



## DIMENSIONAMENTO INTEGRADO DE LOTES E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS: UMA REVISÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA INTERNACIONAL NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS

Hesau Hugo Cavalcanti Leite (UFPR) hesau.hugo@ufpr.br  
José Eduardo Pécora Junior (UFPR) pecora@ufpr.br

### Resumo

O dimensionamento integrado de lotes e programação da produção é um problema complexo que tem sido amplamente estudado nas últimas décadas devido à sua relevância para as indústrias. Este artigo revisa as características do dimensionamento integrado de lotes e programação da produção, bem como os trabalhos do estado da arte. A metodologia adotada foi a revisão bibliográfica, abordando de forma descritiva as características do dimensionamento de lotes e os trabalhos dos últimos 5 anos, utilizando a base Scopus, livros e teses. O objeto deste estudo serve de apoio aos gestores para tomadas de decisões, otimizando o uso dos recursos na cadeia de suprimentos e reduzindo os custos envolvidos no processo produtivo. O resultado desta pesquisa indica que os estudos recentes destacam a importância de abordagens realísticas, como múltiplos estágios produtivos, máquinas em paralelo em cada estágio, sincronia entre estágios produtivos e perecibilidade dos itens.

**Palavras-chave:** Gestão da Cadeia de Suprimentos, Programação Linear Inteira Mista, PLIM, Heurísticas.

### 1. Introdução

O dimensionamento integrado de lotes e programação da produção pode ser encontrado no planejamento da produção de empresas de manufatura, onde o processo é por bateladas como por exemplo de fundição e em fábricas de acessórios de borracha. E ainda em indústrias de fluxo contínuo, tais como papel e celulose, fabricação de bebidas, cimento, processamento de comida, lingotamento contínuo de chapas de aço, embalagens de vidro e fabricação de açúcar. Em indústrias de bens de consumo é normal que tenham diversos tipos de itens que precisam ser produzidos em várias linhas de produção em paralelo com um fluxo contínuo, existindo ainda uma interdependência entre as estações de trabalho. Além disso, no processo produtivo haverá estágios com capacidades limitadas e uma demanda com uma data de entrega prevista variando ao longo do tempo. Quando a produção de um tipo de item é finalizada e a linha precisa ser configurada para que um outro seja produzido, diz-se que haverá nela um tempo de preparação (tempo de *setup*). Os gastos com essas preparações podem depender da sequência na qual itens de diferentes famílias são produzidos. Por isso ainda se faz importante o estudo desse tema em diversos contextos. As modelagens matemáticas DLSP (*Discrete lotsizing and scheduling problem*) de Fleischmann (1990), CLSP (*Continuous lotsizing and scheduling problem*) de Karmarkar e Schrage (1985), PLSP (*Proportional lotsizing and scheduling*



*problem*) de Drexl e Haase (1995), CSLD (*Capacitated lotsizing problem with sequence-dependent setups*) de Haase (1996), GLSPLS (*General lotsizing and scheduling problem with loss of setup state*) de Fleischmann e Meyr (1997) e GLSPCS (*General lotsizing and scheduling problem with conservation setup state*) de Fleischmann e Meyr (1997) são as mais clássicas. Copil *et al.* (2016) explicam que tais modelagens abordam decisões de dimensionamento de lotes e de programação da produção com objetivo de minimizar a soma dos custos de *setup* e de manter quantidades em estoque, elas consideram datas de entrega e capacidades finitas. Na resolução das modelagens encontra-se na literatura o emprego de diversas heurísticas, metaheurísticas e soluções híbridas, alguns métodos de otimização como por exemplo B&B (*Branch and bound*), B&C (*Branch and cut*), DP (*Dynamic programming*), MIP (*Mixed integer programming solvers*) e entre outros. Para os métodos híbridos de otimização e heurística podem ser encontrados os baseados em B&B, DP e MIP *solvers*. Assim como as metaheurísticas GA (*Genetic algorithm*), SA (*Simulated annealing*), TS (*Tabu search*) e GRASP (*Greedy adaptive search procedure*).

Como os estudos recentes abordam o dimensionamento integrado de lotes e programação da produção em múltiplos estágios? Para responder a essa pergunta, o presente artigo busca, em um primeiro momento, explicar as características do dimensionamento de lotes e sua relevância para os sistemas avançados de planejamento. Em um segundo momento, são descritos os trabalhos do estado da arte, ressaltando suas contribuições, metodologias e aplicações.

## **1.1. Objetivo**

Revisar o problema de dimensionamento integrado de lotes e programação da produção e abordar os trabalhos do estado da arte em ambientes produtivos de múltiplos estágios.

## **1.2. Metodologia**

O tipo da pesquisa é descritivo com base em levantamentos bibliográficos.

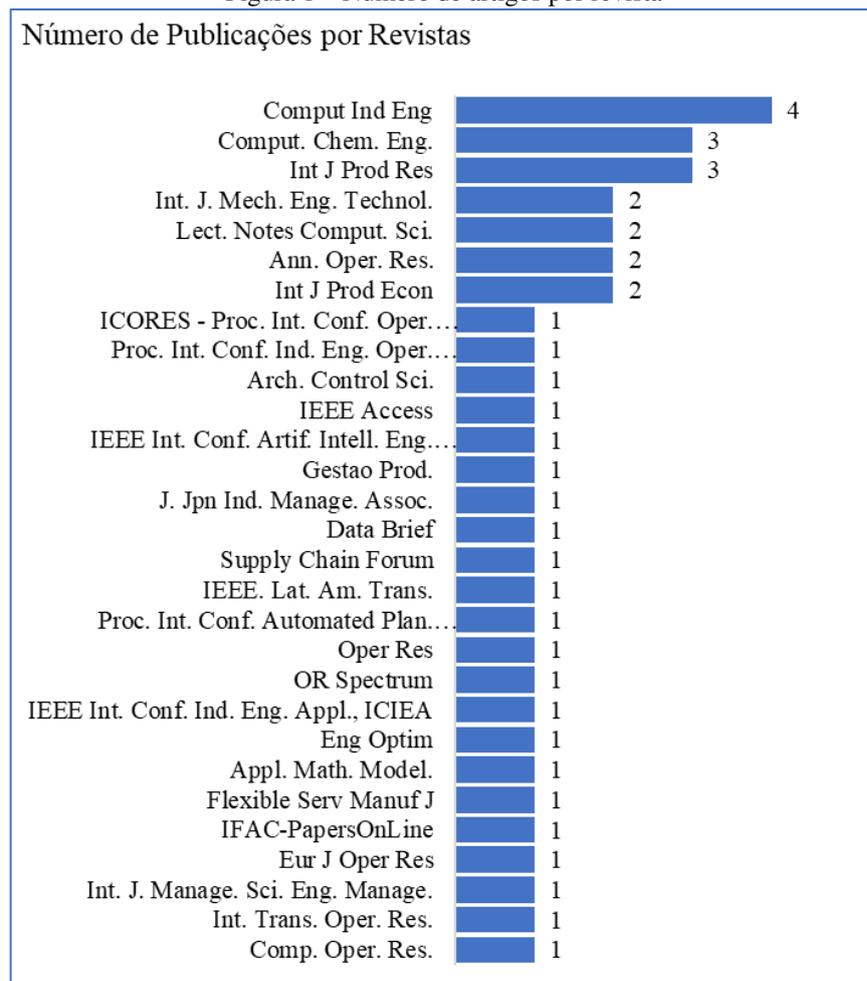
### **1.2.1. Abordagem**

Foi realizado primeiramente uma pesquisa na base de dados Scopus para encontrar os artigos do estado da arte. Para compor a revisão, além dos artigos pesquisados, usou-se artigos retirados dos referenciais bibliográficos dos artigos do estado da arte. As outras referências foram escolhidas a critério dos autores. A seleção das referências será explicada a seguir.

### 1.2.1.1 Referências bibliográficas do estado da arte

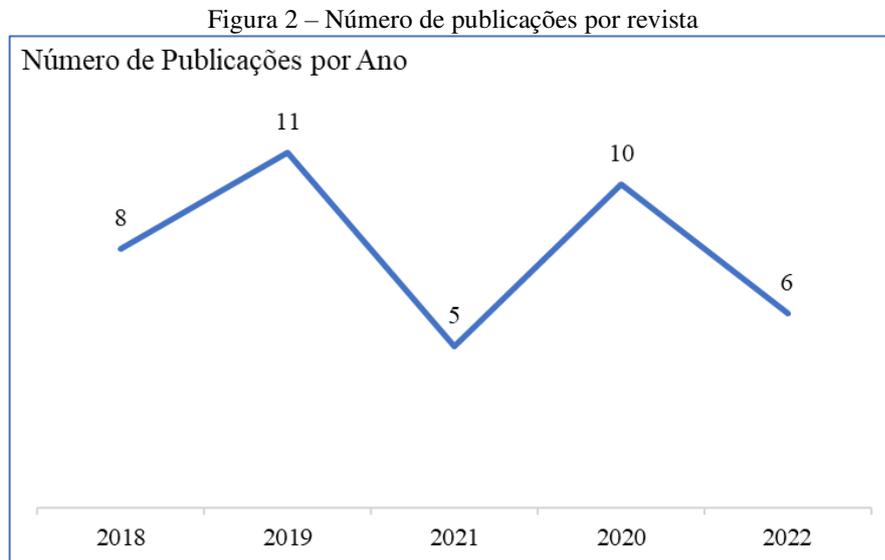
Para a pesquisa dos trabalhos dos últimos cinco anos utilizou-se a base de dados Scopus filtrando os seguintes termos na opção de pesquisa avançada: TITLE-ABS-KEY ( ( lotsizing OR lot-sizing OR ( lot AND sizing ) ) AND scheduling ) AND TITLE-ABS-KEY ( two-level OR three-level OR multi-level OR multi-stage OR two-stage OR three-stage ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2022 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2021 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) ). Onde TITLE-ABS-KEY significa que os termos serão buscados no título do arquivo, resumo e palavras-chave respectivamente. Até a data de 17/11/2022 o filtro acima resultou em um total de 40 publicações contidas em 29 revistas, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Número de artigos por revista



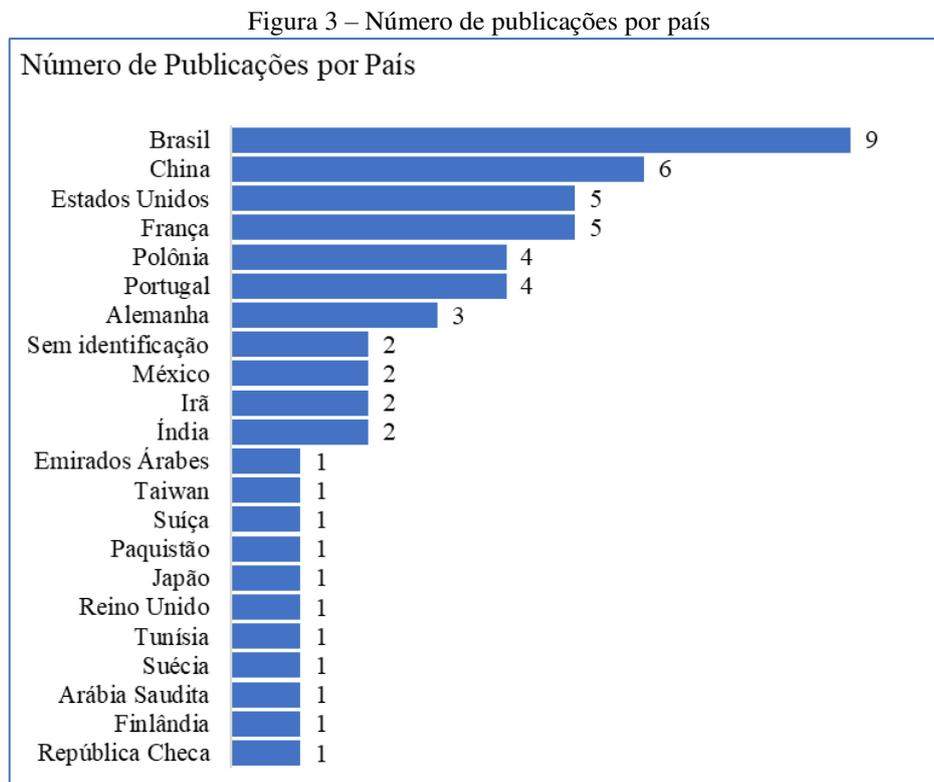
Fonte: Os autores (2023)

O ano com maior número de publicações foi o de 2019 contanto com 11 documentos conforme apresentado na Figura 2.



Fonte: Os autores (2023)

Os países com mais publicações são Brasil, China, Estados Unidos, França, Polônia e Portugal, que possuem 9,6,5,5,4,4 publicações respectivamente, conforme é apresentado na Figura 3.



Fonte: Os autores (2023)

Após a análise dos documentos 35 foram excluídos e os critérios foram os seguintes:

- a) 2, por não obter o acesso na íntegra;
- b) 19, pelo fator de impacto da revista ser abaixo de 3;
- c) 14, pelo tema não estar alinhado com o proposto no artigo.

### 1.2.1.2 Outras referências bibliográficas

Esta subseção apresenta os referenciais teóricos usados na revisão bibliográfica. O número de citações foi retirado da base Google Scholar na data de 10/03/2023, os referenciais foram selecionados a critério dos autores, onde analisaram a relação com o tema estudado e os links com as publicações encontradas no estado da arte.

Para compor a revisão bibliográfica analisou-se as referências dos artigos coletados e deles selecionou-se 12 artigos conforme são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Artigos selecionados das referências dos artigos do estado da arte

Ano	Autores	Título	Citações
1958	Wagner, H. M.; Whitin, T. M.	<i>Dynamic version of the economic lot size model</i>	3756
1982	Bitran, G. R.; Yanasse, H. H.	<i>Computational complexity of the capacitated lot size problem</i>	773
1985	Karmarkar, U.S.; Schrage, L.	<i>The deterministic dynamic product cycling problem</i>	265
1990	Fleischmann, B.	<i>The discrete lot-sizing and scheduling problem</i>	414
1995	Drexl, A.; Haase, K.	<i>Proportional lotsizing and scheduling</i>	229
1996	Haase, K.	<i>Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs</i>	224
1997	Fleischmann, B.; Meyr, H.	<i>The general lotsizing and scheduling problem</i>	415
2000	Haase, K.; Kimms, Alf.	<i>Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities</i>	232
2002	Meyr, H.	<i>Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines.</i>	290
2006	Zhu, X.; Wilhelm, W. E.	<i>Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review</i>	316
2009	Ferreira, D.; Morabito, R.; Rangel, S.	<i>Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem</i>	212
2016	Copil, K. et al.	<i>Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models</i>	173

Fonte: Os autores (2023)

Para entender a problemática do tema selecionou-se 6 livros a critério dos autores, eles auxiliam no entendimento das características, aplicações, técnicas e dentre outros assuntos relacionados ao tema proposto. A seguir no Quadro 2 eles são apresentados.

Quadro 2- Livros usados como referencial teórico

Ano	Autores	Título	Citações
2006	Pochet, Y.; Wolsey, L. A.	<i>Production planning by mixed integer programming</i>	1366
2009	Talbi, El-Ghazali	<i>Metaheuristics: from design to implementation</i>	4730
2011	Arenales, M. N. <i>et al.</i>	Pesquisa Operacional	676
2013	Seeanner, F.; Meyr, H	<i>Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling for flow line production</i>	73
2015	Stadtler, H.	<i>Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies</i>	2180
2019	Ramya, R. <i>et al.</i>	<i>Capacitated Lot Sizing Problems in Process Industries</i>	12

Fonte: Os autores (2023)

O Quadro 3 apresenta uma tese de doutorado que foi selecionada para compor o referencial teórico, esta tese aborda de forma detalhada as principais formulações matemáticas do tema estudado, bem como apresenta diversas formulações matemáticas aplicadas a um ambiente produtivo de múltiplos estágios.

Quadro 3- Tese usada como referencial teórico

Ano	Autores	Título	Citações
2015	Ulbricht, G	Um modelo de planejamento da produção multiestágio com estoques intermediários limitados	3

Fonte: Os autores (2023)

A Figura 4 Apresenta um gráfico de pizza com os referenciais bibliográficos por tipo abordados nesta subseção, como pode-se observar o maior número percentual são artigos correspondendo a 63% do total dos documentos.

Figura 4 – Referências por tipo



Fonte: Os autores (2023)



## 2. Características das modelagens de dimensionamento de lotes

Wagner e Whitin (1958) desenvolveram uma modelagem matemática considerando uma demanda dinâmica, bem como estoques e custo de *setup* ao longo de um determinado período, desenvolveram para a resolução do modelo um algoritmo, atingindo por meio desse a minimização do custo total da produção. Desde então, classes do problema de dimensionamento de lotes foram desenvolvidas, como por exemplo no estudo de Bitran e Yanasse (1982), onde além de propor classificações estudaram a complexidade computacional do dimensionamento de lotes, sob condições de um problema de máquina única e item único, concluindo que o mesmo podia ser resolvido em tempos polinomiais, já no caso de dois itens o problema se tornou NP-Difícil.

Ramya *et al.* (2019) explicam as características básicas e atributos do problema de dimensionamento de lotes e elas serão apresentadas nessa seção.

### 2.1. Características e atributos relacionados ao tempo

#### 2.1.2. Horizonte de planejamento

Modelos de dimensionamento de lotes são desenvolvidos para planejar a produção com base em um horizonte de planejamento que pode ser finito ou infinito. Um horizonte finito, quer dizer que a demanda do produto pode variar em cada período (demanda dinâmica). Já no planejamento com horizonte infinito a demanda é constante (demanda estacionária). Existe ainda uma variante que é chamada de horizonte rolante que é usada quando existem incertezas nos dados obtidos de cada período.

#### 2.1.3. Escala do tempo

Uma escala contínua ou discreta pode ser usada. Quando se assume uma escala de tempo discreta, ela tem grandes ou pequenos períodos que podem ser uniformes ou não. Geralmente o tempo uniforme é assumido por padrão. Os períodos são classificados como pequenos (*small-time buckets*) ou grandes (*big-time buckets*).

Nos modelos do tipo *small-time buckets* apenas um ou dois itens são produzidos em um período, por outro lado modelos assumindo *big-time buckets* permitem mais do que dois produtos por período.



#### **2.1.4. Parâmetros**

Alguns dos parâmetros mais comuns nos modelos são por exemplo capacidade produtiva, parâmetros que envolvem custos, coeficientes de produção, tempo de *setup* dentre outros. Eles podem variar ou não ao longo do tempo. Quando é considerado um modelo estocástico, considera-se uma incerteza futura que é incorporada no planejamento da produção.

#### **2.1.5. Função objetivo**

Ela poderá conter a minimização de vários custos, como por exemplo de *setup*, atraso de pedidos, inventários, vendas perdidas dentre outros. Objetivos relacionados ao tempo também podem ser usados como por exemplo minimização do tempo total de conclusão ou atraso máximo.

#### **2.1.6. Custos**

Os custos envolvidos são os de: *setup*; de manter quantidades em estoque; de atraso de pedidos; de produção; dentre outros. O custo de *setup* acontece sempre que a produção de um novo tipo de item é feita, então é necessário a preparação da máquina para próxima produção. Por isso um custo envolvido nesse processo pode variar de acordo com a sequência da produção.

#### **2.1.7. Capacidade**

A capacidade dos recursos pode ser considerada finita ou infinita. Nos problemas de dimensionamentos de lotes que possuem capacidade finita, uma capacidade extra pode ser adicionada com um determinado custo de penalização. Os modelos que possuem capacidade são mais difíceis de serem resolvidos.

#### **2.1.8. Número de recursos**

O planejamento da produção considera que seja usado um ou mais recursos, quando ele é compartilhado entre duas operações emprega-se o termo recursos paralelos, no caso de uma operação precisar de dois recursos usa-se o termo múltiplos recursos.

#### **2.1.9. Setup**



Quando um item é configurado para ser produzido em uma estação de trabalho ou linha de produção, existirá associado um tempo de *setup* e um custo de *setup*. Eles podem exigir um tempo maior ou menor para serem configurados dependendo se o item é da mesma família. O custo e o tempo do *setup*, podem ainda variar de acordo com a sequência no qual esses itens são produzidos.

## **2.2. Características e atributos relacionados ao produto**

### **2.2.1. Número de produtos**

Pode ser considerado nos problemas de dimensionamentos de lotes uma produção com um ou múltiplos produtos. Além disso também poderá existir a lista de materiais (BOM – *Bill Of Materials*) que contém a estrutura do produto existindo nela um ou mais níveis, com uma estrutura de precedência e sucessão. Quando existir apenas um nível, significa que existem apenas matérias-primas na composição do item, já no caso de ser uma estrutura com vários níveis, isso implicará na necessidade da produção de componentes e semiacabados, que podem passar por uma ou mais estações de trabalho.

### **2.2.2. Restrições de estoques**

Os inventários de estoque podem conter limitantes superiores como por exemplo a capacidade de armazenagem. Assim como limitantes inferiores, tais como estoque de segurança.

### **2.2.3. Políticas de serviço**

Essas políticas estão relacionadas a demanda, diz respeito se a empresa assumirá ou não atrasos na quantidade solicitada ou ainda perda de vendas.

## **3. Sistema avançado de planejamentos (APS)**

Atualmente a tecnologia da informação, proporciona um ambiente cada vez mais integrado, por esse motivo a gestão das cadeias de suprimentos (SC- *Supply Chain*) tornam-se cada vez mais complexas, dessa forma decisões tais como de quanto produzir, em qual máquina, de acordo com os recursos disponíveis são frequentemente realizadas pelos gestores, ou seja, mais importante que decidir é saber preparar essa decisão da melhor forma. Visto que as decisões que envolvem as cadeias de suprimentos são complexas, modelos matemáticos para abstrair a



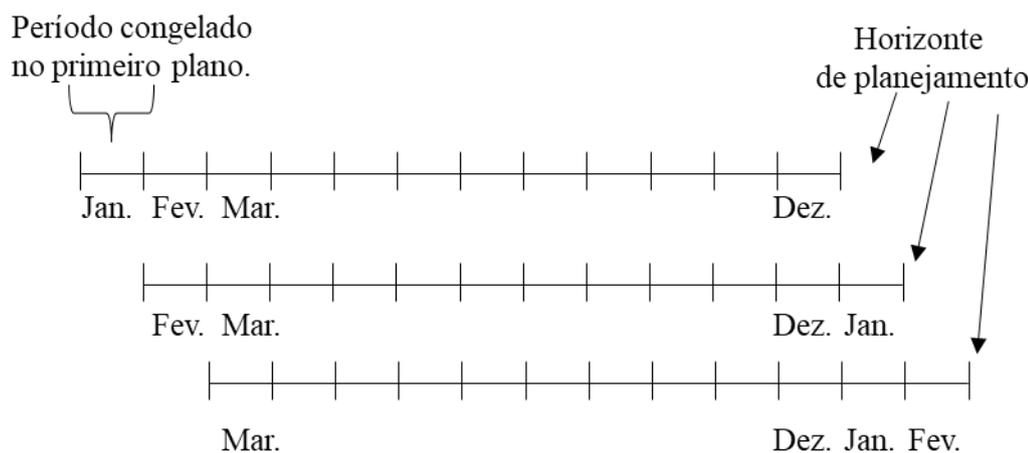
realidade são empregados, em especial modelos de previsão de demandas e de otimização. Decisões ao longo do horizonte de planejamento são fundamentais para a garantia de um plano de produção otimizado, por isso o plano de produção se divide em três: o primeiro planejamento a longo prazo é estratégico, estabelecendo os pré-requisitos para a produção e cadeia de suprimentos da empresa; o segundo, deverá ser a médio prazo, nesse momento se estabelecem decisões em torno das operações padrões, como por exemplo o ritmo da produção o tempo para o fluxo do produto e recursos dentro da cadeia de suprimentos, considera-se aqui a sazonalidade seus efeitos na produção e características da demanda; no terceiro, planeja-se a curto prazo envolvendo as operações de forma detalhada, nele o horizonte de planejamento acontece em dias ou no máximo três meses, restringe-se as decisões estruturadas nos planejamentos de médio e longo prazo. Devido ao grande número de alternativas atualmente disponíveis para um planejamento completo da cadeia de suprimentos, indo desde variáveis contínuas até binárias em um ambiente onde elas ainda se combinam, torna-se difícil encontrar uma solução ótima viável, desse modo tem-se mostrado a necessidade de encontrar meios de resolução do problema através dos métodos matemáticos da pesquisa operacional. Portanto, ambientes onde as incertezas existem, modelos que possam abordar essas características devem ser levados em consideração (FLEISHMAN; MEYR; WAGNER, 2008).

A ferramenta que busca-se desenvolver é o APS (*Advanced Planning System*), lidando com cenários onde o horizonte de planejamento é rolante, bem como planejamento de entrega de eventos. O horizonte rolante como demonstrada na Figura 5 trabalha com um determinado horizonte dividido em períodos iguais, nesse caso um ano dividido em doze meses. Inicialmente faz-se o plano do ano inteiro, porém apenas o primeiro mês (nesse caso janeiro) é colocado em prática, quando inicia-se fevereiro uma nova programação é realizada considerando o resultado da produção de janeiro. O novo planejamento sobrepõe-se ao anterior, no entanto um novo período é acrescentado, nesse caso janeiro do próximo ano.

De acordo com Seeanner (2013) os vendedores de softwares que possuem um sistema integrado APS por questões de competitividade, não deixam claro como tais programas lidam com o planejamento em múltiplos níveis e múltiplos estágios. Dessa forma os estudos do dimensionamento integrado da produção em múltiplos estágios que buscam atender as necessidades da cadeia de suprimentos, atualmente possuem uma alta relevância.

Visto a importância desta pesquisa a próxima seção deste artigo apresentará os artigos do estado da arte, eles abordam algumas características de ambientes produtivos realísticos trazendo avanços nas modelagens para ambientes produtivos complexos.

Figura 5 – Horizonte de planejamento rolante



Fonte: Adaptado de Fleischmann, Meyr e Wagner (2008)

#### 4. Trabalhos do estado da arte

O Quadro 4 apresenta em ordem cronológica as produções científicas internacionais dos últimos 5 anos, seus autores, metodologias, contribuições e aplicações.

Quadro 4 – Produção científica de dimensionamento integrado de lotes e programação da produção em múltiplos estágios

Ano	Artigo	Metodologia	Contribuição	Aplicação
2019	Wei W., Amorim P., Guimarães L., Almada-Lobo B.	PLIM	Considera o prazo de validade de produtos perecíveis	Generalista
2020	Melega G.M., de Araujo S.A., Morabito R.	PLIM; <i>Price and branch</i>	Considera o problema de forma integrada, primeiramente de corte, programação e dimensionamento de lotes	Generalista
2020	Toscano A., Ferreira D., Morabito R.	PLIM; Heurísticas híbridas, <i>fix and optimize</i> Vnds e <i>local search</i>	Considera limpezas temporais em um problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção com sincronia entre os estágios produtivos.	Indústria de bebidas
2021	Hakeem-Ur-Rehman, Wan G., Zhan Y.	PLIM; <i>Relax and fix</i> com horizonte rolante	Considera um problema integrado de programação da produção em múltiplos estágios com atualizações de demanda	Generalista
2022	Schmidt T.M.P., Scarpin C.T., Loch G.V., Schenekemberg C.M.	PLIM; Heurísticas híbridas, <i>fix and optimize</i> , VND e <i>local search</i>	Considera um problema integrado de programação da produção com sincronia entre os estágios	Indústria de cosméticos

Fonte: Os autores (2023)



Wei *et al.* (2019) abordam o problema de dimensionamento de lotes em múltiplos estágios abordando na modelagem características de produtos que possuem perecibilidade, no qual denominaram Problema Geral de Dimensionamento de Lotes Multinível com Validade (MLGLSPSL - *Multi level general lotsizing and scheduling problem with shelf life*). Os autores apontam que embora existam ambientes produtivos nos quais os itens possuem data de validade, raramente os modelos matemáticos na literatura abordam essa característica para processos industriais em múltiplos estágios. Os testes foram realizados considerando a perecibilidade das matérias primas, semiacabados e produtos acabados. Quatro classes de instâncias foram testadas usando *solver* do CPLEX®. Os autores encontraram resultados ótimos para duas classes e ainda classificaram as restrições que podem ser a estrutura dos produtos.

Melega, Araugo e Morabito (2020) desenvolvem uma modelagem matemática chamada ILSSCS (*integrated lot sizing, scheduling and cutting stock problem*), nela consideram que a demanda final dos produtos pode ser satisfeita se a produção do período atual ou um inventário for transportado sobre o período do tempo anterior, e a sincronização entre os dois estágios produtivos não consideram lead times. As soluções da modelagem proposta foram resolvidas utilizando o método *branch and price* com geração de colunas e a abordagem é resolvida por meio de uma decomposição. No total 36 classes que resultaram em 360 instâncias foram geradas e testadas.

Toscano, Ferreira e Morabito (2020) apresentam uma modelagem matemática para resolver o problema de dimensionamento integrado de lotes e programação da produção em dois estágios com sincronia. Abordam características pertinentes a indústrias de produção de bebidas à base de fruta e indústrias de laticínios. Nesse tipo de processo conforme explicam após um determinado item continuar sendo produzido através de vários períodos uma parada ou tempo de *setup* para limpeza é exigida. Por isso além dos *setups* usuais de troca de itens ainda considera-se o que chamam de “limpezas temporais”. A resolução é feita através de heurísticas híbridas com busca local, *fix and optimize* com *variable neighborhood decomposition search* e outras duas estratégias de *fix and optimize* com *neighborhood search*.

Hakeem-UR-Rehman, Wan e Zhan (2021) desenvolvem uma modelagem matemática inspirada em uma fábrica de produtos de automóveis. No modelo eles não permitiram atrasos de pedidos, porém consideram uma demanda com base em previsões, contudo essas podem ser atualizadas ao longo do tempo. O modelo de dimensionamento integrado de lotes multiestágio, multinível e programação da produção (MMSLP) foi desenvolvido considerando características como



cada produto atualiza a demanda em um macro período, o tamanho do lote de cada produto e a sequência dos lotes. Em cada estágio existindo máquinas em paralelos distintas com taxas de produção diferentes, essas máquinas estão disponíveis durante todo o horizonte de planejamento. A partilha de lotes (*lot-splitting*) é permitida em um determinado estágio, ou seja, as máquinas de um determinado estágio podem produzir lotes do mesmo produto para uma determinada demanda. Na resolução os autores desenvolveram três heurísticas e aplicaram em duas classes, considerando a estrutura do produto como sendo de montagem, geral e não cíclica. No fim verificaram que a primeira heurística proposta encontrou melhores resultados.

Schimidt *et al.* (2022) desenvolvem uma modelagem inspirada em uma indústria de cosméticos brasileira, no modelo consideraram dois estágios produtivos com interdependência e sincronia. O modelo que permite horas extras foi resolvido com base nos dados reais adquiridos da empresa em questão. A solução do modelo foi realizada através de uma heurística híbrida combinando princípios de *branch and bound*, *local search*, *fix and optimize* e *variable neighborhood descent*. Características como os de lote mínimo de produção e tempo máximo de permanência do item em uma determinada linha de produção são consideradas.

## 5. Conclusão

Neste estudo abordou-se o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção, descreveu as suas características e por fim apresentou os estudos realizados em ambientes produtivos com múltiplos estágios, restringindo-se aos trabalhos dos últimos cinco anos de revistas conceituadas internacionalmente.

Os estudos mais recentes abordam em suas modelagens de dimensionamento integrado de lotes e programação da produção, características cada vez mais realistas. Elas consideram partilha de *setup* entre períodos, horizontes rolantes, diferentes estruturas de produtos, perecibilidade dos itens, sincronia entre os múltiplos estágios produtivos e *setups* para limpezas temporais.

A resolução dos problemas encontrados na literatura do estado da arte mostra que tanto soluções exatas como heurísticas híbridas são usadas. Um destaque maior se dá para heurísticas que utilizam o método *fix and optimize* com técnicas de busca local.

O objetivo da revisão foi satisfeito pois o artigo descreve aspectos da modelagem de dimensionamento de lotes e programação da produção em múltiplos estágios.



Espera-se que esta revisão sirva de referência para futuras pesquisas de dimensionamento integrado de lotes e programação da produção em múltiplos estágios, pois ela reúne diversos trabalhos de alta relevância não somente para indústrias, mas também para a pesquisa científica internacional.

Os trabalhos futuros podem se basear nesta revisão para reunir em suas modelagens matemáticas características mais realistas de ambientes produtivos. Além disso propor novas heurísticas, metaheurísticas e soluções híbridas para melhorar os gaps de resoluções dos trabalhos aqui citados.

## REFERÊNCIAS

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa operacional**. Rio De Janeiro: Elsevier Campus, 2011.

BITRAN, G. R.; YANASSE, H. H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. **Management Science**, v. 28, n. 10, p. 1174–1186, out. 1982.

COFIL, K. *et al.* Simultaneous lotsizing and scheduling problems: A classification and review of models. **OR Spectrum**, v. 39, n. 1, p. 1–64, 1 fev. 2016.

DREXL, A.; HAASE, K. Proportional lotsizing and scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 40, n. 1, p. 73–87, jun. 1995.

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 697–706, jul. 2009.

FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 44, n. 3, p. 337–348, fev. 1990.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. **Operations-Research-Spektrum**, v. 19, n. 1, p. 11–21, mar. 1997.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H.; WAGNER, M. Advanced planning. In: **Supply chain management and advanced planning**. Heidelberg: Springer, 2008.

HAASE, K. Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. **Operations-Research-Spektrum**, v. 18, n. 1, p. 51–59, mar. 1996.



HAASE, K.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities. **International Journal of Production Economics**, v. 66, n. 2, p. 159–169, jun. 2000.

HAKEEM-UR-REHMAN; WAN, G.; ZHAN, Y. Multi-level, multi-stage lot-sizing and scheduling in the flexible flow shop with demand information updating. **International Transactions in Operational Research**, v. 28, n. 4, p. 2191–2217, 27 fev. 2019.

KARMAKAR, U. S.; SCHRAGE, L. The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem. **Operations Research**, v. 33, n. 2, p. 326–345, abr. 1985.

MELEGA, G. M.; DE ARAUJO, S. A.; MORABITO, R. Mathematical model and solution approaches for integrated lot-sizing, scheduling and cutting stock problems. **Annals of Operations Research**, v. 295, n. 2, p. 695–736, 4 set. 2020.

MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 2, p. 277–292, jun. 2002.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production planning by mixed integer programming**. New York ; Berlin: Springer, 2006.

RAMYA, R. *et al.* **Capacitated lot sizing problems in process industries**. Gewerbestrasse; Switzerland: Springer, 2019.

SCHIMIDT, T. M. P. *et al.* A two-level lot sizing and scheduling problem applied to a cosmetic industry. **Computers & Chemical Engineering**, v. 163, p. 107837, jul. 2022.

SEEANNER, F. **Multi-Stage Simultaneous Lot-Sizing and Scheduling**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

STADTLER, Hartmut *et al.* **Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies**. Heidelberg: Springer, 2015.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics : from design to implementation**. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, 2009.

TOSCANO, A.; FERREIRA, D.; MORABITO, R. Formulation and MIP-heuristics for the lot sizing and scheduling problem with temporal cleanings. **Computers & Chemical Engineering**, v. 142, p. 107038, nov. 2020.

ULBRICHT, G. **Um modelo de planejamento da produção multiestágio com estoques intermediários limitados**. Tese—Universidade Federal do Paraná: Curitiba.



WAGNER, H. M.; WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v. 5, n. 1, p. 89–96, out. 1958.

WEI, W. *et al.* Tackling perishability in multi-level process industries. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 17, p. 5604–5623, 18 dez. 2018.

ZHU, X.; WILHELM, W. E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. **IIE Transactions**, v. 38, n. 11, p. 987–1007, nov. 2006.