

SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO COM RESTRIÇÃO NA ORDEM DE PRECÊDÊNCIA

SEQUENCING PRODUCTION WITH RESTRICTION ON THE ORDER OF PRECEDENCE

Degival Rodrigues Gonçalves Júnior¹; Edilson de Jesus².

¹Universidade Federal de Sergipe – UFS – São Cristóvão/SE – Brasil
quimicojunior.ufs@gmail.com

²Universidade Federal de Sergipe – UFS – São Cristóvão/SE – Brasil
edilsonjs@ufs.br

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de propor, através de programação matemática, um modelo, de natureza MILP (Mixed Integer Linear Programming), para o sequenciamento de produção em plantas de processamento de frutas, envolvendo restrições nos recursos, na ordem de execução das atividades e nos tempos de processamento. O modelo matemático visa minimizar o tempo total de processamento Makespan e encontrar a sequência ótima para quatro tarefas em três processadores. A implementação de sistemas computacionais é fundamental para que se tenha um sistema produtivo eficiente e otimizado. O modelo foi implementado usando o software GAMS (General Algebraic Modeling System), versão 23.7.

Palavras-chave: sequenciamento de operações; programação matemática; otimização.

Abstract

This work has the objective to propose through mathematical programming, a model of nature MILP (Mixed Integer Linear Programming) for the sequencing of production in fruit processing plants, involving restrictions on resources, in order of execution and the times of processing. The purpose of the mathematical model is to minimize the total processing time Makespan and find the optimal sequence to four jobs in three processors. The implementation of computer systems is essential in order to have an efficient and productive system optimized to meet these requirements was implemented a model of sequencing of production through software GAMS (General Algebraic Modeling System), version 23.7.

Key-words: sequencing of operations, mathematical programming, optimization.

1. Introdução

A indústria de polpa de fruta vem crescendo ao longo dos anos, o que desencadeia grande competitividade entre as empresas desse setor. Segundo dados do IBRAF- Instituto Brasileiro de Frutas (2012), o Brasil é terceiro maior produtor de frutas no mundo, e as maiores regiões produtoras são o Nordeste e o Sudeste.

Devido à grande variedade de frutas disponíveis, faz-se necessário a otimização da produção, conseguindo-se maior aproveitamento do produto, além de reduzir custos e obter lucros. Toda empresa que visa estar entre as melhores do mercado precisa de bom planejamento, sendo o objetivo do PCP (Planejamento e Controle da Produção) – setor responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos (TUBINO, 2008). O PCP se encarrega da programação e do sequenciamento da produção.

O sequenciamento de produção é fundamental para qualquer indústria, seja ela, farmacêutica, química, siderúrgica, têxtil ou alimentícia, tendo como objetivo definir a melhor sequência produtiva. O GAMS (*General Algebraic Modeling System*) é um software capaz de resolver este tipo de problema e encontrar a sequência ótima.

A programação matemática é difundida em várias áreas para o tratamento de problemas diversos. Quando se parte para a formulação matemática de determinado problema, vários modelos podem surgir, principalmente quando este problema trata de variáveis inteiras (SANTOS, 1998). Este é o objetivo dos pesquisadores, encontrar modelos de baixo custo, possibilitando assim a solução de problemas que se assemelhem à realidade, no caso da programação da produção, as restrições e a quantidade de tarefas representam essa realidade.

Na literatura existem trabalhos que tratam do sequenciamento de produção, tais como, os de Barros e Moccélin (2004), que introduzem um algoritmo para o sequenciamento de tarefas com tempos de *setup* dependentes da sequência, Toso e Morabito (2005), que tratam do sequenciamento em lotes a partir da linguagem GAMS/CPLEX, Bispo *et al.* (2011) apresenta o sequenciamento de produção em plantas flexíveis a partir do GAMS e desenvolve uma interface gráfica usando a linguagem de programação JAVA, Chen e Wu (2004) propõem métodos heurísticos para a minimização de problemas de sequenciamento em máquinas paralelas, Morais e Moccélin (2010) apresentam investigação sobre o problema de programação da produção em ambientes *flowshop* com múltiplas máquinas (híbridos) e tempos de preparação (*setup*) das máquinas assimétricos e dependentes da sequência, e propõem métodos heurísticos construtivos para a minimização do tempo médio de fluxo.

No atendimento de tais necessidades, o objetivo é propor um modelo, de natureza MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), através do software GAMS, para o sequenciamento de produção em plantas de processamento de frutas, com restrições nos recursos e ordem de precedência, para obter-se a melhor sequência produtiva.

O trabalho justifica-se pela necessidade das empresas em implementar ferramentas computacionais para que se tenha um sistema produtivo eficiente e otimizado com o intuito de diminuir custos de transporte, de estocagem, de hora extra para os funcionários, entre outros fatores relevantes, além de obter lucros.

Este trabalho visa a implementação de um modelo que venha a otimizar o tempo de produção de polpas de frutas. Espera-se que o modelo proposto auxilie de forma importante no planejamento do processamento de frutas, trazendo confiabilidade na organização e no planejamento da produção, além de buscar melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema.

2. Fundamentação Teórica

O sequenciamento de produção baseia-se em tomadas de decisões pelas quais é possível otimizar processos em uma indústria, tais como, redução de custos, tempo de processamento, transporte, entre outros. O sequenciamento é de fundamental importância para a competitividade de uma empresa. A boa programação dos pedidos pode evitar desperdícios de tempo, estoque e mão de obra, a fim de que os esforços da empresa estejam coordenados para atender efetivamente os seus objetivos.

Ao elaborar a sequência de produção, é necessário estabelecer a ordem de se executar as tarefas, através de um conjunto de regras, de acordo com o objetivo da empresa, como reduzir o atraso das entregas, prioridade dos pedidos, diminuir o tempo de produção, aumentar a utilização dos recursos e reduzir estoque em processo (LOPES, 2008).

Em modelos de sequenciamento, duas restrições são fundamentais: a restrição que garante a não sobreposição de operações em um determinado equipamento e a restrição que garante a ordem que as operações devem seguir.

2.1. Produção de Polpa de Fruta

Segundo a EMBRAPA (2005), considera-se polpa de fruta como produto não-concentrado, não-fermentado e não-diluído, com teor mínimo de sólidos totais.

A produção de polpa de fruta congelada é um segmento que, apesar de englobar grandes indústrias, está caracterizado pela presença de micro e pequenas empresas (EMBRAPA, 2005).

No processamento de frutas para a produção de polpas surge a necessidade de sistemas para gestão da produção, pois diversos sabores de polpas são disponibilizados no mercado e a depender da sequência que as quantidades de polpas são produzidas têm-se custos de produção elevados devido ao alto consumo de água e energia. O processamento de polpas evita desperdícios e minimiza perdas que ocorrem com frequência durante a comercialização do produto *in natura*, agregando assim valor econômico à fruta (BISPO *et al.*, 2011).

O congelamento da polpa de fruta é um método de conservação que preserva as características da fruta e permite o consumo nos períodos de entressafra, proporciona também a possibilidade de utilização de frutas pouco conhecidas, como as provenientes do Cerrado e das regiões Norte e Nordeste, que já despertam interesse no mercado externo (EMBRAPA, 2005).

A programação de produção em plantas flexíveis, a exemplo de indústrias de produção de polpa, em regra, objetiva apresentar um programa de execução de tarefas, no qual otimize determinada função objetivo (BISPO *et al.*, 2011).

A Figura 1 mostra as principais etapas do processamento da produção de polpa de fruta congelada.

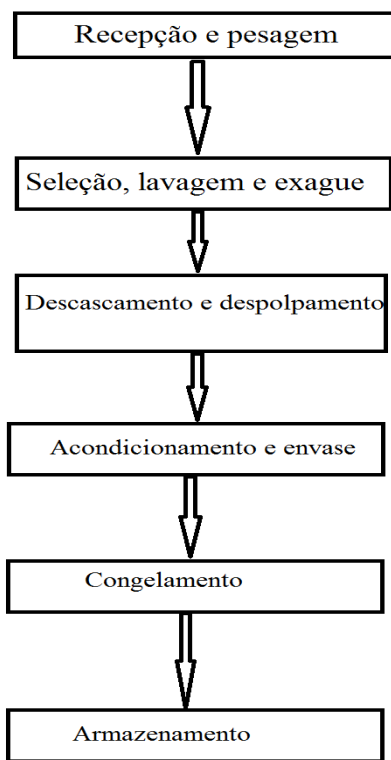


Figura 1 – Etapas do processo de produção de polpa de fruta congelada.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2005.

a) Recepção e pesagem

Após a colheita, as frutas são recebidas através de caixas, sacos ou a granel e depois pesadas. Nessa etapa, o lote das matérias-primas pode ser caracterizado por parâmetros físicos e físico-químicos. Dependendo do pico da safra, pode ser necessário armazenar as frutas que estão maduras até o momento do processamento. Preferencialmente, devem ser acondicionados em caixas plásticas, armazenadas com refrigeração ou em local ventilado, não muito úmido, para evitar a proliferação de bolores, insetos e ataque de roedores. O ideal é que esses frutos sejam armazenados já higienizados (TOLENTINO e SILVA, 2009).

b) Seleção, lavagem e enxágue.

Para obter um produto de qualidade, a escolha da matéria-prima é de fundamental importância, nesse processo as frutas são selecionadas para que não hajam frutas estragadas, insetos, folhas ou resíduos que comprometam o restante da produção.

A lavagem deve ser feita em duas etapas: a pré-lavagem, com água limpa e altas concentrações de cloro, 10 a 70 ppm, durante 20 e 30 minutos, em seguida, jateamento de água, onde são retiradas as impurezas remanescentes, além da retirada do excesso de cloro (SEBRAE, 2011).

c) Descascamento e Despolpamento

Depois de lavadas e selecionadas, a frutas são novamente pesadas antes do descascamento. Dependendo da fruta, o descascamento pode ser mecânico ou manual, frutas como o abacaxi, além de descascadas, devem ser também cortadas, existem também frutas que precisam ser retirados os caroços. Já despolpamento é o processo utilizado para extrair a polpa da fruta do material fibroso, das sementes e dos restos de cascas. Conforme a fruta escolhida, o despolpamento deve ser precedido da trituração do material em desintegrador ou liquidificador industrial, como no caso da banana e do abacaxi (EMBRAPA, 2005).

O rendimento, em quantidade de polpa produzida em relação à quantidade de fruta utilizada, varia conforme a espécie da fruta e as condições de despolpamento.

d) Acondicionamento e envase

A polpa extraída é acondicionada, manualmente, em sacos de plástico ou colocada num equipamento chamado dosadora, que serve para encher a embalagem em quantidades previamente definidas. As embalagens mais utilizadas são sacos de plástico de polietileno, com capacidade para 100 mL ou 1.000 mL. Após o envase, esses sacos são fechados a quente, com seladora manual e em seguida levados para o congelamento (MATTA *et. al.*, 2005).

e) Congelamento

O congelamento é uma operação que deve ser realizada, imediatamente, após o envase da polpa, geralmente são utilizadas câmaras frigoríficas para o congelamento do produto. A rapidez na execução dessa etapa favorece a preservação das características originais da fruta, proporcionando qualidade ao produto final (EMBRAPA, 2005).

f) Armazenamento

As polpas devem ser mantidas sempre congeladas, em câmaras frigoríficas a temperatura varia de -18°C a -22°C . Também podem ser utilizados freezers domésticos. (MATTA *et. al.*, 2005).

2.2. Otimização de Processos

A otimização de um processo pode ser efetuada em diferentes níveis, o escopo de um problema de otimização pode ser toda uma empresa, uma planta, um processo, um equipamento, uma peça de equipamento, ou qualquer outro sistema. Numa indústria típica existem três níveis que podem ser otimizados: nível gerencial (logística), nível de projeto e nível operacional (SECCHI, 2001).

No contexto de otimização são tratadas as seguintes definições:

Função objetivo: é a função matemática a qual se deseja minimizar ou maximizar. A minimização da função objetivo (*Makespan*) tem importantes aplicações em indústrias de plástico, aço, produtos químicos, e muitos outros setores onde não existe reserva intermediária entre máquinas devido a exigências técnicas ou as características do processo (PAN & WANG, 2011).

Variáveis de decisão: são as variáveis independentes que aparecem na função objetivo;

Restrições: são os limites impostos ao sistema ou estabelecidos pelas leis naturais que governam o comportamento o sistema, à que estão sujeitas as variáveis de decisão. As restrições podem ser de igualdade (equações) ou de desigualdade (inequações). (SECCHI, 2001; SILVA, 2010).

Segundo Barros & Moccellini (2004), em determinado sistema produtivo, restrições são todos os processos máquinas, meios ou até comportamentos que impedem o sistema de atingir o máximo de seu desempenho.

Em problemas de otimização existem vários procedimentos que podem ser aplicados, segundo Secchi (2001, p. 09), “Não existe um único método que pode ser aplicado eficientemente para todos os problemas. O método escolhido para um caso particular depende das características da função objetivo, da natureza das restrições e do número de variáveis do problema”.

Em problemas de otimização que envolvem máquinas em paralelo, técnicas computacionais são utilizadas para minimizar o atraso total, essas técnicas são feitas através de comparações empíricas com procedimentos ATCS (*apparent-tardiness-cost-with-setup*) (CHEN & WU, 2004), essa técnica é capaz de obter a melhor solução para problemas de pequeno porte.

Para formular e solucionar problemas de otimização, os seguintes passos devem ser observados:

- a) Análise do processo e suas variáveis;
- b) Escolha do critério de otimização e especificação da função objetivo em termos das variáveis o processo;
- c) Desenvolvimento do modelo para o processo, relacionando as variáveis através de restrições, a função objetivo e os parâmetros adotados;
- d) Simplificação do modelo, se a formulação do problema for de dimensões elevadas;
- e) Aplicação de técnicas apropriadas de otimização;
- f) Análise da solução obtida e a sua sensibilidade frente a variações em parâmetros do modelo e suas considerações (hipóteses).

3. Metodologia

3.1 Formulação do Modelo Via Programação Matemática

A função objetivo é chamada de função de custo e é aplicada apenas ao último equipamento, pois é o que finaliza o processo. O modelo proposto visa a minimizar o Makespan, dada pela Equação 1.

$$M_k \geq TE_{i,jm} \quad \forall i \in T, jm \in P \quad (1)$$

onde MK é makespan, $TE_{i,jm}$ é tempo de término da tarefa i no ultimo equipamento jm, T é conjunto de tarefas i, P é conjunto de equipamentos j.

Em modelos de programação de plantas flexíveis duas restrições são fundamentais: a restrição que garante a não sobreposição de tarefas em determinado equipamento e a restrição de precedência, que garante o ordenamento das tarefas pelos processadores.

A relação de precedência é dada pelas equações 2 e 3.

$$TE_{i,j} = TS_{i,j} + TP_{i,j} \quad \forall i \in T; j \in P \quad (2)$$

$$TS_{i,j+1} \geq TE_{i,j} \quad \forall i \in T; j \in P \quad (3)$$

onde $TE_{i,j}$ é tempo de término de uma tarefa i num equipamento j , $TS_{i,j}$ é tempo de início de uma tarefa i num equipamento j , $TP_{i,j}$ é tempo de processamento de uma tarefa i num equipamento j .

A relação de não sobreposição de tarefas em um processador é dada pelas equações 4,5 e 6.

$$TS_{i',j} - TE_{i,j} \geq -U(1 - Z_{i',j}) \quad \forall i' \in TL; i \in T; j \in P \quad (4)$$

$$TS_{i',j} - TE_{i,j} \leq -U(1 - Z_{i',j}) \quad \forall i' \in TL; i \in T; j \in P \quad (5)$$

$$Z_{i',j} = 1 - Z_{i',j} \quad \forall i' \in TL; i \in T; j \in P \quad (6)$$

onde TL é conjunto de tarefas i' , U é valor escalar grande de controle e $Z_{i',j}$ é variável binária (0 ou 1) de precedência da tarefa i no processador j .

Foi proposta também uma relação de ordem em que a tarefa i_2 deve, obrigatoriamente, ser realizada antes da tarefa i_3 . Isso se explica pelo fato de que a tarefa i_3 pode contaminar os equipamentos, prejudicando assim a execução da tarefa i_2 . Essa relação é dada pela equação 7.

$$TE_{i_2,j} \leq TS_{i_3,j} \quad \forall j \in P \quad (7)$$

onde $TE_{i_2,j}$ é o tempo de término da tarefa i_2 no equipamento j e $TS_{i_3,j}$ é tempo de início da tarefa i_3 no equipamento j .

4. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir do modelo implementado. Foi utilizada a linguagem de programação GAMS 23.7 com o solver CPLEX 12.3 para a resolução do modelo proposto. Para a realização dos experimentos computacionais foi utilizado um notebook com processador Intel CORE i3 com 2.27 GHz e 4 Gb de memória RAM e sistema operacional Windows 7, com o tempo total de execução da CPU de 0,218 segundos.

No modelo de entrada do GAMS foram inseridos os tempos de processamento para quatro tarefas em três processadores como mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempos de processamento t(u.t) das tarefas

Tarefa	Processador 1	Processador 2	Processador 3
T1	12	9	5
T2	12	12	7
T3	12	12	12
T4	12	12	12

O modelo executado no GAMS fornece, através do comando file out/out.txt; um arquivo de saída no formato txt, mostrando os melhores tempos de início e término de cada operação.

A partir do modelo proposto representado pelas equações 1 a 7e dos componentes que fazem parte do modelo de entrada do GAMS, foi possível a obtenção da sequência ótima com os melhores tempos de início e término de cada tarefa. A melhor sequência é mostrada na Figura 3 com tempo total de processamento de 69 u.t. (unidades de tempo).

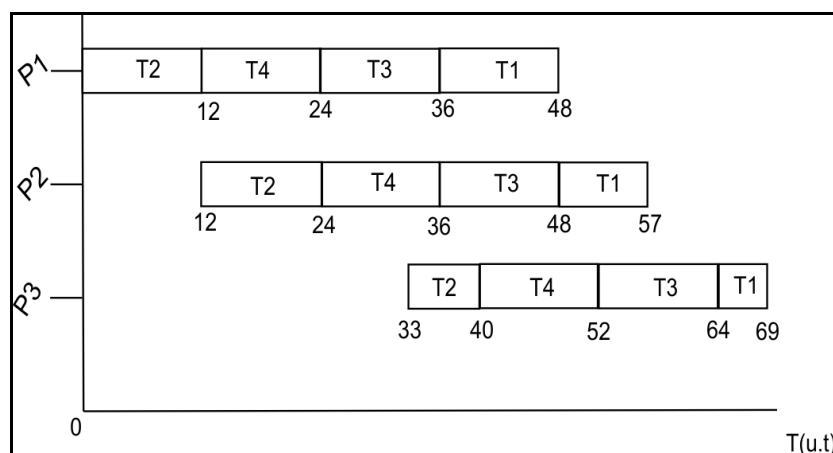


Figura 2 – Gráfico de Gantt referente ao problema de sequenciamento.

A Figura 2 ilustra a melhor sequência produtiva solucionada pelo GAMS, observa-se que a tarefa T2 inicia o processamento antes de T3.

5. Conclusão

O estudo do processo produtivo indicou a importância da programação matemática para o sequenciamento de produção em plantas de processamento de frutas. A implementação do modelo MILP, em linguagem GAMS, foi apresentada nas equações 1 a 7. O software GAMS foi capaz de encontrar o melhor tempo de execução das tarefas, 69 u.t. Assim, os resultados mostram que o modelo é útil para apoiar as decisões envolvidas no planejamento do processo de produção de polpa de fruta.

Agradecimentos

Agradecimento a Universidade Federal de Sergipe (UFS), através da Pró-Reitoria de Pós-graduação e Pesquisa.

Agradecimento a COPEs pela concessão da bolsa de iniciação científica do PIIC.

Referências

BARROS, Alexandre Damas e MOCCELLIN, João Vitor, Análise da flutuação do gargalo em *flow shop* permutacional com tempos de setup assimétricos e dependentes da sequência. **Gest. Prod.**, Abr 2004, vol.11, nº.1, p.101-108. ISSN 0104-530X.

BISPO, D. A., Desenvolvimento de interface gráfica para o sequenciamento de produção. **Scientia Plena**, Julho 2011, vol. 7, nº. 8, 07p., São Cristóvão, SE., Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFS.

CHEN, Jeng-Fung, WU, Tai-His, Total tardiness minimization on unrelated parallel machine scheduling with auxiliary equipment constraints. **Omega**, Sep. 2004, vol. 34, p. 81-89.

EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Polpa de fruta congelada**. Agroindústria familiar. Coleção, 2005.

IBRAF, Instituto Brasileiro de Frutas, *Marketing Fruta Brasileira*. Disponível em: <http://www.ibraf.org.br/servicos/ser_marketing.asp> Acesso em: 14 de Janeiro de 2012.

LOPES, Juliana dos Santos. **Análise e Otimização do Sequenciamento de Produção de uma Empresa de Médio Porte de Embalagens Plásticas**. Juiz de Fora, MG, 2008. 48f. (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF.

MATTA, Virgínia Martins da; JUNIOR, Murillo Freire; CABRAL, Lourdes Maria Corrêa; FURTADO, Angela Aparecida Lemos. **Polpa de Fruta Congelada**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 35p.

MORAIS, Márcia de Fátima e MOCCELLIN, João Vitor, Métodos heurísticos construtivos para redução do estoque em processo em ambientes de produção *flow shop* híbridos com tempos de *setup* dependentes da sequência. **Gest. Prod.**, Fev. de 2010, vol. 17, nº. 2, p. 367-375.

PAN, Quan-Ke e WANG, Ling, Effective heuristics for the blocking flowshop scheduling problem with makespan minimization, **Omega**, Jun. 2011, vol. 40, p. 218-229.

SANTOS, Edilson de Jesus, **Interferência lógica externa em problemas de programação de produção de sistemas flexíveis**. Campinas, SP, 1998. 231 p., Tese (doutorado), Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequenas Empresas. **Fábrica de Polpa de Fruta**. Idéia de Negócios. Coleção, 2011.

SECCHI, Prof. Agimiro R., **Otimização de processos**. Porto Alegre, RS, 2001-2005. 159 p., Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, UFRS.

SILVA, A. F., MARTINS, F. A. S., SILVA, G. M., LOPES, P. R. M. A., **Pesquisa Operacional:** Desenvolvimento e otimização de modelos matemáticos por meio da linguagem GAMS. São Paulo, SP. 2010. 107 p., UNESP.

TOLENTINO, Valéria R.; SILVA, Andréa Gomes da. **Processamento de Vegetais: Frutas/Polpa Congelada.** Programa Rio Rural, Niterói, RJ, Brasil, 2009.

TOSO, Eli Angela Vitor e MORABITO, Reinaldo, Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações. **Gest. Prod.**, Mai.-Ago 2005, vol. 12, n.º. 2, p. 203-217.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção:** teoria e prática. – 1. ed. – 2. reimpr. - São Paulo, SP Atlas 2008 xii, 190 p. ISBN 9788522448456.