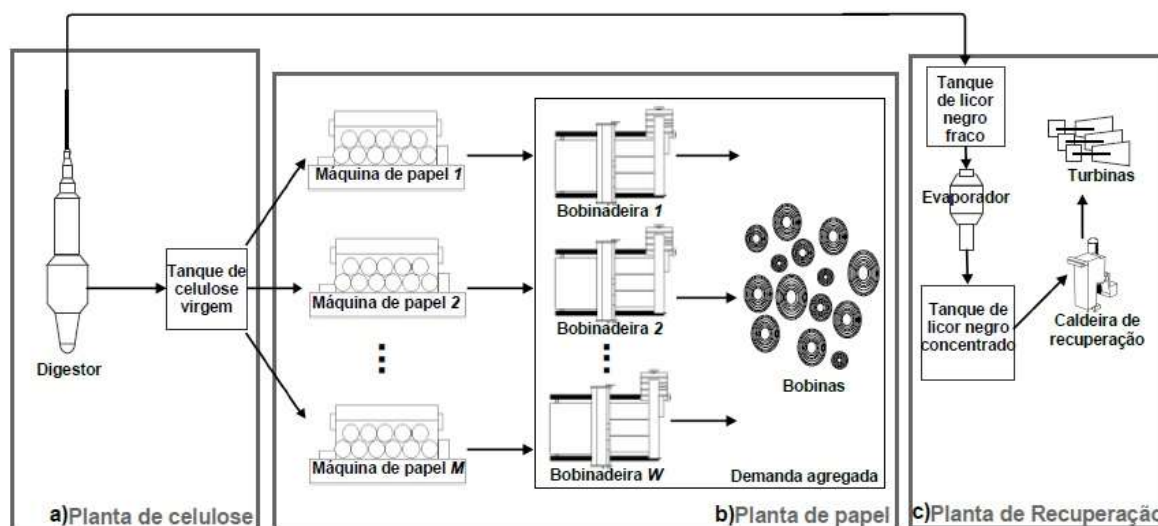


FIGURA 1 – Ilustração do problema abordado. Fonte: Furlan (2016).

A planta de celulose é composta por um digestor e um tanque de armazenamento de celulose virgem, neste caso os papéis produzidos serão compostos apenas por celulose virgem. O digestor funciona de maneira contínua e a taxa de produção de celulose e licor negro é definida por sua velocidade de trabalho. A velocidade de produção do digestor é um ponto crítico desta planta, pois sua variação pode comprometer a estabilidade do equipamento. O tanque de celulose virgem trabalha com limites máximo e mínimo que devem ser atendidos de forma que a pressão de entrada e saída seja satisfeita. A celulose é enviada para as máquinas de papel de modo independente, com isso as máquinas não competem pela quantidade de celulose virgem contida no tanque, assim a variação do consumo de uma máquina não afeta o fluxo de saída de celulose para as outras.

A planta de papel contém múltiplas máquina de papel e também bobinadeiras. Coloca-se assim M máquinas de papel que produzem jumbos que são consumidas por W bobinadeiras. Para este estudo cada máquina de papel pode produzir para diversas bobinadeiras e essas podem consumir jumbos de mais de uma máquina. A combinação de produção e consumo depende do peso do jumbo e de seu comprimento. Cada máquina de papel e bobinadeira tem intervalos satisfatórios para estas características dos jumbos que são produzidos e consumido.

Neste trabalho foi considerado múltiplas linhas produtoras de papel, com sequenciamentos independentes, com isso não precisam produzir utilizando as mesmas sequências de produção uma da outra. Todas as linhas podem produzir todos os itens de papéis solicitados. Cada linha tem sua capacidade produtiva definida pela máquina de papel, visto que o corte dos jumbos

não será considerado neste estudo. Custos, perdas e tempos estão ligados às trocas de itens produzidos em cada máquina de papel, estes são definidos pelas características da máquina e pela sequência de gramaturas a serem produzidas, portanto a preparação da máquina depende da sequência de gramaturas.

A planta de recuperação química é composta por tanques de armazenamento de licor negro fraco e concentrado, evaporador, caldeira de recuperação e turbinas de geração de energia elétrica. O digestor produz como resíduo do processo de cozimento da celulose o licor negro fraco. Em seguida este licor é colocado no evaporador, no qual é reduzido seu volume de água. Como resultado desse processo tem-se o licor negro concentrado, que é armazenado em um tanque. Seguidamente este licor negro concentrado é queimado na caldeira de recuperação, gerando resíduos e vapor. O vapor excedente é enviado as turbinas para geração de energia elétrica, este ainda é utilizado em várias partes do processo produtivo, por exemplo na secagem das folhas de papel. Devido ao alto custo da caldeira de recuperação, este se torna frequentemente o gargalo da produção. Todo o licor negro deve ser tratado, e, caso haja excesso, as velocidades do digestor e do evaporador são reduzidas para que a caldeira consiga tratá-lo de forma adequada. Assim influenciando diretamente na produção de papel.

4. Modelagem matemática

4.1 Primeiro estágio

O primeiro estágio controla o processo produtivo da planta de celulose. As restrições (1.1) garantem que apenas uma sequência de trabalho será escolhida. As restrições (1.2) garantem que a primeira velocidade do período t é igual a última velocidade do período $t-1$. Para permitir que uma velocidade v seja utilizada para produção de celulose se a sequência escolhida estiver na mesma velocidade na posição p temos as restrições (1.3). As restrições (1.4) garantem que a soma do tempo de produção da velocidade v , na posição p , do período t , é igual ao tempo total na posição p do período t .

A somatória do tempo de produção de todas as posições p no período t é igual a capacidade do período t , conforme restrições (1.5). As restrições (1.6) definem as quantidades de celulose produzida a partir do fator de conversão do tempo de produção. As restrições (1.7) definem o balanceamento de estoque de celulose virgem do período t na posição p . As restrições (1.8)

garantem limites de estoque de celulose virgem. E por fim, as restrições (1.9) garantem a limitação do tempo mínimo de produção do digestor quando ocorre a troca de velocidade.

$$\sum_{s \in S} W_{st}^d = 1, \quad \forall t \in T \quad (1.1)$$

$$\sum_{s \in S | S_1=v} W_{st}^d = \sum_{s \in S | S_{|s|=v}} W_{s,t-1}^d, \quad \forall v \in V, \quad t \in T \quad (1.2)$$

$$D_{vtp}^d \leq q_t \cdot \sum_{s \in S | S_p=v} W_{st}, \quad \forall v \in V, \quad t \in T, \quad p \in P_s \quad (1.3)$$

$$\sum_{v \in V} D_{vtp}^d = D_{tp}, \quad \forall v \in V, \quad t \in T, \quad p \in P_s \quad (1.4)$$

$$\sum_{p \in P_s} D_{tp} = q_t, \quad \forall t \in T \quad (1.5)$$

$$X_{tp}^{dig} = \alpha \cdot \sum_{v \in V} SP_v \cdot D_{vtp}^d, \quad \forall v \in V, \quad t \in T, \quad p \in P_s \quad (1.6)$$

$$X_{tp}^{dig} + I_{t,p-1}^{virg} = \sum_{m \in M} O_{mtp}^{virg} + I_{tp}^{virg}, \quad \forall t \in T, \quad p \in P_s \quad (1.7)$$

$$I_{min}^{virg} \leq I_{tp}^{virg} \leq I_{max}^{virg}, \quad \forall t \in T, \quad p \in P_s \quad (1.8)$$

$$D_{vtp}^d \geq D_{min}^d, \quad \forall v \in V, \quad t \in T, \quad p \in P_s \setminus 1 | S_p \neq S_{p-1} \quad (1.9)$$

TABELA 1 – Parâmetros referente ao primeiro estágio.

Dados	
S	Conjunto de sequências ($s \in S$).
T	Conjunto de períodos ($t \in T$).
V	Conjunto de velocidades do digestor ($v \in V$).
P_s	Conjunto de posições na sequência (digestor) ($p \in P_s$).
M	Conjunto de máquinas de papel ($m \in M$).
r	Sequência (máquina de papel).
j	Tipos de produtos.
α	Fator de produção de celulose.
SP_v	Vetor de conversão das velocidades do digestor (em rpm).
q_t	Tempo total de produção de celulose no período t (horas).
D_{min}^d	Tempo mínimo de produção em uma certa velocidade no digestor (horas).
Variáveis	
D_{vtp}^d	Tempo de produção de celulose no período t na velocidade v na posição p da sequência (horas).
D_{tp}	Tempo de produção de celulose total no período t na posição p (horas).
X_{tp}^{dig}	Quantidade de celulose produzida no período t na posição p (m^3).
I_{tp}^{virg}	Estoque no período t na posição p (m^3).
O_{mtp}^{virg}	Quantidade de celulose consumida pela máquina m no período t na posição p (m^3).
$W_{st}^d \in \{0,1\}$	1 se a sequência s for escolhida para ser utilizada no período t , 0 caso contrário.

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

4.2 Segundo estágio

A planta de papel é referente ao segundo estágio de produção, o qual considera múltiplas máquinas de papel que trabalham de forma paralela. As restrições (2.1) garantem que apenas uma sequência será escolhida. As restrições (2.2) garantem que o tempo de produção mais o

tempo de preparação da máquina m , no período t , na posição p igual ao tempo total de produção no período t na posição p .

Para permitir que o item j produzido na máquina m seja usado para produção se a sequência escolhida estiver na mesma posição p , na máquina m , tem-se as restrições (2.3). As restrições (2.4) somam as quantidades de celulose utilizadas na produção dos papéis com as perdas nas preparações de máquina para computar o total de celulose virgem consumida na máquina m , no período t na posição p . As restrições (2.5) garantem que a quantidade produzida do item j na máquina m na posição p no período t seja igual ao tempo dividido pela taxa de produção. Já as restrições (2.6) fazem o balanceamento do estoque. E por último as restrições (2.7) garantem a limitação de tempo mínimo de produção na máquina m , quando ocorrer troca de produção.

$$\sum_{r \in R_m} Z_{rmt} = 1, \quad \forall m \in M, \quad t \in T \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in K} D_{jmtp} + \sum_{r \in R_m} st_{r_{p-1}, r_{pm}} \cdot Z_{rmt} = D_{tp}, \quad \forall m \in M, \quad t \in T, p \in P, \quad j \in K \quad (2.2)$$

$$D_{jmtp} \leq q_t \cdot \sum_{r \in R_m | r_p = j} Z_{rmt}, \quad \forall j \in K, \quad t \in T, \quad p \in P_r, r \in R_m \quad (2.3)$$

$$\sum_{v \in V} \frac{b_{jm}^{virg}}{b_{jm}} \cdot D_{jmtp} + \sum_{r \in R_m} sl_{r_{p-1}, r_{pm}} \cdot Z_{rmt} = O_{mtp}^{virg}, \quad \forall j \in K, t \in T, p \in P_r, r \in R_m, m \in M \quad (2.4)$$

$$X_{jmtp} = \frac{1}{b_{jm}} \cdot D_{jmtp}, \quad \forall j \in K, t \in T, p \in P_r, \quad m \in M \quad (2.5)$$

$$\sum_{\substack{m \in M \\ s \in S_t}} X_{jmtp} + IG_{j,t-1}^+ - IG_{j,t-1}^- = D_{jmtp} + IG_{jt}^+ - IG_{jt}^-, \quad \forall j \in K, p \in P_r, m \in M, t \in T \quad (2.6)$$

$$D_{jmtp} \geq D_{min}, \quad \forall j \in K, t \in T, r \in R_m, p \in P_r \setminus 1 | r_p \neq r_{p-1}, \quad m \in M \quad (2.7)$$

TABELA 2 – Parâmetros referente ao segundo estágio.

Dados	
st_r	Tempo de setup na posição p, na máquina m de acordo com a sequência escolhida (horas).
b_{jm}^{virg}	Porcentagem de celulose virgem contida no item j na máquina m.
b_{jm}	Taxa de produção do item j na máquina m (m ³ /hora).
sl	Tempo de perda com setup (horas).
D_{min}	Tempo mínimo de produção na máquina de papel m quando ocorrer uma troca de itens produzidos (horas).
R_m	Conjunto de sequências ($r \in R_m$).
P_r	Conjunto de posições na sequência (máquina de papel) ($p \in P_r$).
Variáveis	
Z_{rmt}	Seleção de uma única sequência.
$D_{jmt p}$	Tempo de produção do item j na máquina m no período t na posição p (horas).
x_{jmt}	Quantidade do item j produzido na máquina m no período t.

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

4.3 Função objetivo

A função objetivo (2.8) mescla os vários custos em uma única função monetária. Foram considerados os custos de estoque, atraso, preparação de máquina e uma pequena penalização referente à troca de sequências.

$$\min \sum_{\substack{j \in K \\ t \in T}} h_{jt}^+ \cdot IG_{jt}^+ + \sum_{\substack{j \in K \\ t \in T}} h_{jt}^- \cdot IG_{jt}^- + \sum_{\substack{r \in R_m \\ m \in M \\ t \in T}} \hat{sc}_r \cdot Z_{rmt} + \sum_{\substack{s \in S \\ t \in T}} \varepsilon \cdot \hat{\mu}_s \cdot W_{st} \quad (2.8)$$

5. Considerações finais

A modelagem matemática em questão foi aplicada a um problema de dois estágios com aplicação na indústria de vidro. Como verificado no caso da indústria de papel e celulose, a

indústria de vidro tem dois estágios de funcionamento distinto. No primeiro nível, são produzidos recursos de forma contínua, utilizadas como matéria-prima no segundo estágio. O segundo estágio por sua vez trabalha com produção discreta de produtos. Esta modelagem matemática da literatura foi adaptada ao problema estudado e uma nova formulação foi proposta para resolver o problema abordado com o uso de sequências pré-definidas de produção.

Testes computacionais exaustivos se fazem necessário, em estudos futuros, para comparar os ganhos da modelagem com relação à prática industrial e métodos de solução propostos na literatura para problemas correlatos.

Referências

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Celulose**. Disponível em: <<http://iba.org/pt/produtos/celulose>>. Acessado em: 02 mar. 2018.

FURLAN, M. M. **Abordagens para o problema de dimensionamento e sequenciamento da produção em indústrias integradas de papel e celulose**. Tese apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP. São Carlos. 2016.

FURLAN, M. M.; ALMADA-LOBO, B.; SANTOS, M.; MORABITO, R. Unequal individual genetic algorithm with inteligente diversification for the lot-scheduling problem in integrated mills using multiple-paper machines. **Computers & Operations Research**. Elsevier. 2015.

GUIMARÃES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Princing, relaxing and fixing under lot sizing and scheduling. **European Journal of Operational Research**. Elsevier. 2013.

GUNTHER, H. The block planning approach for continuous time-based dynamic lot sizing and scheduling. **Business Research**. 2014.

WEI, W.; GUIMARÃES, L.; AMORIM, P.; ALMADA-LOBO, B. Tactical production and distribution planning with dependency issues on the production process. **Omega**. Elsevier. 2017.