

MINIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE *SETUP* ENTRE LOTES EM UMA MÁQUINA DE PAPEL-CARTÃO

Autores: Gabriela Rodrigues Niquini (Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais) e-mail: gabrielaniquini@gmail.com
 Mauricio Cardoso de Souza (Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais) e-mail: prof.mauriciodesouza@gmail.com
 Claudeci Coutinho de Oliveira (Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S/A) – e-mail: claudeci@klabin.com.br
 Osvaldo Vieira (Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S/A) – e-mail: osvaldov@klabin.com.br
 Esly Ferreira da Costa Junior (Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais) e-mail: esly@deq.ufmg.br

RESUMO

Frete à crescente atenção dada aos aspectos ambientais e econômicos da produção, o sequenciamento das atividades coloca-se como abordagem valiosa. Este trabalho visa otimizar a produção em uma indústria de papel-cartão voltada para embalagens, de modo a possibilitar uma menor geração de subprodutos e melhor utilização da capacidade produtiva. Os lotes de variadas gramaturas e composições são produzidos em uma máquina operando em regime contínuo. Nas trocas entre lotes, há um período de tempo em que se produz refugo e papel de qualidade inferior, considerados subprodutos. A duração deste período depende dos papéis envolvidos na troca, tornando possível reduzir o tempo total de *setup* por meio da alteração da sequência de produção. O presente trabalho se propõe a minimizar o tempo total de *setup*, alterando a ordem dos lotes de uma sequência fornecida pela indústria. Empregou-se a formulação do problema do caixeiro viajante, com três modelos para as restrições de sub-rotas. Obteve-se um tempo total de *setup* igual a 1020 minutos, 27,6% inferior ao tempo da sequência planejada pelo corpo técnico da indústria.

Palavras-chave: embalagens; otimização; sequenciamento; *setup* dependente da sequência

INTRODUÇÃO

A otimização industrial possui por objetivo sugerir maneiras mais eficientes para a realização de atividades, assegurando o cumprimento e a qualidade das mesmas. Essa abordagem torna-se cada vez mais relevante tendo em vista a elevada concorrência em determinados mercados e a necessidade ambiental e econômica de redução dos desperdícios. O sequenciamento da produção é uma das decisões passíveis de otimização, visando, por exemplo, a redução no tempo total para a execução das tarefas (*makespan*), a redução da soma dos atrasos ou a diminuição do tempo total de *setup*.

Este trabalho se propõe a resolver o problema do sequenciamento de lotes em uma indústria de papel-cartão, voltada para o mercado de embalagens. A produção de embalagens de papel encontra-se em ascensão neste século, devido ao aumento global no consumo de produtos industrializados. CAPO (2018) destaca o crescimento na utilização de papéis-cartão e papéis ondulados, colocando como causas o crescimento da classe média, a urbanização dos mercados em desenvolvimento e a expansão das compras realizadas pela internet (*e-commerce*). A Figura 1 ilustra o comportamento e a tendência na produção de papéis para variadas aplicações, destacando-se a queda na fabricação de papéis gráficos e o aumento na produção de papéis-cartão e embalagens onduladas.

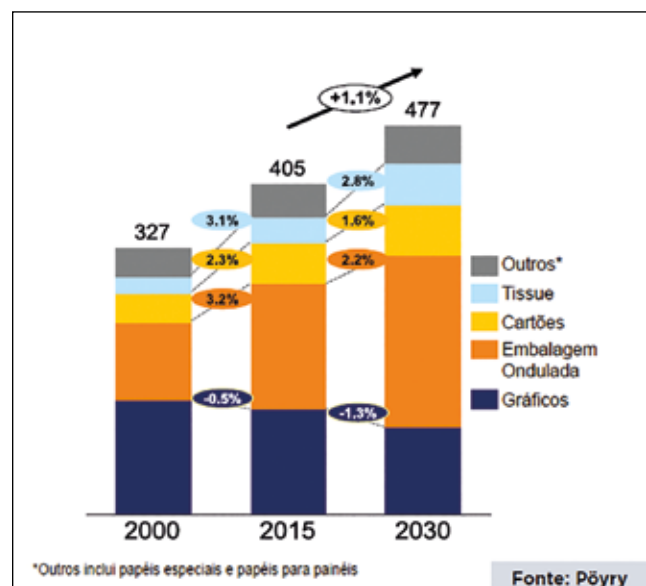


Figura 1. Produção global de variedades de papel, em milhões de toneladas. Fonte: CAPO (2018). (Tissue: papéis para uso sanitário)

Autora correspondente: Gabriela Rodrigues Niquini (Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais) e-mail: gabrielaniquini@gmail.com

O papel-cartão possibilita a construção de embalagens leves, de rápida degradação no meio ambiente, além de recicláveis e providas de matéria-prima renovável. Duas das principais categorias de papel-cartão, elencadas por ROBERTSON (2013), são as *folding box boards* e as *liquid packaging boards*. As *folding box boards* são folhas utilizadas para caixas de medicamentos, chás, alimentos congelados, entre outros, e as *liquid packaging boards* são utilizadas em caixas longa-vida para bebidas. Estas contam com um revestimento de polietileno de baixa densidade (PEBD), para garantir a impermeabilidade, e uma folha de alumínio, que funciona como uma barreira para a luminosidade e os gases.

Trabalhos publicados na literatura dedicam-se a estudar o emprego dos conceitos de otimização industrial à produção de papel e celulose. RAISER e OLIVEIRA (2020) ilustram a aplicação da gestão da informação e ferramentas da qualidade na produção de papéis para fins sanitários (*tissue*). Os autores ressaltam a relevância de sistemas ciber-físicos – redes de informação virtuais – para o compartilhamento rápido de informações, visando reduzir perdas no processo, falhas em equipamentos e instabilidade da produção. No trabalho de SANTIAGO *et al.* (2019), os autores apresentam os resultados da implementação de um sistema de controle no processo de picagem de cavacos em uma indústria de celulose. O resultado obtido foi o aumento na produção de cavacos, possibilitando maior fabricação de celulose.

Uma revisão abrangente acerca de metodologias e aplicações industriais para os modelos de sequenciamento foi realizada por HARJUNKOSKI *et al.* (2014). Nesse trabalho, os autores reforçam a necessidade de aliar as mais variadas técnicas de otimização existentes na literatura à realidade industrial. Essas técnicas se dividem entre os métodos exatos e heurísticos. Os métodos exatos, ou de programação inteira mista (MIP – *mixed integer programming*), fornecem garantidamente o ponto ótimo e são mais adequados para problemas com número menor de variáveis, em função de seu mais elevado tempo computacional. Os métodos heurísticos, por sua vez, não necessariamente encontram o ponto ótimo, mas, se executados de maneira adequada, são capazes de fornecer uma solução suficientemente adequada em um tempo menor e, por esse motivo, são preferencialmente utilizados em problemas com mais variáveis. Como problemas de sequenciamento são tipicamente NP-difíceis, isto é, ainda não são conhecidos métodos que os resolvam de maneira exata em tempo polinomial, é comum a resolução de instâncias maiores por meio dos métodos heurísticos.

LE HESRAN *et al.* (2019) realizam uma revisão acerca de sequenciamento visando redução na geração de rejeitos no contexto industrial e, para indústrias de papel, são destacados os problemas de corte atrelados à programação da produção. O trabalho de ALMADA-LOBO *et al.* (2015) consiste em uma visão a respeito da aplicação industrial de pro-

blemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Um dos desafios citados para as indústrias de papel diz respeito ao *setup* dependente da sequência, aspecto abordado no presente trabalho. São citados dois exemplos de artigos nesta área: em SANTOS e ALMADA-LOBO (2012) o problema de sequenciamento é resolvido para uma planta integrada de celulose, papel e geração de energia, utilizando o método *relax-and-fix*, em que algumas variáveis inteiras são fixadas e outras relaxadas, de modo a agilizar a resolução do MIP. Outro trabalho citado foi escrito por FURLAN *et al.* (2015) o qual trata de uma planta integrada de celulose e papel, propondo-se a resolver o dimensionamento e sequenciamento integrados para múltiplas máquinas de papel, utilizando a meta-heurística do algoritmo genético.

O trabalho de FIGUEIRA *et al.* (2015) se propõe a realizar o dimensionamento e sequenciamento otimizados de lotes em uma indústria de celulose e papel, objetivando maximizar o lucro e observando restrições de cumprimento da demanda e disponibilidade de matéria-prima. O método de otimização utilizado baseou-se na decomposição do problema em subproblemas, os quais foram resolvidos por técnicas de programação inteira mista. Os autores propuseram também a criação de uma interface destinada aos operadores, em que estes poderiam alterar parâmetros e obter o planejamento otimizado de maneira simplificada. Em OLIVEIRA (2015), um sistema similar ao do presente trabalho é tratado visando também a redução no tempo total de *setup*. O autor utiliza um procedimento de busca parcial no espaço, percorrendo a vizinhança de uma dada sequência. O software utilizado foi o Microsoft Excel, ferramenta amplamente usada na indústria.

O objetivo deste trabalho consiste em realizar o sequenciamento dos lotes de papéis-cartão de diferentes composições e gramaturas, visando minimizar o tempo total de *setup*. Foram utilizados dados reais do planejamento de uma indústria, e a sequência ótima foi calculada por meio do problema do caixeiro viajante, em que cada um dos lotes foi considerado como um dos vértices do grafo, e o tempo de *setup* corresponde ao comprimento dos arcos.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a seção Referencial Teórico contém a descrição do problema do caixeiro viajante; a seção Definição do Problema traz a descrição do sistema estudado e detalhes da abordagem matemática realizada. Na seção Resultados e Discussão, são expostas e avaliadas as respostas da implementação; e a seção Conclusões traz considerações sobre o presente estudo e sugestões para trabalhos futuros.

REFERENCIAL TEÓRICO

O problema do caixeiro viajante (PCV) – em inglês, *traveling salesman problem (TSP)* – é um dos problemas clássicos em Pesquisa Operacional, uma vez que possui aplicabilidade em uma gama de situações na área de sequenciamento. O problema recebe este nome porque pode ser ilustrado por meio da situa-

ção em que um caixeiro deve visitar um conjunto de cidades, partindo de uma cidade de origem e retornando a ela no final, percorrendo o caminho de menor custo.

Na Teoria dos Grafos, um grafo $G = (V, A)$ consiste em um conjunto $V = \{1, 2, \dots, n\}$ finito e não vazio de vértices e em um conjunto $A = \{(i, j) : i, j \in V\}$ de arcos. O grafo pode ser orientado ou não orientado. Ele é não orientado se o conjunto A é formado por pares não ordenados de V , e orientado em caso contrário. A cada arco (i, j) está associado um peso c_{ij} . Outro conceito importante para o problema em questão é o caminho Hamiltoniano, definido como um percurso dentro do grafo em que todos os vértices são visitados exatamente uma vez. O peso total associado a esse caminho é dado pela Equação (1):

$$c^* = \sum_{(i,j) \in A^*} c_{ij} \tag{1}$$

O PCV consiste em encontrar o caminho Hamiltoniano com o menor peso total. O problema pode ser simétrico ou assimétrico, sendo simétrico quando o grafo é não orientado e assimétrico quando o grafo é orientado.

Na modelagem matemática do problema, utilizam-se variáveis binárias para definir se um arco pertence ou não à rota ótima. A função objetivo do problema do caixeiro viajante é dada pela Equação (2).

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \tag{2}$$

As variáveis x_{ij} são variáveis de decisão, as quais valem 1, se o arco de i até j é percorrido, e 0, caso contrário. O somatório fornece o custo total da rota.

As restrições são dadas pelas Equações (3), (4) e (5), em conjunto com equações para a eliminação de sub-rotas, dadas mais adiante.

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1; \quad j = 1..n \tag{3}$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1; \quad i = 1..n \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}; \quad i, j = 1..n \tag{5}$$

As restrições (3) impõem que cada vértice funciona como chegada apenas uma vez, e as restrições (4), de maneira similar, impõem que cada vértice funciona como partida apenas uma vez. As restrições (5) fornecem o domínio das variáveis x_{ij} .

Além destas três restrições, devem ser incluídas as formulações para se evitar a formação de sub-rotas. Sub-rotas são percursos os quais não correspondem a caminhos Hamiltonianos,

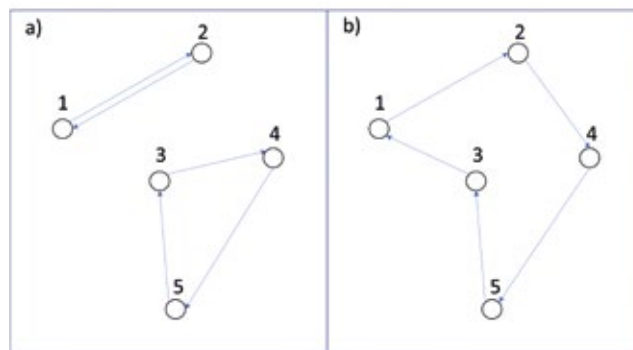


Figura 2. (a) percurso com sub-rotas e (b) percurso sem sub-rotas para um grafo. Fonte: elaborada pelos autores

uma vez que nem todos os vértices do grafo são visitados, e devem ser descartados. A Figura 2 ilustra essa situação para um grafo contendo 5 vértices. A Figura 2 (a) mostra a formação das sub-rotas $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ e $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3$, resultado não desejado para o problema do caixeiro viajante. Em 2 (b), é mostrada a rota $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, considerada válida para este problema, por percorrer todos os vértices.

Existe uma série de modelos para a eliminação de sub-rotas. Um dos trabalhos pioneiros foi escrito por DANTZIG *et al.*, (1954), citado daqui em diante como DFJ, e se baseia na verificação da existência de sub-rotas em cada um dos subconjuntos de V . Esta formulação, no entanto, demanda um número exponencial de restrições. Posteriormente a DFJ, diversos modelos com um número polinomial de restrições foram propostos. Como referência de mais modelos, os autores sugerem a leitura de ROBERTI e TOTH (2012). Neste trabalho, foram utilizadas três formulações, as quais diferenciam-se na qualidade do limite inferior ao valor da solução ótima fornecido pela relaxação linear. Trata-se de modelos com implementação relativamente simples, visto que cada uma delas contém apenas um conjunto de variáveis auxiliares. São eles:

- i. publicado em MILLER, TUCKER e ZEMLIN (1960) e chamado neste trabalho de MTZ;
- ii. publicado em GAVISH e GRAVES (1978) e chamado neste trabalho de GG;
- iii. publicado em CLAUS (1984) e chamado neste trabalho de Claus.

O modelo MTZ foi o primeiro modelo polinomial proposto e apresenta uma relaxação linear mais fraca que a de DFJ. Ele conta com as variáveis auxiliares $u_i \in \mathbb{R}_+$, de valores arbitrários, e com as restrições (6) em conjunto com as Equações (2) a (5):

$$u_i - u_j + (n - 1)x_{ij} \leq n - 2; \quad i, j = 2..n, \quad i \neq j \tag{6}$$

O modelo GG conta com uma relaxação linear mais forte que

a de MTZ, porém mais fraca que a de DFJ. Trata-se de um modelo de *single commodity flow*, em que as variáveis $g_{ij} \in \mathbb{R}_+$ informam o número de arcos do vértice 1, tomado como raiz, até o arco (i, j) . O modelo compreende as Equações (2) a (5) e as restrições (7) e (8):

$$\sum_{j=1}^n g_{ij} - \sum_{j=2}^n g_{ji} = 1; \quad i = 2..n \quad (7)$$

$$0 \leq g_{ij} \leq (n - 1)x_{ij}; \quad i = 2..n, j = 1..n \quad (8)$$

O modelo Claus é uma formulação de *multi-commodity flow*, em que as variáveis auxiliares $w_{ij}^k \in \mathbb{R}_+$ assumem o valor 1 se a *commodity* que se dirige do vértice 1 ao vértice k passa pelo arco (i, j) e 0 caso contrário. A formulação engloba as Equações (2) a (5) e adiciona as equações (9) a (12):

$$\sum_{j=1}^n w_{ij}^k - \sum_{j=1}^n w_{ji}^k = 0; \quad i, k = 2..n, i \neq k \quad (9)$$

$$\sum_{j=2}^n w_{1j}^k - \sum_{j=2}^n w_{j1}^k = -1; \quad k = 2..n \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij}^i - \sum_{j=1}^n w_{ji}^i = 1; \quad i = 2..n \quad (11)$$

$$0 \leq w_{ij}^k \leq x_{ij}; \quad i, j = 1..n; k = 2..n \quad (12)$$

O problema do caixeiro viajante é classificado como um problema de programação linear inteira mista, uma vez que a

função objetivo e as restrições são lineares, as variáveis $x_{i,j}$ são binárias, e as variáveis auxiliares são contínuas.

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A indústria considerada neste trabalho produz papéis-cartão destinados à fabricação de embalagens. Periodicamente, o setor comercial envia ao setor operacional a demanda de cada um dos produtos para certo período, e cabe aos planejadores de produção realizar a divisão das demandas em lotes e definir a sequência em que estes serão fabricados. A máquina para a fabricação dos papéis opera em regime contínuo, e, para cada troca entre duas variedades de papel-cartão, há, por certo período de tempo, a produção de refugo ou papel de qualidade inferior, considerados subprodutos. Esse período é chamado de tempo de *setup*, e sua duração depende dos dois elementos envolvidos, bem como da ordem de troca. A Tabela 1 mostra os tempos de *setup*, em minutos, para cada uma das mudanças entre o produto da linha e o da coluna. Como exemplo, a troca do CHW358 para o CKQ330 demanda 20 minutos, enquanto a troca inversa, do CKQ330 para o CHW358, possui a duração de 35 minutos.

O dimensionamento e o sequenciamento dos lotes são realizados manualmente pelo corpo técnico da indústria, baseado em sua experiência e nos tempos de *setup*. O dimensionamento dos lotes leva em consideração limites inferiores e superiores: lotes de poucas toneladas apresentam um tempo de *setup* proporcionalmente elevado em relação ao tempo de produção, e lotes extensos podem gerar gargalos em rebobinadeiras e na disponibilidade de polpa. Em trabalho realizado em sistema semelhante, OLIVEIRA (2015) cita a dificuldade para a produ-

Tabela 1. Tempo de setup, em minutos, para as trocas entre as variedades de papel-cartão

	CHD 278	CHD 298	CHW 358	KKL 205	KKL 276	CKQ 276	CKQ 300	CKQ 330	KKC 205	KKC 227	KKC 274	KKC 315	CKF 205	CKF 227	CKF 250	CKF 262	CKF 285	CKF 312	CKF 332	CKF 360
CHD278		20	48	45	35	20	20	20	45	45	45	45	30	30	30	30	26	30	30	30
CHD298	20		33	45	35	20	20	20	45	45	45	45	30	34	28	30	28	30	40	54
CHW358	48	25		45	35	20	20	20	45	45	45	45	30	34	28	30	28	30	40	54
KKL205	56	56	56		41	35	35	35	38	38	38	38	42	42	42	42	42	42	42	42
KKL276	56	56	56	38		35	35	35	38	38	38	38	42	42	42	42	42	42	42	42
CKQ276	35	35	35	36	52		17	17	36	37	36	40	49	52	40	40	40	40	40	40
CKQ300	35	35	35	88	52	17		17	88	36	21	36	40	40	40	40	40	40	40	40
CKQ330	35	35	35	36	52	17	17		36	36	28	36	40	40	40	40	40	40	40	42
KKC205	27	27	27	18	37	27	27	27		20	38	41	19	30	36	36	51	36	36	36
KKC227	27	27	27	18	37	27	27	27	18		25	41	37	21	36	36	36	36	36	36
KKC274	14	33	33	30	37	27	27	29	30	28		41	23	30	34	20	17	36	32	46
KKC315	27	27	27	41	37	27	27	27	41	41	41		36	36	36	36	54	36	36	36
CKF205	25	25	25	34	45	34	34	34	34	35	32	35		35	37	32	32	32	32	32
CKF227	25	24	24	25	45	48	34	34	25	10	22	35	25		35	10	32	32	32	32
CKF250	25	25	25	35	32	40	34	34	35	35	35	42	21	32		17	32	32	32	32
CKF262	25	28	28	35	45	34	34	34	35	17	15	57	31	16	24		32	32	26	32
CKF285	25	25	25	35	45	22	34	34	35	35	17	41	57	32	42	16		32	32	32
CKF312	25	25	25	35	45	34	34	34	35	35	35	35	32	32	32	32	32		32	32
CKF332	25	29	29	35	45	34	34	34	35	35	26	35	32	32	32	32	32	32		32
CKF360	25	25	25	35	45	34	34	34	35	35	35	35	32	32	32	32	31	32	32	

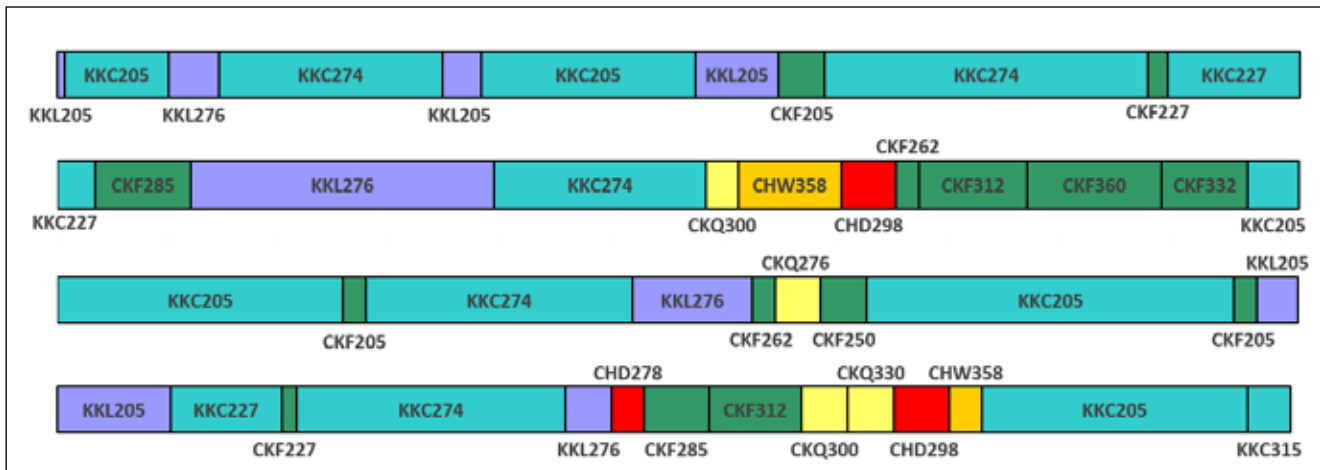


Figura 3. Dimensionamento e sequenciamento dos lotes, propostos pela indústria

ção de pequenos lotes em função da complexidade do processo produtivo ininterrupto em máquina de grande porte. Em relação aos lotes maiores, o autor menciona o decorrente acúmulo de estoque, acarretando custos de armazenagem e a possibilidade de obsolescência dos itens.

O sequenciamento, por sua vez, deve levar em conta principalmente o tempo de *setup*. A Figura 3 ilustra o sequenciamento dos lotes para um determinado período, proposto pelos planejadores de produção, com o dimensionamento dado pelo comprimento dos blocos. A sequência se inicia no canto superior esquerdo e, a cada quebra de linha, prossegue a partir do canto esquerdo da linha seguinte, se encerrando no canto inferior direito. Na primeira linha, o primeiro produto é o KKL205, seguido pelo KKC205 e pelo KKL276 e assim sucessivamente. Caso um produto seja o último de uma linha e o primeiro da seguinte, como o KKC227 no final da primeira linha e início da segunda, trata-se de apenas um lote. Nesta instância, o último produto fabricado é o KKC315.

Este planejamento apresenta um tempo total de *setup* igual a 1409 minutos. O objetivo do trabalho consiste em minimizar esse tempo, mantendo o dimensionamento dos lotes. Cada um dos lotes foi considerado como um dos vértices no problema do caixeiro viajante, e os tempos de *setup* correspondem ao custo c_{ij} . As variáveis binárias x_{ij} assumem o valor 1 se o lote j é produzido imediatamente após o lote i , e 0 caso contrário. Para a determinação dos valores de x_{ij} , os quais definem a sequência de produção, foram utilizados os modelos MTZ, GG e Claus expostos na seção Referencial Teórico. As variáveis auxiliares u_i para MTZ, g_{ij} para GG e w_{ij}^k para Claus, bem como as restrições particulares a cada um desses modelos, possuem a missão de garantir que todos os lotes sejam produzidos em apenas uma sequência, sem a formação de sub-rotas.

Produtos dos quais foram planejados múltiplos lotes, como o KKC274 com 5 lotes, foram repetidos na tabela de *setup*, e colocou-se um tempo de 1000 minutos para as trocas entre eles, de modo a vetá-las. A necessidade disso deve-se, na prática, à sucessão de dois lotes de um mesmo produto significar a produção

de um lote mais extenso do mesmo. Como os tempos mostrados na Tabela 1 são da ordem de algumas dezenas, o valor de 1000 minutos é suficiente para que essas trocas não sejam interessantes do ponto de vista da otimização, induzindo para que não ocorram.

Outra adaptação realizada foi a inclusão de um lote fictício, com tempo de *setup* igual a 0 para todos os produtos em ambos os sentidos. Este lote foi arbitrado como o ponto de partida e chegada no itinerário do caixeiro viajante, de modo que o caminho entre os verdadeiros lotes de produção seja um percurso aberto, condizendo com a realidade física do problema.

Para este problema, optou-se pela resolução exata, a qual apresenta a vantagem de fornecer o ponto ótimo global. Uma vez que o número de variáveis é relativamente pequeno, o tempo computacional tende a não ser proibitivo. A programação foi realizada no software CPLEX Studio IDE 12.10.0, utilizando-se a linguagem OPL, própria do software. O CPLEX é um programa reconhecido no mercado e amplamente utilizado para problemas de programação inteira mista. Os códigos foram executados em um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel Core i5, 2,20 GHz e 8 GB de memória RAM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos MTZ, GG e Claus forneceram o mesmo tempo de *setup*, igual a 1020 minutos. Este valor é 27,6% menor que os 1409 minutos da sequência fornecida pela indústria. O ganho de tempo, na prática, representa uma possibilidade de se fabricar um maior volume de papel-cartão para fins comerciais, aproveitando-se o tempo economizado com *setup*. Ademais, representa uma redução na fabricação de subprodutos, um resultado interessante do ponto de vista ambiental.

Embora o tempo de *setup* tenha sido o mesmo para os três modelos de restrição de sub-rotas implementados, as rotas encontradas foram diferentes. Isso ocorreu porque os tempos de troca são os mesmos para diversos arcos, como se pode observar pelos valores repetidos na Tabela 1. É provável ainda que haja outras sequências com o mesmo tempo ótimo, além das

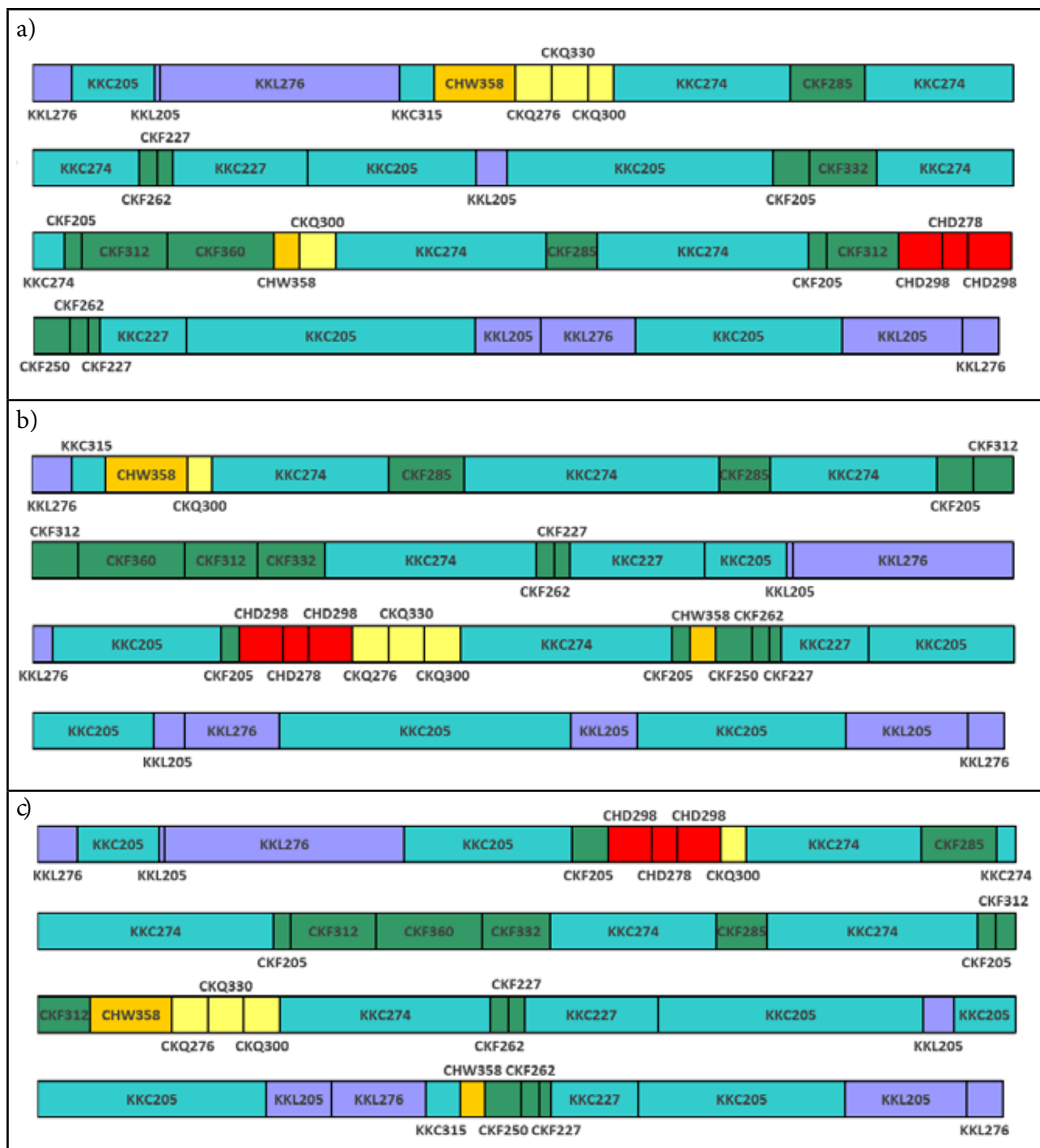


Figura 4: Sequenciamento dos lotes com o menor tempo total de *setup* pelos diferentes modelos de restrição de sub-rotas: (a) MTZ, (b) GG e (c) Claus.

que foram encontradas. As sequências encontradas para cada modelo são mostradas na Figura 4. Cabe ressaltar que as soluções envolvendo permutações dos lotes de produtos iguais são equivalentes do ponto de vista de minimização do tempo total de *setup*, de modo que cada uma das soluções mostradas ainda conta com as possibilidades de permutação.

Um aspecto comum entre as sequências obtidas é o agrupamento dos produtos CHD e de três dos lotes de produtos CKQ.

Os produtos CHD possuem tempo de *setup* de 20 minutos para as trocas internas, havendo poucas trocas externas com tempo igual ou inferior. Para os produtos CKQ, as trocas internas demandam 17 minutos de *setup*, um tempo também considerado baixo.

Um parâmetro importante a ser observado em problemas de programação, em particular aqueles envolvendo variáveis inteiras, é o tempo de execução dos códigos. Para que a otimização seja viável para a indústria, é necessário que este tempo seja com-

Tabela 2. Tempo computacional e número de parâmetros para os três modelos de restrição de sub-rotas

Modelo	MTZ		GG		Claus	
Tempo* (s)	1,22		0,66		33,71	
Restrições	1982		2114		91170	
Variáveis	Binárias	2025	Binárias	2025	Binárias	2025
	Contínuas	44	Contínuas	1980	Contínuas	89100

*Tempo médio entre 5 execuções

patível com a realidade industrial. A Tabela 2 mostra o tempo médio de execução para cada um dos três modelos testados no CPLEX, bem como os números de variáveis e de restrições.

O modelo Claus apresentou o maior tempo de execução dentre os três, como esperado pelo seu expressivamente maior número de variáveis e restrições. Os modelos GG e MTZ apresentam um número próximo de restrições e um tempo de execução em torno de um segundo.

Neste trabalho, foram desconsideradas restrições relativas ao cumprimento da demanda dos produtos em relação ao tempo, fazendo com que as únicas variáveis de decisão dissessem respeito à sequência de fabricação dos lotes. Tal abordagem reduz a complexidade computacional do problema, fazendo com que tenha sido possível a resolução do mesmo em um tempo da ordem de segundos. Para problemas maiores, o emprego de métodos exatos, como realizado pelo CPLEX, provavelmente demandaria um tempo computacional inviável na prática, da ordem de dias em um computador pessoal. Por esse motivo, problemas mais complexos são tipicamente resolvidos por métodos heurísticos, que, como mencionado anteriormente, são buscas parciais na região viável, realizadas de maneira adequada à natureza do problema e capazes de fornecer uma solução considerada suficiente, embora não necessariamente ótima, em um tempo menor.

CONCLUSÕES

O sequenciamento otimizado dos lotes de produção permitiu uma redução de 27,6% no tempo total de *setup*. Esta redução implica possibilidades de ganhos econômicos, por disponibilizar mais tempo para a produção de papéis-cartão para fins comerciais, e ganhos ambientais, pela menor geração de subprodutos.

Caso restrições relativas ao cumprimento da demanda dos produtos em relação ao tempo fossem consideradas, o tempo de *setup* obtido provavelmente seria maior que o encontrado. Por outro lado, foi mantida a divisão de lotes realizada pela empresa, e há a possibilidade de redução no tempo de *setup* por meio do rearranjo dessa divisão, planejando-se lotes mais extensos, o que requer menor número de lotes totais. Sendo assim, a solução encontrada neste trabalho para o tempo total de *setup* coloca-se como uma estimativa, devido à desconsideração de uma possibilidade com potencial para reduzir esse tempo e de uma restrição que o elevaria.

Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação das restrições para cumprimento da demanda, bem como a possibilidade de redivisão dos lotes. O número de variáveis para esses casos seria consideravelmente maior, sendo provável que os

problemas não possam ser resolvidos por métodos exatos em um tempo razoável. Dessa forma, coloca-se como alternativa o desenvolvimento de métodos heurísticos para a construção e otimização de sequências viáveis. ■

REFERÊNCIAS

- ALMADA-LOBO, B. *et al.* Industrial insights into lot sizing and scheduling modeling. *Pesquisa Operacional*, v. 35, n. 3, p. 439-464, 2015.
- CAPO, P. (Ed.) *Guia ABTCP de Fornecedores & Fabricantes: celulose e papel 2018/2019*. São Paulo: ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2018. Disponível em: <http://www.guiacomprascelulosepapel.org.br/publicador/edicoes_impressas/12.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2020.
- CLAUS, A. A new formulation for the travelling salesman problem. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, v. 5, n. 1, p. 21-25, 1984.
- DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. Solution of a large-scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, v. 2, n. 4, p. 393-410, 1954.
- FIGUEIRA, G. *et al.* A decision support system for the operational production planning and scheduling of an integrated pulp and paper mill. *Computers and Chemical Engineering*, v. 77, p. 85-104, 2015.
- FURLAN, M. *et al.* Unequal individual genetic algorithm with intelligent diversification for the lot-scheduling problem in integrated mills using multiple-paper machines. *Computers and Operations Research*, v. 59, p. 33-50, 2015.
- GAVISH, B.; GRAVES, S. *The travelling salesman problem and related problems* [Working paper n. OR 078-78]. Operations Research Center in Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, 1978.
- HARJUNKOSKI, I. *et al.* Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers and Chemical Engineering*, v. 62, p. 161-193, 2014.
- LE HESRAN, C. *et al.* Operations scheduling for waste minimization: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, p. 211-226, 2019.
- MILLER, C.; TUCKER, A.; ZEMLIN, R. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM (JACM)*, v. 7, n. 4, p. 326-329, 1960.
- OLIVEIRA, C. Sequenciamento de produção em uma indústria de papel: estudo de caso numa máquina de papelcartão. In: *I Encontro de Pesquisa da FATEB*, p. 72-87. Telêmaco Borba-PR, 2015.
- RAISER, S.; OLIVEIRA, M. A associação da indústria 4.0 com a gestão da informação e ferramentas da qualidade: um estudo desta combinação aplicada à indústria papelaria tissue. *O Papel*, v. 81, n. 5, p. 61-73, 2020.
- ROBERTI, R.; TOTH, P. Models and algorithms for the Asymmetric Traveling Salesman Problem: an experimental comparison. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, v. 1, p. 113-133, 2012.
- ROBERTSON, G. *Food packaging: principles and practice*. 3rd. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- SANTIAGO, S. B. *et al.* Aumento da produção e eficiência operacional na área de preparo de cavacos, através de novas ferramentas de controle da picagem. *O Papel*, v. 80, n. 5, p. 92-97, 2019.
- SANTOS, M.; ALMADA-LOBO, B. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, v. 63, n. 1, p. 1-12, 2012.