Uma abordagem do Processo de Produção em Indústrias de Ampolas Térmicas com Margem de Segurança

Magna Paulina de Souza Ferreira

Claudio Fabiano Motta Toledo

Flaviana Moreira de Souza Amorim
Universidade de São Paulo
Instituto de Ciências Matemática e de Computação (USP–ICMC)
13566-590 – São Carlos, SP – Brasil
magnasouza@usp.br
claudio@icmc.usp.br
joflaviana@yahoo.com.br

Márcio da Silva Arantes
Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados
88032-005 – Florianópolis – SC – Brasil
marcio.arantes@sc.senai.br

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar os estudos desenvolvidos sobre problemas de dimensionamento de lotes para planejamento de produção em indústrias de recipientes de vidro. Essa abordagem representa a realidade da Indústria de Recipientes de Ampolas Térmicas (IRAT), cuja decisão a ser tomada consiste em dimensionar a quantidade de ampolas produzidos ao longo do tempo para atender a demanda. Considerando que, em um ambiente real, a produção pode sofrer variações de diferentes fontes de incerteza, nosso foco é na análise de ampolas considerando tais restrições com margem de segurança. Nossos casos de estudo são baseados em dados reais de uma IRAT. Os resultados mostraram uma certa robustez do modelo ao lidar com esses aspectos.

PALAVRAS CHAVE. Modelagem Matemática, Planejamento da Produção, Margem de Segurança.

Tópicos (IND - PO na Indústria, PM - Programação Matemática, OC - Otimização Combinatória)

ABSTRACT

The current project aims at presenting the developed studies regarding lot-size problems for production planning in industries of glass containers. That approach represents the reality of the Thermal Flask Industry (TFI), which the decision to be made consists of dimensioning the number of flasks produced over time in order to meet the demand. Considering that in a real environment,

https://proceedings.science/p/106870?lang=pt-br

the production can suffer variations from different sources of uncertainty, our focus is on the analysis of flasks considering such restrictions with a safety margin. Our study cases are based on real data from a TFI. Initial results point to a robust model at dealing with such aspects.

KEYWORDS. Mathematical Modelling, Production Planning, Safety Margin.

Paper topics (IND - OR in the industry, PM - Mathematical Programming, OC - Combinatorial Optmization)

1. Introdução

O planejamento e o sequenciamento da produção buscam alocar recursos de forma eficiente, atendendo as necessidades do cliente e a demanda do mercado, sendo problemas desafiadores à indústria. Um dos principais problemas de planejamento da produção incluem a determinação do dimensionamento e sequenciamento de lotes. As abordagens propostas na literatura para lidar com o planejamento da produção se mostram sofisticados e capazes de melhorar as operações de produção nas fábricas [Toledo et al., 2013].

Considerando o cenário de indústrias de recipientes de vidro, estamos lidando com sistema de produção em uma Indústria de Recipientes de Ampolas Térmicas (IRAT) localizada em Minas Gerais. O processo de produção em uma IRAT em geral é composto por duas etapas principais. Na primeira etapa, os componentes que constituem o vidro como sílica, barrilha, calcário e vidros recicláveis (cacos) são derretidos no forno. Na segunda etapa, os recipientes são produzidos em máquinas de moldagem.

O problema estudado neste trabalho considera dados reais, fornecidos por uma IRAT localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Neste empresa, há um único forno ligado a duas máquinas que fabricam cinco tipos de ampolas diferentes. O presente artigo extende um modelo matemático apresentado em Amorim et al. [2018a], buscando minimizar os custos envolvidos no processo de produção. Através desse modelo, foi introduzido uma novo parâmetro, com o objetivo de levar em consideração possíveis emprevistos que podem acontecer em uma IRAT como por exemplo, refugo por descarte de itens de qualidade inferior, mal funcionamento das máquinas, dentre outros. Dessa forma foi realizado uma análise do comportamento do modelo, dentro de uma taxa de risco considerada.

O problema abordado é um Problema na Indústria de Vidro - Recipientes de Ampolas (PIV-RA) considerando margem de segurança, o diferencial é que variáveis não consideradas na primeira versão são incorporadas, assim como novas restrições, contribuindo para um modelo mais compativel com a realidade da fábrica. A modelagem é implementada e resolvida na ferramenta *CPLEX* onde o algoritmo *branch & cut* do solver busca solucionar as instâncias do PIV-RA na otimalidade.

As abordagens consideradas apresentam duas contribuições principais. A primeira é a proposta de um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para o PIV-RA, voltado especificamente para a realidade e objetivos da IRAT considerada. A segunda contribuição é uma análise aprofundada do modelo considerando emprevistos em uma IRAT, que podem acarretar em um novo planejamento da produção.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 revisa trabalhos relacionados. Detalhes sobre o problema estudado são apresentados na seção 3 e a seção 4 introduz o modelo matemático. O método as instâncias e os resultados computacionais são reportados na seção 5. As conclusões seguem na seção 6.

2. Revisão da Literatura

Problemas dimensionamento de lotes para o planejamento da produção tem sido uma área de interesse de vários pesquisadores. Tal problema consiste em planejar a quantidade de itens a serem produzidos por uma ou várias máquinas em cada período, a fim de atender a uma determinada demanda. Em Fernandes e Nascimento [2017] é proposto uma abordagem do problema de dimensionamento de lotes em máquinas paralelas, em que são considerados múltiplos itens e máquinas distintas com restrição de capacidade. Outras abordagens são apresentadas em Ou e Feng [2019] e Cunha et al. [2018], por exemplo.

Considerando propostas que abrangem os estudos de problemas de dimensionamentos de lotes em indústrias de recipientes de vidro, em Almada-Lobo et al. [2008] os autores estudam o planejamento da produção a curto prazo, onde o objetivo é satisfazer as ordens diárias de produção e atender a demanda sem atrasos.

Os autores em Fachini et al. [2017] introduz um estudo pela primeira vez na literatura de dimensionamento e programação de lotes, duas especificidades do ambiente de produção de recipientes de vidro, a saber, variações de aquecimento e de extração de fornos. Um estudo conduzido em uma fábrica de garrafas de vidro é apresentado, na qual os resultados se mostraram promissores.

Um problema de longo prazo na produção de garrafas de bebidas é estudado em Guimarães et al. [2012]. A modelagem abordada consiste em atribuir e programar lotes de produção em um ambiente com diversas plantas, onde a transferência de produtos finais entre plantas é considerada.

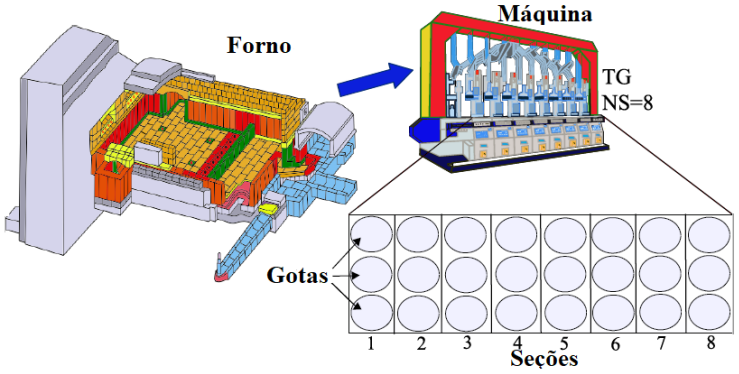
O problema do planejamento da produção na indústria de embalagens de vidro é resolvido por Amorim et al. [2017] aplicando três tipos diferentes de algoritmos genéticos (AG): um GA simples e dois AG multi-populacionais com estruturas de árvore e grade, respectivamente. Em Amorim et al. [2018b], é introduzida uma heurística de aproximação na qual a solução é construída por uma heurística Relax-and-Fix (R&F) e melhorada por uma heurística Fix-and-Optimize (F&O). Esses dois trabalhos compararam os resultados obtidos com aqueles fornecidos pelo método exato B&C usando a ferramenta comercial IBM ILOG CPLEX.

Os resultados preliminares para o PIV-RA, foram apresentados pela primeira vez no trabalho de Amorim et al. [2018a], onde a formulação matemática é descrita e alguns resultados são relatados. O artigo atual estende a modelagem anterior, introduzindo novas váriaveis para o problema e uma análise aprofundada dos novos resultados computacionais é relatada.

3. Problema na Indústria de Vidro - Recipientes de Ampolas

Na fabricação de recipientes de vidro em geral, as indústrias possuem diversas plantas de produção, na qual podem possuir quantidades diferentes de fornos com diversas capacidades e configurações complexas [Garavelli, 2003]. Uma máquina pode ser conectada apenas em um forno a partir do qual a pasta de vidro é recebida. Um forno pode conectar-se simultaneamente várias máquinas como mostra a Figura 1. Durante o processo de produção, as configurações das máquinas conectadas a um forno devem ser definidas de acordo com a previsão da demanda em um determinado horizonte de tempo. As configurações das máquinas é de acordo com o tipo de gota (TG) e números de seções (NS), que são os blocos numerados da Figura 1 onde encontram-se as gotas, que são variáveis. As bocas são as aberturas que receberão o vidro derretido, representadas pelos canos duplos na máquina.

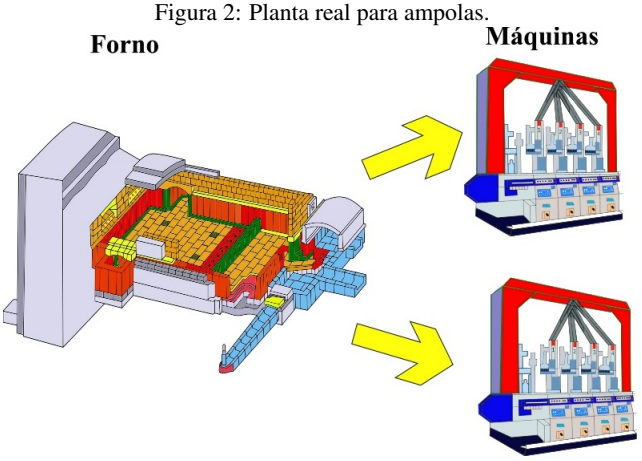
Figura 1: Ilustração das seções e gotas.



Fonte: [Amorim et al., 2018a].

A Figura 2 representa aspectos relacionados a planta real da fábrica e suas instalações. Um forno com capacidade limitada de derretimento do vidro e funciona como um refratário para a composição pastosa. Este material é direcionado para as máquinas, tais máquinas possuem diferentes configuraçõe. A indústria em estudo apresenta um único forno regenerativo com porta traseira, como ilustrado na Figura 2, ligado a duas máquinas que possuem a mesma configuração de quatro seções e gota dupla. Essas máquinas operam em conjunto para a produção de um mesmo produto.

Figura 2: Planta real para ampolas.



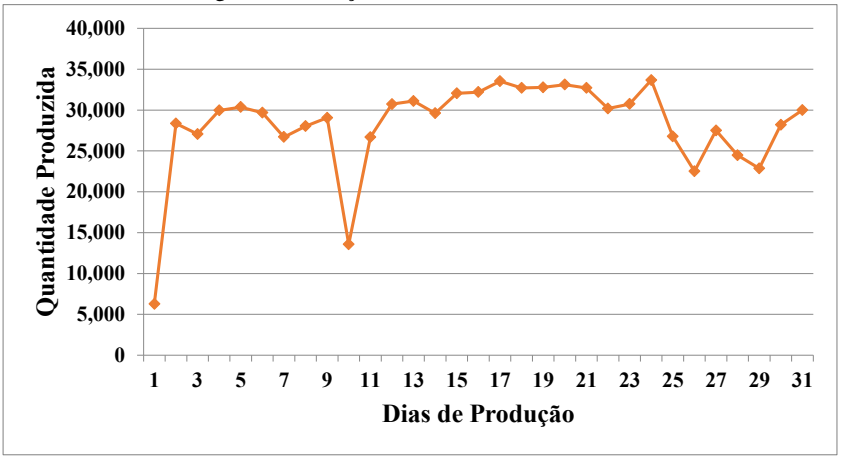
Fonte: [Amorim et al., 2018a].

As ampolas produzidas variam de acordo com o peso e o custo de produção. Uma extração diária é prevista para cada tipo de ampola, considerando um dia de produção sem *set-up*. Também são considerados na fábrica demanda empurrada, avaliação do desperdício e *ramp-up*. Como a demanda é empurrada, há inceretezas durante o processo de produção, atualmente o tratamento de tal incerteza é baseado no uso de um estoque de segurança. A avaliação do desperdício considera o impacto do refugo ($scrap$) na produtividade, ou seja, itens produzidos que serão descartados por má qualidade. A duração de um *set-up* é de aproximadamente 8 horas. Após o *set-up* a produção dos produtos nos primeiros horizonte de tempo é instável, acarretando assim em uma perda maior na produção, essa variação na produção é chamada de *ramp-up*. A duração de um *ramp-up* é de

aproximadamente 72 horas, após isso será atingido a produção diária normal.

A Figura 3 representa a produção de determinados produtos durante um mês. Notamos que ocorre uma queda na produção em alguns dias, tal fato acontece devido ao *set-up* executado nos dias 1 e 10 daquele mês.

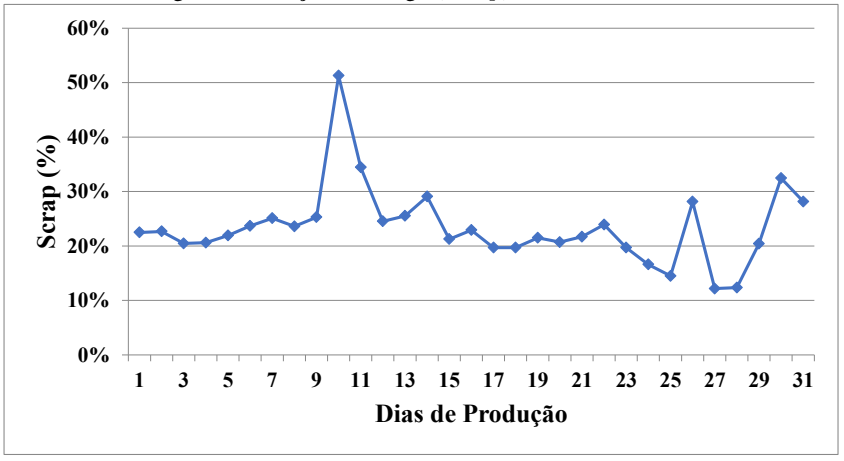
Figura 3: Produção realizada durante um mês.



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a Figura 4, observamos que acontece uma variação maior do refugo após a ocorrência da troca de produtos.

Figura 4: Variação do refugo ($scrap$) durante um mês..



Fonte: Elaborada pela autora.

Em um ambiente fabril, alguns aspectos devem ser levados em consideração como, por exemplo, um mal funcionamento das máquinas que pode acarretar menor quantidade de produção. Com o objetivo de abordar possíveis imprevistos em uma IRAT, um parâmetro F_i, denotado como margem de segurança, é incorporado ao modelo matemático a ser apresentado para o problema. Dessa forma, F_i representa a perda de produção esperada que ocorre durante as incertezas geradas por um *ramp-up* mal sucedido. De uma forma aproximada, $F_i = K * \lambda$, onde K é uma constante

que pode ser estimado empiricamente baseado em estudos realizados sobre a variação produtiva da fábrica. O parâmetro λ é escolhido estrategicamente para um planejamento seguro dentro de uma margem aceitável. Por exemplo, a escolha de $\lambda = 0.1$ representa uma taxa de risco de 10% considerada sobre o valor de K.

Sendo assim, foi possível analisar o comportamento do modelo influenciado por essa taxa de segurança, a variação do custo da solução para a fábrica e a factibilidade do modelo. Inicialmente são definidos os índices, parâmetros e variáveis.

4. Modelagem Matemática

Essa sessão descreve o modelo matemático desenvolvido para tratar o PIV-RA. Inicialmente são definidos os conjuntos, parâmetros e variáveis.

Conjuntos:

- i: produtos a serem fabricados $i \in \{1, ..., m\}$.
- t: Horizonte de tempo $t \in \{1, ..., T\}$.
- s: Dias de *ramp-up* $s \in \{1, ..., S\}$.

Parâmetros:

- C_i: Custo real do produto i.
- D_{it}: Demanda do produto i no período t.
- I_{i0}: Estoque inicial do produto i no período $t = 0$.
- P_i: Peso do produto i. (g)
- Q_i: Quantidade de extração de ampolas i em um dia normal, sem *set-up*.
- R_i: Refugo do produto i.
- L_{is}: Taxa de *ramp-up* do produto i nos dias s.
- ES_i: Estoque de segurança do produto i.
- M: Big M, um valor positivo grande.
- F_i: Margem de segurança.
- λ: Taxa de risco.

Variáveis:

- I_{it}: Estoque do produto i no período t. (quantidade de ampolas ou potes)
- Y_{it}: 1 se há produção do produto i no período t, 0 caso contrário.
- PL_{it}: Produção líquida do produto i no período t.
- PT_{it}: Produção total do produto i no período t.
- S_{it}: 1 se iniciou a produção do produto i no período t, 0 caso contrário.
- W_{its}: 1 se houve *set-up* do produto i no período t no dia s, 0 caso contrário.
- V_{its}: Variável auxiliar para linearização.
- B: O maior número de vezes que o estoque de segurança foi ultrapassado.

4.1. Formulação matemática para o PIV-RA

A função objetivo (1) minimiza os custos de *set-up* e *ramp-up*, enquanto $\sum_i B*ES_i*C_p*0.01$ é um recurso matemático a fim de evitar a produção exagerada de um determinado produto, após atingir o estoque segurança.

$$Min \quad \sum_i \sum_t \sum_s Wpts * Q_i * (1 - L_{is}) * C_i + \sum_i B * ES_i * C_i * 0.01 \tag{1}$$

A restrição (2) representa a equação de balanceamento de estoque.

$$I_{it} = PL_{it} + I_{it-1} - D_{it} \qquad \forall (i, t \geq 1) \tag{2}$$

A restrição (3) equilibra o estoque de segurança, penalizando na função objetivo o maior número de vezes B que esse estoque foi ultrapassado.

$$\frac{I_{it}}{ES_i} \leq B \qquad \forall (i, t) \tag{3}$$

As restrições (4), (5), (6) e (7) representam uma linearização para o produto não linear de $V_{its} = W_{its} * PT_{it}$,

$$V_{its} \geq PT_{it} - M * (1 - W_{its}) \quad \forall (i, t, s) \tag{4}$$

$$V_{its} \leq PT_{it} + M * (1 - W_{its}) \quad \forall (i, t, s) \tag{5}$$

$$W_{its} * M \geq V_{its} \quad \forall (i, t, s) \tag{6}$$

$$-W_{its} * M \leq V_{its} \quad \forall (i, t, s) \tag{7}$$

A restrição (8) obtém a produção líquida de ampolas da seguinte forma: se houver *set-up* do produto, então temos a influência do *ramp-up* durante aproximadamente três dias. Assim, $PLit = \sum_s V_{its} * L_{is}$ onde L_{is} é uma porcentagem de PT_{it}. Caso não haja *set-up* do produto, então $PL_{it} = (PT_{it} - \sum_s V_{its}) * (1 - R_i)$. Nesse caso, temos apenas a influência do refugo na produção dos itens. Por fim, $-F_i * Y_{it}$ representa possíveis imprevistos que podem acontecer no processo de produção.

$$PL_{it} = \sum_s V_{its} * L_{is} + (PT_{it} - \sum_s V_{its}) * (1 - R_i) - F_i * Y_{it} \qquad \forall (i, t) \tag{8}$$

A restrição (9) afirma que a produção total deve ser igual a capacidade produtiva da máquina em um dia normal somente se o produto estiver ativado.

$$PT_{it} = Q_i * Y_{it} \qquad \forall (i, t,) \tag{9}$$

A restrição (10) permite que se tenha apenas uma ampola ativado na máquina por vez.

$$\sum_i Y_{it} = 1 \qquad \forall (t) \tag{10}$$

As restrições (11) e (12) representam o *se-tup*, onde a diferença entre o produto ativo no período atual e no período anterior determinam se ocorre ou não o *set-up*.

$$S_{it} \geq Y_{it} - Y_{i(t-1)} \qquad \forall (i, t > 1) \tag{11}$$

$$S_{it} = Y_{it} \qquad \forall (i, t = 1) \tag{12}$$

A restrição (13) determina os estágios do *ramp-up* após a ocorrência de *set-up* do produto.

$$S_{it} = W_{i(t+s)s} \qquad \forall (i, s, t < T - s) \tag{13}$$

As restrições (14) e (15) representam os domínios binários e contínuos, respectivamente, das variáveis.

$$Y_{it}, S_{it}, W_{its} \in \{0, 1\} \tag{14}$$

$$I_{it}, PL_{it}, PT_{it}, V_{its}, B \geq 0 \tag{15}$$

5. Resultados Computacionais

Os modelos foram codificados em linguagem java através da ferramenta Professional Optimization Framework (ProOF) [Arantes, 2013] e solucionados pelo *solver* CPLEX. Os testes computacionais foram realizados em um computador com um processador Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU 2.70 GHz e 8 GB de RAM e sistema operacional de 64 bits Windows 10. O modelo de programação linear inteira mista permite a resolução na ferramenta CPLEX.

Os conjuntos de instâncias são definidos de maneira similar aos utilizado no trabalho Amorim et al. [2018a], considerando a quantidade de ampolas (*A*) e seu valor variando entre 1 e 5. Isso é combinado com os períodos de sete dias, 30 dias e 90 dias com as seguintes notações: *T7*, *T30* e *T90*. Por exemplo, a instância A3T7 indica que o cenário considera a produção de três ampolas diferentes em um período de planejamento de sete dias. Para a análise realizada neste trabalho, um grupo com 10 instâncias foram gerados a partir de dados reais fornecidos por uma IRAT, porém os valores das demandas foram alterados para ser possível as análises.

5.1. Análises do Modelo com Margem de Segurança

5.1.1. Análise 1

Nessa análise foi avaliado o comportamento do modelo levando em consideração o valor máximo da taxa de risco λ que mantém a factibilidade do modelo. A tabela 1 apresenta os valor da Função Objetivo (F0) considerando o modelo com o parâmetro de margem de segurança F_i, e sem o parâmetro de margem de segurança F_i, a taxa máxima de segurança e a quantidade de *set-up* realizados durante o planejamento para os dois modelos.

Análise do Modelo					
Instâncias	FO com F_i	FO sem F_i	taxa máxima de risco (λ)	*set-up* com F_i	*set-up* sem F_i
A2T07	338340	212730	$\lambda = 13\%$	3	2
A2T30	309020	154510	$\lambda = 20\%$	4	2
A2T90	768470	576350	$\lambda = 15\%$	8	6
A3T30	194080	191820	$\lambda = 23\%$	3	3
A5T07	426420	276080	$\lambda = 20\%$	4	3

Tabela 1: Análise 1

As instâncias A2T07, A2T30, A2T90 e A5T07 representam a produção de duas e cinco ampolas em um horizonte de tempo de sete, trinta e noventa dias. Considerando a solução do modelo com uma taxa máxima de segurança variando de 13% à 20%, notamos que a quantidade de *set-up* aumenta comparado ao modelo sem o parâmetro de margem de segurança F_i. Essa influência tem uma interferência direta no valor da FO, pois quantidades a mais em *set-up* levam a custos

maiores. Embora os custos sejam maiores, deve-se ressaltar que a IPPA possui demanda de valores consideráveis, e o não atendimento de uma demanda leva a penalidades contratuais.

A instância A5T30 representa a produção de cinco ampolas em um horizonte de tempo de trinta dias. Neste caso, considerando o máximo de taxa de risco de 23%, temos que as quantidades de *set-up* dos modelos são as mesmas, porém a quantidade de *set-up* por produto são diferentes.

5.1.2. Análise 2

De forma análoga à análise 1, foi avaliado o comportamento do modelo levando em consideração uma taxa máxima de risco que pode ocorrer durante o processo de produção, sem haver alterações nos custos do modelo.

Análise dos Modelos					
Instâncias	FO com F_i	FO sem F_i	taxa máxima de risco (λ)	*set-up* com F_i	*set-up* sem F_i
A3T07	95003	95003	$\lambda = 19\%$	2	2
A3T90	133100	133100	$\lambda = 25\%$	2	2
A4T07	219580	219580	$\lambda = 27\%$	3	3
A4T30	274990	274990	$\lambda = 25\%$	6	6
A5T30	155810	155810	$\lambda = 25\%$	4	4

Tabela 2: Análise 2

As instâncias A3T07, A3T90, A4T07, A4T30 e A5T30 representam a produção de três, quatro e cinco ampolas em um horizonte de tempo de sete, trinta e noventa dias. Como apresentado na Tabela (2), os custos da FO não se alteram, considerando um intervalo de margem de segurança de 19% à 27%. Neste caso, a demanda planejada é atendida considerando imprevistos na produção, mantendo o planejamento ótimo já obtido.

Em um estudo comparativo dos dois cenários apresentados, foi verificado que na análise 2 as demandas das instâncias podem ser atendidas sem que haja alterações de *set-up*, sendo assim, mesmo com taxa de risco máxima os custos são os mesmos.

5.2. Avaliação da Margem de Segurança

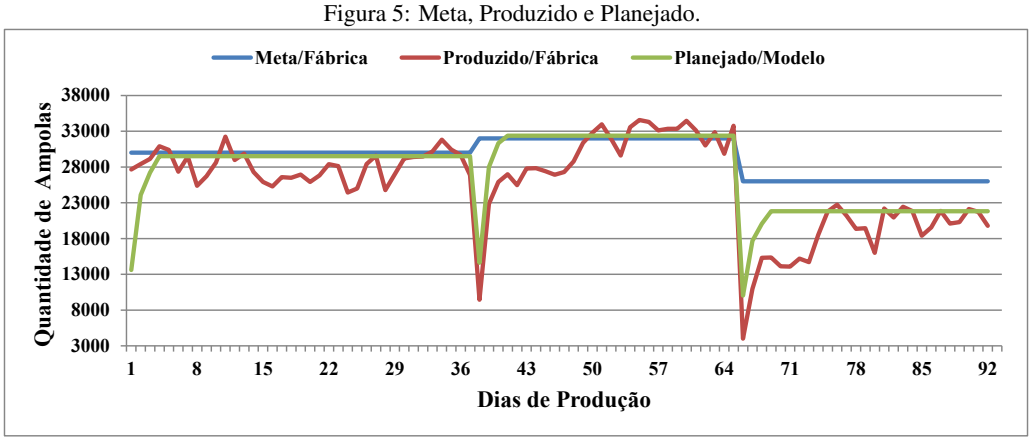
Neste cenário será comparado a produção em relação ao produzido pela fábrica e o estudo de dois casos de instâncias com varições no parâmetro da taxa de risco.

A Figura 5 representa a meta de produção da fábrica comparada ao planejamento obtido através do modelo proposto e a produção real da fábrica dentro de um trimestre do ano de 2018. Nota-se que o planejamento do modelo se aproximou em valores médios da produção real. Por se tratar de um cenário com variáveis incertas, é natural que a produção sofra variações em torno do valor esperado.

Podemos observar também, que o modelo é capaz de prever melhor a produção real comparado a meta proposta pela fábrica, pois se aproxima melhor do que de fato foi produzido. Tais variações na produção ocorrem devido a imprevistos envolvidos no processo ou a um *ramp-up* mal sucedido, isso é notável se olharmos a produção entre os dias 37-48 e 66-75.

Portanto, a abordagem de um planejamento envolvendo um parâmetro de margem de segurança se torna bastante relevante, visto que na prática a produção de fato pode passar por alterações nem sempre esperadas.

Figura 5: Meta, Produzido e Planejado.

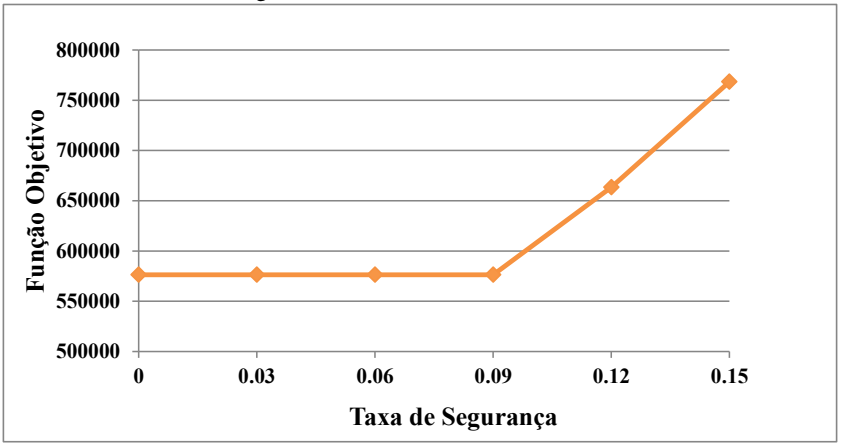


Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 6 representa a variação da função objetivo em função da taxa de risco para a instância A2T90, ou seja, a produção de duas ampolas durante noventa dias. Neste caso, temos que o planejamento é o mesmo até uma margem de segurança de 0.09. Para termos um planejamento mais seguro, com uma taxa de aumento de 0.03, ou seja, uma margem de segurança de 0.12, há alterações no valor da função objetivo.

Logo, para que a fábrica tenha uma maior segurança em atendimento as demandas nos dias previstos, acréscimos ao valor da função objetivo devem ser considerados.

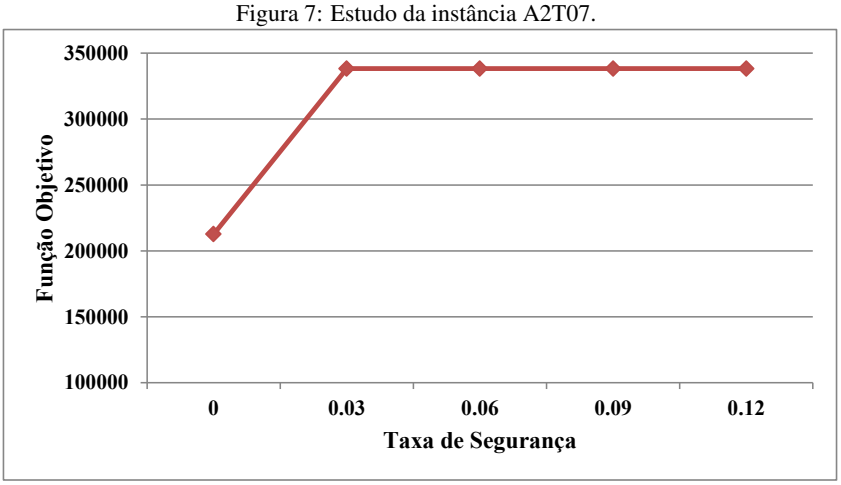
Figura 6: Estudo da instância A2T90.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 7 representa a variação da função objetivo em função da taxa de risco para a instância A2T07, ou seja, a produção de duas ampolas durante sete dias. Nesse planejamento em específico, notamos que não seria possível atender a demanda sem considerar imprevistos na produção, pois com uma margem de segurança de 2% já se obtém outro planejamento com um aumento no valor da função objetivo.

Figura 7: Estudo da instância A2T07.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 mostram que o tratamento determinístico do modelo pode levar a um planejamento que na realidade não cumpre o atendimento a demanda. Portanto, o uso de modelos estocásticos ou com margem de segurança possibilitaria a obtenção de um planejamento mais adequado considerando as incertezas na variação da produção.

6. Conclusões

Este trabalho introduziu um modelo desenvolvido especificamente atender a realidade de uma indústria de recipientes de vidro, com a aplicações de um método exato para resolver o PIVRA. Primeiro, uma formulação de programação linear mista inteira é introduzida e o conjunto de instâncias é gerado com dados reais.

O estudo do modelo a respeito das incertezas e variações da produção diária, foi realizado com a adição de uma margem de segurança agindo sobre a produção líquida. Os resultados mostraram que em alguns cenários é possível obter novos planejamentos para atender a demanda prevista. Em outras casos, é considerado uma taxa máxima de risco, sem a necessidade de uma alteração no planejamento da produção.

Fatores que podem influenciar esses possíveis imprevistos não eram tratados em trabalhos anteriores, portanto observa-se uma robustez no modelo proposto para lidar com essas situações. Como trabalhos futuros pretende-se estender esse estudo considerando o modelo com tratamento estocásticos das variações produtivas.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq-grant 483474/2013-4), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Pesquisa desenvolvida com utilização dos recursos computacionais do Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria (CeMEAI), financiados pela FAPESP (proc. 2013/07375-0).

Referências

Almada-Lobo, B., Oliveira, J. F., e Carravilla, M. A. (2008). Production planning and scheduling in the glass container industry: A vns approach. *International Journal of Production Economics*, 114(1):363–375.

Amorim, F. M. S., Arantes, M. S., Toledo, C. F. M., e Ferreira, M. P. S. (2018a). Estudo do caso do planejamento da produção em indústrias de ampolas térmicas. Rio de Janeiro. 50º Congresso Brasileiro de Pesquisa Operacional.

Amorim, F. M. S., Arantes, M. S., Toledo, C. F. M., Frischc, P. E., Arantes, J. S., e Almada-Lobo, B. (2017). Genetic algorithms approaches for the production planning in the glass container industry. p. 92.

Amorim, F. M. S., Arantes, M. S., Toledo, C. F. M., e Almada-Lobo, B. (2018b). A mathematical model and heuristic approach for the production planning in the glass container industry. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 6(1).

Arantes, M. S. (2013). Professional optimization framework (ProOF). *Version 2.4.0*. URL `https://github.com/marcio-da-silva-arantes/ProOF/wiki`. Acesso em: 07/09/2018.

Cunha, A. L., Santos, M. O., Morabito, R., e Barbosa-Póvoa, A. (2018). An integrated approach for production lot sizing and raw material purchasing. *European Journal of Operational Research*, 269(3):923–938.

Fachini, R. F., Esposto, K. F., e Camargo, V. C. B. (2017). Glass container production planning with warm-ups and furnace extraction variation losses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4):527–543.

Fernandes, C. C. e Nascimento, M. C. (2017). Análise de modelos para o problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas. Blumenau. XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

Garavelli, A. C. (2003). Flexibility configurations for the supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 85:141–153.

Guimarães, L., Klabjan, D., e Almada-Lobo, B. (2012). Annual production budget in the beverage industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2):229–241.

Ou, J. e Feng, J. (2019). Production lot-sizing with dynamic capacity adjustment. *European Journal of Operational Research*, 272(1):261–269.

Toledo, C. F. M., da Silva Arantes, M., De Oliveira, R. R. R., e Almada-Lobo, B. (2013). Glass container production scheduling through hybrid multi-population based evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*, 13(3):1352–1364.