



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

O PROBLEMA DO SEQUENCIAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE LOTES NO PLANEAMENTO DA PRODUÇÃO

Marta Saraiva Marques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos

Covilhã 2013

Dedicatória

Ao Jorge e aos meus Pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos, pela ajuda, dedicação e disponibilidade.

À FRULACT, em particular ao Sr. Arménio Arantes, responsável pela unidade de Tortosendo onde me encontro a trabalhar, que sempre me deu todo o apoio necessário para desenvolver este trabalho.

Aos meus pais que tanto me apoiaram em todo o meu percurso

Ao Jorge, pela motivação e pelo apoio nas horas menos boas.

Resumo

O presente trabalho apresenta um problema de sequenciamento de lotes de produção em máquinas paralelas não uniformes com tempos de preparação dependentes da sequência, que inclui restrições quanto á capacidade das máquinas, á dimensão dos lotes, á existência de precedências na execução das tarefas e às datas de entrega de cada tarefa.

O problema em análise é um problema de planeamento operacional nos mais variados ambientes industriais, designadamente na indústria alimentar, onde se podem traduzir importantes custos de produção.

No primeiro capítulo é caracterizado o problema em análise, paralelamente a outros tipos de problemas análogos.

O modelo de programação matemática estudado para o problema é apresentado, caracterizando-se a função objectivo e as restrições definidas para o problema. Devido á complexidade deste modelo, foi estudada uma heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada que permite a obtenção de soluções quase-óptimas.

O objectivo de estudar este tipo de problema apresentado foi o de contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta que se adapte ao caso em estudo da indústria alimentar.

Palavras-chave

Sequenciamento de lotes, dimensionamento de lotes, máquinas paralelas, heurística, algoritmo de recristalização simulada, estudo de caso.

Abstract

This paper presents a problem of sequencing production batches on parallel non-uniform machines with preparation times that depend on a sequence, which includes restrictions as to the capacity of the machines, the size of the batches, the existence of precedence in the execution of tasks and to the delivery dates of each task.

The analysed problem is an operational planning problem within the most varied industrial environments, particularly in the food industry, which may reflect significant production costs.

In the first chapter the analysed problem is characterized, along with other similar problems.

The mathematical programming model studied for the problem is presented by characterizing the objective function and the constraints defined for the problem. Due to the complexity of this model, it was studied a heuristic based on the algorithm of simulated recrystallization allowing to obtain near-optimal solutions.

The purpose of studying this kind of problem was to contribute to the development of a tool that fits this particular case of the food industry.

Keywords

Batches sequencing, batches sizing, parallel machines, heuristic, algorithm of simulated recrystallization, case study.

Índice

Capítulo 1: Introdução

1. Relevância do problema	2
1.1. Objectivos	3
1.2. Estrutura do trabalho	4

Capítulo 2: Planeamento da produção

2. Introdução	7
2.1. Enquadramento	7
2.2. Sistemas de Planeamento de Produção	8
2.3. Planeamento Estratégico	11
2.4. Planeamento Tático	12
2.4.1. Planeamento Agregado da Produção	12
2.4.2. Planeamento Director de Produção	13
2.4.3. Planeamento de Necessidades de Materiais	14
2.5. Planeamento Operacional	15
2.6. Tipologias de Produção: Classificação	15
2.6.1. Classificações da Produção em função da importância das séries de fabrico e da sua repetitividade	16
2.6.2. Classificações em função da organização do fluxo do Produto	16
2.6.3. Classificação em função do tipo de relacionamento com o cliente	20
2.6.4. Classificação quanto ao ambiente de produção	20

Capítulo 3: Sequenciamento da produção

3. Introdução	24
3.1. O problema de dimensionamento de lotes	25
3.1.1. Caracterização do problema	25
3.1.2. Modelos matemáticos para o dimensionamento de lotes	27
3.2. O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes	29
3.2.1. Caracterização do problema	29
3.2.2. Modelos matemáticos para o problema integrado	30
3.3. Métodos de solução	32
3.3.1. Métodos exactos	32
3.3.2. Métodos heurísticos	33

Capítulo 4: Estudo de caso

4. Introdução	38
4.1. Apresentação da empresa em estudo na indústria alimentar	38
4.2. Unidade fabril em estudo	39
4.3. Descrição do processo produtivo de preparados de fruta	40
4.3.1. Etapas do processo produtivo em linha contínua	41
4.3.2. Etapas do processo produtivo em linha descontínua	51
4.4. Planeamento na indústria em estudo	55
4.4.1. Planeamento estratégico	56
4.4.2. Planeamento central	58
4.4.3. Sequenciamento de ordens de fabrico	61

Capítulo 5: O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no processo de produção de preparados de fruta

5. Introdução	65
5.1. Descrição do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no processo de produção de preparados de fruta	65
5.1.1. Tempos de produção conhecidos	66
5.1.2. Tipos de setup conhecidos	67
5.1.3. Tempos de atraso	68
5.2. Função objectivo	69

Capítulo 6: Heurística para a resolução do problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção

6. Introdução	73
6.1. Algoritmo de recristalização simulada	73
6.2. Metodologia de resolução	76
6.2.1. Determinação da temperatura inicial e final	76
6.2.2. Taxa de arrefecimento	77
6.2.3. Número de interacções por patamar e critério de paragem	78
6.3. Heurística para gerar a solução inicial	78
6.4. Heurística para determinar as soluções vizinhas	79

Capítulo 7: Conclusões

7. Introdução	84
7.1. Indústria alimentar de produção de preparados de fruta	84
7.2. Conclusões finais	85
7.3. Trabalho futuro	86

7.4. Análise crítica	86
Referências bibliográficas	88

Índice de Figuras

Capítulo 2: Planeamento da produção

Figura 2.1 - Planeamentos de produção	10
Figura 2.2 - Inputs dos sistemas de planeamento de produção	11
Figura 2.3 - Tipologias de produção	17
Figura 2.4 - O fluxo de produção linear	18
Figura 2.5 - A produção descontínua	18

Capítulo 4: Estudo de caso

Figura 4.1 - Layout da unidade fabril de Tortosendo	39
Figura 4.2 - Fluxograma do processo produtivo	40
Figura 4.3 - Materiais de embalagem	41
Figura 4.4 - Esquema de linha CIP	42
Figura 4.5 - Esquema de linha SIP	42
Figura 4.6 - Tanques de mistura de ingredientes	43
Figura 4.7 - Bomba de pistão	44
Figura 4.8 - Cartuchos para filtros	45
Figura 4.9 - Íman magnético	45
Figura 4.10 - Pasteurizador tubular	46
Figura 4.11 - “ <i> Holding </i> ”	47
Figura 4.12 - Detector de metais	48
Figura 4.13 - Fluxograma do processo produtivo em linha contínua	50
Figura 4.14 - Fluxograma do processo produtivo em linha descontínua	54
Figura 4.15 - Fluxo de informação através das plataformas	58

Capítulo 6: Heurística para a resolução do problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção

Figura 6.1 - Algoritmo de recristalização simulada	75
Figura 6.2 - Curva do processo de recristalização	76
Figura 6.3 - Transferência de lote dentro da fila de espera da máquina	79
Figura 6.4 - Transferência de lote entre filas de espera de máquinas	80
Figura 6.5 - Troca de lote dentro da fila de espera da máquina	80
Figura 6.6 - Troca de lote entre filas de espera de máquinas	81

Índice de Tabelas

Capítulo 2: Planeamento da produção

Tabela 2.1 - Tipologias de produção	16
-------------------------------------	----

Capítulo 5: O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no processo de produção de preparados de fruta

Tabela 5.1 - Caracterização das linhas de produção em função da capacidade e velocidade	66
---	----

Tabela 5.2 - Tempos de produção conhecidos	67
--	----

Tabela 5.3 - Tipos de setup conhecidos	68
--	----

Lista de Acrónimos

B&B	Branch-and-Bound
B&C	Branch-and-Cut
CIP	Cleaning in Place
CMRP	Capacitated Material Requirements Planning
CSLP	Continuous Setup Lot Sizing Problem
DLSP	Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem
ELSP	Economic Lot Scheduling Problem
EOQ	Economic Order Quantity
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In First Out
GA	Genetic Algorithms
GLSP	General Lot Sizing and Scheduling Problem
GLSP-CS	Conservation of Setup State General Lot Sizing and Scheduling Problem
GLSP-LS	Loss of Setup State General Lot Sizing and Scheduling Problem
GLSP-ST	Setup Times of Setup State General Lot Sizing and Scheduling Problem
ISI	Initialize, Sequence, and Improve
JIT	Just in time
MIP	Mixed Integer Program
MP	Matéria-prima
MRP	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OF	Ordem de Fabrico
PCA	Plate Count Agar
PDP	Plano Director de Produção
PIC	Plano Industrial e Comercial
PL	Programação Linear
PLSP	Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem
PLSP-ML	Multi-level Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem
PPCP	Planeamento, Programação e Controle da Produção
SA	Simulated Annealing
SIP	Steam in Place
TPM	Total Productive Maintenance
TS	Tabu Search
YGC	Yeast extract Glucose Chloramphenicol agar

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. Relevância do problema

Desde sempre que a mudança é uma realidade necessária no seio industrial e organizacional. A evolução natural das sociedades busca sempre mais, melhor e mais barato. Para corresponder às exigências do seu consumidor alvo as empresas têm de acompanhar esse ritmo e lidar com a constante concorrência. Ao longo dos últimos anos tem surgido uma crise económica que fez com que as receitas tenham sofrido grandes quedas. Esta crise económica que se vive e respectiva diminuição do consumo coloca o mundo empresarial numa situação em que só as empresas que produzem com qualidade a baixos custos sejam capazes de sobreviver. As necessidades de mudança que as empresas de hoje em dia enfrentam passam pela produção com qualidade e com baixos custos associados.

O Planeamento e Controle da Produção estão entre os principais factores que influenciam a produtividade industrial. As empresas devem se adaptar as condições de mercado, que mudam constantemente, afectando o tempo disponível para a tomada de decisões.

Uma das formas que as empresas industriais têm de ganhar vantagem competitiva sobre os seus concorrentes, é a utilização de estratégias de planeamento da produção que conduzam a uma gestão eficiente dos recursos. O sequenciamento da produção é uma actividade complexa, devido entre outros factores, à sua natureza combinatória. Para contornar essa complexidade, regras de prioridade podem ser utilizadas. Embora essas obtenham relativo sucesso em determinadas situações, apenas algumas características do sistema produtivo e/ou do produto são consideradas, como por exemplo, data de entrega e tempos de processamento. A partir disso, observa-se a necessidade de um sequenciamento de produção elaborado e não intuitivo.

Este trabalho, ao propor uma abordagem para a resolução de um problema de sequenciamento da produção associado a um determinado tipo de ambiente industrial real, contribui com uma nova ferramenta de planeamento da produção.

1.1. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho centra-se no estudo de uma ferramenta para resolução de um problema de dimensionamento e de sequenciamento de lotes em várias linhas de produção com velocidades de processamento dependentes da tipologia de produto, do seu tempo de preparação e do seu sequenciamento. O problema foi inspirado num estudo de caso da indústria agro-alimentar que se tenta aqui descrever.

Para o caso em estudo aqui reportado foi proposto um modelo de programação matemática que assenta numa heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada com intuito de obter soluções quase óptimas.

1.2. Estrutura do trabalho

A estruturação desta dissertação foi feita em sete capítulos organizados de acordo com o seguimento lógico da pesquisa. Nestes são abordados os seguintes pontos:

Capítulo 1 - O presente capítulo, no qual introduz-se a dissertação de mestrado;

Capítulo 2 - É feito o enquadramento do problema em análise no contexto de planeamento da produção, na perspectiva das suas três vertentes: estratégica, tática e operacional;

Capítulo 3 - Analisa-se o estado de arte sobre os problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção;

Capítulo 4 - Centra-se sobre a análise de um caso numa empresa da indústria alimentar de produção de preparados de fruta. Uma vez que a literatura conhecida nada reporta sobre a aplicação de técnicas de optimização para a resolução de problemas de sequenciamento e dimensionamento neste tipo de indústria, procura-se avaliar a relevância deste tipo de problemas, em termos estratégicos, para o planeamento da produção neste ambiente industrial;

Capítulo 5 - É estudado ao pormenor o problema de sequenciamento e dimensionamento nas linhas de produção. É também apresentada uma formulação geral do problema identificado;

Capítulo 6 - Apresenta-se um algoritmo de recristalização simulada estudado para a resolução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção;

Capítulos 7 - Neste capítulo são apresentadas as conclusões, o qual inclui também as propostas de desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

PLANEAMENTO DA PRODUÇÃO

2. Introdução

Ao longo das últimas décadas, as empresas têm-se deparado com crescentes dificuldades para acompanhar o mercado exponencialmente diverso e exigente. Isto deve-se, principalmente, à existência de uma concorrência cada vez mais forte resultante da globalização dos mercados de bens e de serviços. Consequentemente, as empresas vêm-se obrigadas a agir, de uma forma muito rápida e com qualidade, sem excluírem a necessidade de suportar os custos necessários à manutenção da sua competitividade perante as solicitações de um mercado onde procura é aleatória e ao mesmo tempo exigente. Neste capítulo procura-se compreender os vários factores que afectam a actividade das empresas e de que forma influenciam a estrutura de organização da empresa nomeadamente ao nível do planeamento de produção.

Este trabalho incide sobretudo no planeamento tático e operacional, com destaque para o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, não colocando de parte uma abordagem ao planeamento estratégico para se poder ter uma visão geral sobre todos os factores a ter em consideração. A forma como estes três tipos de planeamento estão interligados será também um tema a abordar.

Neste capítulo faz-se também uma análise sobre alguns sistemas de planeamento que irão servir de base a este trabalho.

2.1. Enquadramento

Hoje em dia a preocupação diária na indústria alimentar é a diminuição dos custos de produção sem alterar a qualidade dos produtos fornecidos, pois só assim uma indústria pode ser competitiva, isto é, se por um lado se deve diminuir os custos aliados à produção diária por outro, deve-se manter ou aumentar os níveis de qualidade dos produtos fornecidos junto dos consumidores.

Para facilitar o controlo da produção esta deve ser vista como um processo único que envolve o fluxo de materiais desde os fornecedores até aos consumidores.

Este fluxo de materiais envolve um fluxo de informações através de um sistema integrado de planeamento e controlo que engloba todas as actividades.

Os objectivos normalmente reconhecidos são a satisfação do cliente, lucros adequados e bens de capital bem administrados. Existem cinco requisitos para que um controlo seja eficaz.

São eles: um planeamento realista, alta integridade dos dados, feedback oportuno, análises correctas e correcções rápidas.

Os fluxos de material e informação são com frequência interrompidos por muitos factores, deve-se assim focalizar todas as acções para facilitar, acelerar e melhorar a qualidade dos dois fluxos.

Hoje, a definição de perda inclui muitos factores além de refugo. É importante identificar as causas para serem resolvidas, para isso deve existir esforço de todos, trabalho em equipa entre grupos e forte liderança pela administração. Produção é verdadeiramente um processo complexo em detalhes, porém simples em essência (Plossl, (1993)).

O planeamento de produção é a actividade pela qual os recursos, fluindo dentro de um sistema definido, são reunidos e transformados de uma forma controlada a fim de acrescentar valor. As responsabilidades do departamento de produção incluem a execução de um plano de produção aceitável que utilize os materiais, a capacidade e o conhecimento disponíveis nas instalações de produção. Quando ocorre uma determinada procura no sistema, o trabalho é programado e controlado para produzir os bens e serviços exigidos, sempre acompanhado por um controlo sobre o stock, a qualidade e os custos.

Os conceitos chave para a execução de um planeamento de produção são: os recursos, que podem ser recursos humanos, recursos de materiais e recursos de capital, os sistemas e actividades de transformação e de valor acrescentado (Monks, (1987)).

Alguns dos principais factores que influenciam as mudanças de produtividade são: relação entre trabalho e capital, escassez de recursos, mudanças nas forças de trabalho, inovação, tecnologia e a qualidade do ambiente de trabalho (Monks, (1987)).

2.2. Sistemas de Planeamento de Produção

A empresa tem de planear a produção a vários níveis e operar as suas actividades como um sistema.

Os planos de produção são desenvolvidos simultaneamente com os planos empresariais, sendo que os planos de produção têm um horizonte mais curto e menores ciclos.

Os planos de produção são bastante influenciados por considerações sobre o ciclo de vida do produto desenvolvidas nos planos empresariais e nos planos estratégicos.

A necessidade de resposta rápida no mercado e a flexibilidade na introdução e produção de novos produtos impõe exigências específicas nas instalações fabris. As quantidades e estruturas de tempo utilizadas nos planos de produção e as questões ali respondidas serão muito mais específicas do que as do planeamento empresarial e estratégico.

A execução de um planeamento de produção tem vários objectivos tais como: a determinação dos recursos (instalações, equipamento, materiais, pessoal, capital e os serviços de fornecedores externos) para garantir os planos empresariais; a elaboração de programações para as acções dos departamentos, de marketing, de engenharia de projecto e de pesquisa e desenvolvimento; o fornecimento de dados resumidos á administração, e por último garantir que os recursos sejam aplicados de maneira adequada para alcançar os níveis desejados de serviço ao cliente, de stock, de lucros e outros objectivos da empresa (Plossl, (1993)).

Os passos específicos necessários para a execução de um plano de produção são:

- determinar o horizonte e os períodos de tempo a serem incluídos no plano;
- estabelecer um nível mínimo de stock desejado para os produtos a serem armazenados;
- determinar os totais de previsão de venda, relativos a cada família de produtos no decorrer do planeamento. Esses totais serão mais exactos do que previsões relativas a modelos específicos;
- determinar o stock total disponível, no início do período de planeamento, para família de produtos feitos para stock e os registos de atraso de encomenda de clientes no início do período de planeamento referente a famílias de produtos feitos por encomenda;
- estabelecer o nível de stock desejado e o registo de atrasos de encomenda de cliente no final do período de planeamento para famílias de produtos;
- calcular a produção total necessária para o período;
- planear a produção total em relação ao horizonte completo, considerando os meses com um número significativo de feriados, férias colectivas, produção perdida durante expansões ou mudanças da fábrica e produtos sazonais;
- calcular o stock total ou os atrasos de encomendas no início de cada período do plano.

(Plossl, (1993))

Os planeamentos de produção podem ser classificados como plano a longo prazo, plano a médio prazo e plano a curto prazo, encontra-se esquematizado na figura 2.1 as características de cada tipo de planeamento de produção.

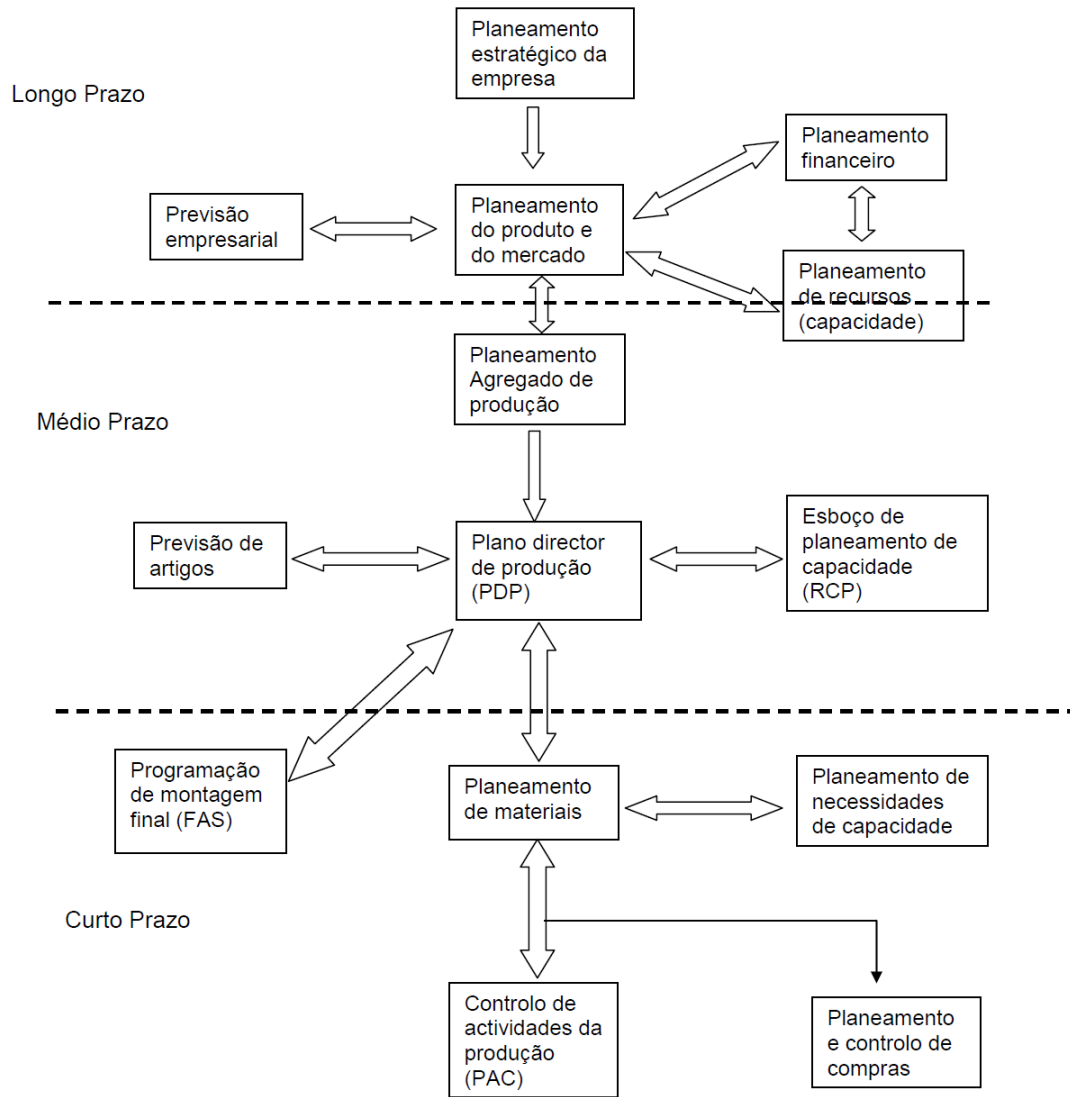


Figura 2.1 - Planeamentos de Produção
(Chase, Aquilano, 1995)

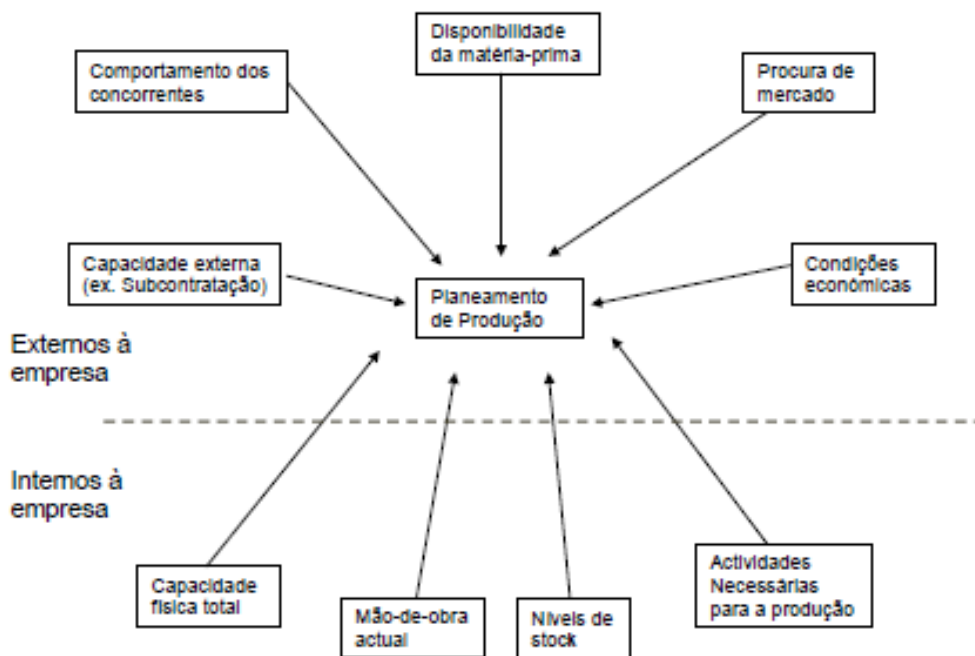


Figura 2.2 - Inputs dos Sistema de Planeamento da Produção
(Chase, Aquilano, 1995)

2.3. Planeamento Estratégico

O planeamento estratégico também designado por planeamento de longo prazo começa com uma declaração dos objectivos organizacionais e das metas para os próximos dois a dez anos. O planeamento estratégico da empresa articula o modo como esses objectivos e metas podem ser alcançados, à luz das capacidades da empresa e do meio económico e político envolvente, tal como é projectado pela sua previsão empresarial. Os elementos do plano estratégico incluem o delineamento da linha de produtos, níveis de qualidade, preços e as metas de penetração no mercado (Chase, Aquilano, (1995)).

2.4. Planeamento Tático

O principal objectivo do planeamento tático é o de promover uma gestão eficiente do sistema de produção num horizonte de tempo de médio prazo. Procura-se, a este nível, satisfazer a procura através de uma utilização eficiente dos recursos disponíveis. O planeamento tático comporta, três fases: planeamento agregado; plano director de produção e planeamento de necessidade de materiais (MRP - *material requirements planning*). Apesar de ser usual a utilização destas três fases de organização é frequente a omissão do plano director de produção na indústria de processos (Das *et al.* (1999)).

2.4.1. Planeamento Agregado da Produção

O planeamento agregado consiste num processo que determina a quantidade a ser produzida a médio prazo analisando o ritmo de produção, a disponibilidade de mão-de-obra, stock, e outras variedades controláveis.

O objectivo do planeamento agregado é responder à procura irregular do mercado utilizando os recursos disponíveis da empresa. É evidente que nem sempre todas as procuras são atendidas e os responsáveis pela execução do planeamento devem balancear a variabilidade da procura com a disponibilidade de capacidade produtiva, geralmente mais estável. O planeamento está “agregado” uma vez que não se concentra sobre bens e serviços individuais, mas como uma categoria homogénea (família ou pseudofamília) (Monks, (1987)).

As principais estratégias usadas para o planeamento agregado de produção são: a variação do tamanho da equipa de trabalho, o tempo parado e extra, a variação de níveis de stock, a recepção de encomendas dos clientes para entregas futuras, a subcontratação e a utilização da capacidade. Assim o plano agregado é uma “decisão negociada” de alto nível que coordena as actividades de marketing, finanças e outras funções.

Os pontos-chave de um plano agregado incluem:

1. objectivos de lucro;
2. previsão e encomendas;
3. planos de venda;
4. objectivos de stock;
5. planos de orçamento de capital;
6. disponibilidade da mão-de-obra;
7. disponibilidade das instalações.

As directrizes do planeamento agregado salientam a necessidade de uma política bem definida para atender às oscilações da procura e assim se conseguir uma boa previsão e planear a produção em unidades.

As directrizes do planeamento agregado são:

1. determinar a política da empresa em relação às variáveis controláveis;
2. usar uma boa previsão como base para o planeamento;
3. planear a produção sempre adequada à capacidade;
4. manter sempre estável a equipa de trabalho;
5. manter o controlo de stock actualizado;
6. manter uma margem de flexibilidade para mudar;
7. reagir à procura de um modo controlado;
8. avaliar o planeamento numa base regular.

(Monks, (1987))

Este sistema especifica as necessidades de *output* dos principais grupos de produção, quer em horas de trabalho necessárias, quer em unidades de produção para períodos mensais numa projecção até 18 meses. Os seus *inputs* principais são os planos de mercado e produtos e o plano de recursos.

O planeamento agregado da produção procura encontrar a combinação dos níveis força de trabalho com os níveis de stocks, para minimizar os custos totais relacionados com a produção no período do planeamento (Chase, Aquilano, (1995)).

A previsão por artigo fornece uma estimativa dos produtos específicos, que quando integrados no plano agregado de produção, fornece as necessidades de *output* do programa director de produção, isto é, a gestão da procura (Chase, Aquilano, (1995)).

2.4.2. Plano Director de Produção (PDP)

O PDP gera as quantidades e as datas para o fabrico de produtos finais específicos. O plano director de produção é normalmente estabelecido a curto prazo, 6 a 8 semanas.

As necessidades de mão-de-obra, material e equipamento para cada tarefa devem ser avaliadas, assim cabe ao programa director de produção dirigir todo o sistema de produção e *stock*, organizar as metas específicas de produção e responder às informações de todas as operações da linha de produção.

As principais funções de um PDP são as seguintes:

- gerir o cálculo das necessidades, emitindo as ordens de fabrico para os produtos acabados;
- traduzir em produtos acabados reais cada família do Plano Industrial e Comercial (PIC);
- acompanhar as vendas reais permitindo comparar as encomendas recebidas com as previsões;
- disponibilizar ao departamento comercial informação relativa aos produtos disponíveis para venda sem colocar em causa o PDP previsto, ou seja, não destabilizar a produção;
- controlar a evolução do stock de modo a permanecer sempre a quantidade de stock certa para responder às encomendas dos clientes, sem atingir níveis excessivos (Courtois, Martins, Pillet, (1997)).

2.4.3. Planeamento de Necessidades de Materiais (MRP)

Baseado num plano director de produção obtido a partir de um plano de necessidades independentes, um sistema de planeamento de necessidades de materiais (MRP) identifica os componentes e materiais específicos necessários e as datas em que as ordens desses materiais deverão ser lançadas e recebidas, ou concluídas, dentro do ciclo de produção (Chase, Aquilano, (1995)).

Os princípios de um sistema MRP são: controlar os níveis de stock, atribuir prioridades das operações para os artigos e planear a capacidade para carregar o sistema de produção.

Em relação aos stocks será encomendar o componente certo, na quantidade certa e no momento certo. Em relação à prioridade, encomendar com a data e ordem correcta e conservar válida a data devida. Por último em relação à capacidade, planear para uma carga completa, uma carga exacta num período adequado para ver cargas futuras.

O lema do MRP é “fazer chegar os materiais certos ao sítio certo no momento certo” (Chase, Aquilano, (1995)).

Os objectivos da gestão de stocks sob um sistema MRP são melhorar o serviço aos clientes, minimizar o investimento em stocks e maximizar a eficiência das operações da produção.

A filosofia do planeamento de necessidade de materiais consiste na ideia que os materiais devem ser acelerados quando a sua carência atrasa o plano de produção global e retardados quando o plano se atrasa e adia a sua necessidade (Chase, Aquilano, 1995).

2.5. Planeamento Operacional

O planeamento operacional tem como objectivo a programação e controlo das operações, ou seja, diz respeito ao planeamento de muito curto prazo, normalmente semanas, dias ou até mesmo horas, dependendo dos diferentes ambientes industriais (Schroeder (2003) e Chase et al (2003)). Os trabalhos, actividades ou tarefas são atribuídos aos recursos ou capacidades disponíveis (equipamentos, mão-de-obra e espaço). O planeamento operacional é responsável por decisões como o sequenciamento, ou seja, a ordem exacta pela qual as operações devem ser executadas, a calendarização das operações e o dimensionamento de lotes de produção. Sendo por isso um processo dinâmico que obriga a um controlo permanente para que atempadamente, se possam detectar desvios e tomar as medidas correctivas necessárias. Em determinadas circunstâncias, é necessário replanear.

Por vezes, as tarefas atribuídas aos equipamentos resultam directamente da execução do planeamento de necessidade de materiais. Nestes casos as decisões de sequenciamento e dimensionamento ficam em aberto para o responsável da secção de produção. Noutros casos, o planeamento central emite ordens de fabrico em que as questões do dimensionamento e sequenciamento já estão contempladas. Existem ainda situações onde estas questões não são profundamente analisadas, seguindo, nestes casos a produção, um comportamento assente nalgumas regras heurísticas, como data de entrega, tempo de processamento mais curto, primeiro a entrar primeiro a sair (FIFO - *first in first out*), ou outras heurísticas assentes em restrições dos processos.

Sobre este assunto torna-se por vezes difícil diferenciar quais as decisões que se inserem na esfera de acção do planeamento tático e as que pertencem ao planeamento operacional (Allahverdi *et al.* (1999)).

2.6. Tipologias de Produção: Classificação

Cada empresa é única pela sua organização e pela especificidade dos produtos produzidos. Contudo podemos classificar as empresas em função de vários critérios: quantidades fabricadas e grau de repetitividade, organização dos fluxos de produção e relacionamento com o cliente.

2.6.1. Classificação da Produção em Função da Importância das séries de Fabrico e da sua Repetitividade.

A primeira diferença significativa entre as empresas é a tipologia das suas produções (Courtois, Martins, Pillet, (1997)).

Tabela 2.1 - Tipologias de produção (Courtois, Martins, Pillet, 1997)

Tipologias	Descrição	Lançamento de produção
Produção unitária	Produção individual.	Repetitiva
		Não repetitiva
Produção de pequena série	Produção de 100 unidades.	Repetitiva
		Não repetitiva
Produção de média série	Produção de 1000 unidades.	Repetitiva
		Não repetitiva
Produção de grande série	Produção de 100 000 unidades.	Repetitiva
		Não repetitiva

2.6.2. Classificação em Função da Organização do Fluxo do Produto

Marques (1991), considera apenas dois tipos de produção extremos, a contínua e a descontínua, apesar de existirem segundo a investigadora uma variedade de modelos intermédios.

Enquanto Dilworth (1992), considera a existência de três tipos de produção: contínua (*Flow Shop*), descontínua (*Job Shop*), e por lotes (*Batch manufacturing*).

Tal como mostra a Figura 2.2, à medida que se desloca da produção descontínua para a produção em série, há um aumento do volume de produção que tem como consequências, segundo Marques (1991), o aumento das unidades produzidas, a repetitividade das operações e ainda o aumento da especialização do equipamento. Por outro lado, à medida que se caminha da produção em série para a produção descontínua, diminui a variedade dos produtos, fazendo com que o nível de trabalho exigido seja mais elevado.

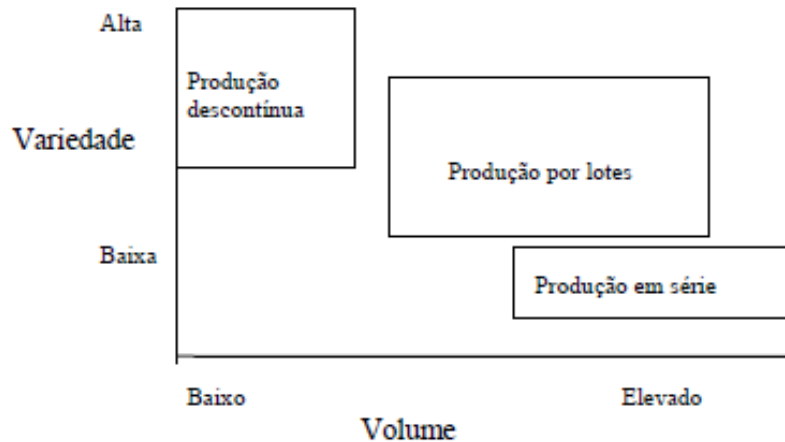


Figura 2.3 - Tipos de produção (Dilworth, (1992))

Para a maioria dos investigadores como Courtois, Martin e Pillet (1993), Baranger e Hugel (1994), Chase e Aquilano (1989), Moreira (1993) Russomano (1995) e Schroeder (1989), a classificação dos tipos de fabrico, segundo o tipo de fluxo que o produto segue, resume-se a três tipos: linear ou contínuo; intermitente e por projecto. Optou-se por esta última classificação uma vez que é a adoptada pela maioria dos investigadores.

O fluxo contínuo

Benichou e Malhiet (1991) caracterizam o fluxo contínuo como uma sequência linear das operações necessárias à fabricação do produto ou serviço. O produto encontra-se bem padronizado ou seja a realização de uma operação e a execução do trabalho deve ser seguida segundo uma sequência já estabelecida. As tarefas individuais devem estar detalhadamente planeadas para que uma tarefa não atrase a seguinte.

Tal como mostra a figura 2.3, este tipo de produção representa o princípio, de que todos os produtos são produzidos seguindo uma mesma sequência de operações simples, através de uma linha mais ou menos longa em postos.

Por tal motivo, este sistema não necessita de utilizar mão-de-obra qualificada e o seu bom funcionamento passa por algumas exigências. Requer que; a produção seja grande relativamente ao seu volume, bem como regular, um bom sistema de aprovisionamento, uma excelente fiabilidade a nível dos postos de trabalho e uma boa sincronização do ritmo ao nível dos postos respectivos, condição essencial para que haja um bom fluxo, caso contrário, aumentam as filas de espera dos trabalhos em curso.

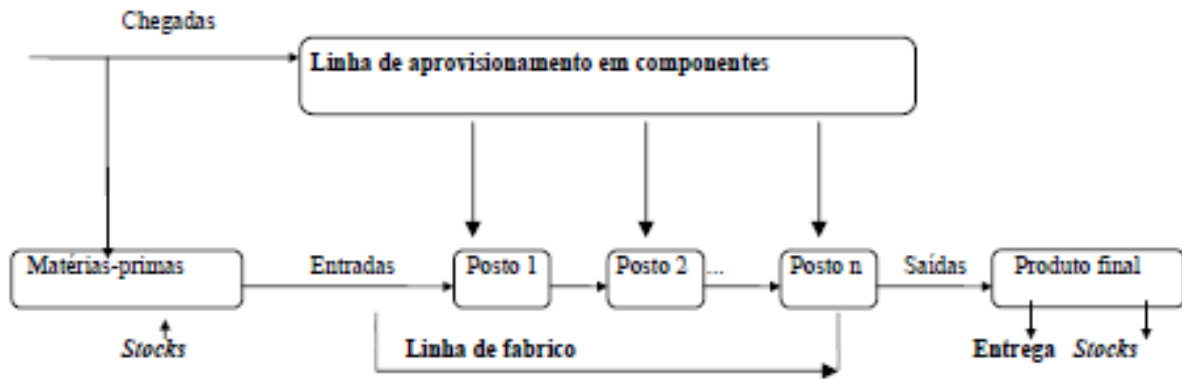


Figura 2.4 - O Fluxo de Produção Linear (Benichou e Malhiet, 1991)

Este tipo de fluxo, para muitos investigadores subdivide-se ainda em dois tipos de produção, consoante a produção seja efectuada em massa ou contínua. Ambos os tipos se caracterizam por um fluxo linear, apesar do processo contínuo ter tendência para ser mais automatizado e produzir produtos mais padronizados.

Schroeder (1989), considera que as operações em linha são bastante eficientes, mas também muito inflexíveis tornando-se complicado e muito custoso alterar tanto o produto como o volume de produção. Para o investigador a eficiência deve-se à aquisição de bens de capital em vez de mão-de-obra e à padronização da pouca mão-de-obra existente, através de tarefas rotineiras. Schroeder (1989), considera ainda que para este tipo de produção ser eficiente exige um elevado volume de produção, como forma de rentabilizar o equipamento especializado. Requer ainda, uma linha de produtos mais ou menos estável ao longo do tempo.

O fluxo intermitente

Caracteriza-se pela produção de lotes em intervalos de tempo descontínuos. Segundo Dilworth (1992), o fluxo intermitente é normalmente utilizado por empresas que tratam de uma grande variedade de produtos e os fabricam em pequenas unidades, tal como mostra a Figura 2.4.

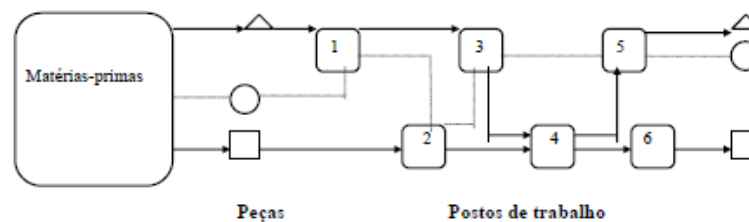


Figura 2.5 - A Produção Descontínua (JOB SHOP) (Benichou e Malhiet, 1991)

A produção de pequenas unidades tem como propósito a adaptação da empresa a um mercado cada vez mais heterogéneo e em mudança ou para responder às requisições de uma peça específica.

Este tipo de operações usa equipamento desenhado para fins gerais e mão-de-obra altamente qualificada, são por isso muito flexíveis, no caso de se alterar o produto ou o volume de produção. Schroeder (1989) é da opinião que a sua elevada flexibilidade pode trazer graves problemas no controlo de *stocks*, de programação de actividades e qualidade, consequência da utilização para trabalhos diferentes do mesmo equipamento e mão-de-obra, o que leva a uma diminuição significativa da utilização do equipamento tornando-se assim muito ineficiente. Ainda segundo Schroeder (1989) “As operações intermitentes justificam-se quando o produto não é padronizado e o volume de produção é baixo. Assim as operações tornam-se mais económicas e englobam menores riscos”.

O fluxo por projecto

Schroeder (1989), defende que o fluxo por projecto é usado na produção de produtos únicos. Cada unidade destes produtos desenvolve-se como um só artigo, sendo por isso difíceis de automatizar, não existindo portanto, um fluxo de produto, mas sim uma sequência de operações.

Todas as tarefas e operações individuais são realizadas segundo uma sequência bem determinada, de tal forma que cada uma contribua da melhor maneira para o alcance dos objectivos finais do projecto.

Este tipo de operações usa-se quando é necessária uma grande criatividade e originalidade até porque estes projectos são caracterizados por terem custos elevados e pela dificuldade de se fazer o planeamento e controlo administrativos, isto porque um projecto definido está sempre sujeito a alterações e inovações.

Falou-se das várias tipologias de produção que condicionam as características do Planeamento e Controlo da Produção. Mas como afirma Baranger e Hugel (1994) “A eficácia da gestão da produção depende muito do modo como são concebidos os sistemas onde evolui”.

2.6.3. Classificação em Função do Tipo de Relacionamento com o Cliente

Neste tipo de classificação distinguem-se três tipos de produção e de venda, venda a partir de *stock*, produção por encomenda e montagem por encomenda.

Na **venda a partir do stock**, o cliente adquire produtos existentes em *stock* previamente constituído pela empresa, assim o prazo de produção é superior ao prazo de entrega reclamado ou aceite pelo cliente, é necessário produzir em avanço para satisfazer o cliente apoiando a produção em previsões. Neste caso pretende-se produzir em grande quantidade e diminuir os custos (Courtois, Martins, Pillet, 1997).

A **Produção por Encomenda** é apenas iniciada a partir do momento em que dispomos de um compromisso firme do cliente. Evitamos assim (salvo em caso de anulação da encomenda) o stock de produtos acabados. Este tipo de produção é preferível ao tipo de produção para stock, pois conduz a uma diminuição dos stocks e, conseqüentemente, dos custos financeiros associados. Teremos assim todo o interesse em escolher este tipo de produção sempre que tal seja possível, isto é, sempre que o prazo de produção é aceite pelo cliente (Courtois, Martins, Pillet, 1997).

Montagem por Encomenda, este tipo de produção situa-se entre os dois anteriores. Fabricam-se para *stock* subconjuntos normalizados. Estes subconjuntos são posteriormente montados em função das encomendas dos clientes. Este tipo de organização permite reduzir, significativamente, o prazo entre a recepção da encomenda e a entrega do produto acabado (Courtois, Martins, Pillet, 1997).

2.6.4. Classificação quanto ao ambiente de produção

Quanto ao ambiente de produção a classificação que prevalece em termos da literatura é a que a seguir se apresenta:

- máquina única;
- máquinas paralelas (Mokotoff (2001));
- ambientes contínuos (*flow shop*);
- ambientes intermitentes (*job shop*);
- ambientes mistos e ambientes abertos (Shakhlevich *et al.* (2000)).

De acordo com a pesquisa efectuada, esta classificação é a que melhor se adequa à análise dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, pelo que será tomada como referência para este trabalho.

Capítulo 3

SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

3. Introdução

Dentro de um ambiente produtivo existem diversos problemas de decisão associados à coordenação dos recursos produtivos. O conjunto das decisões e acções necessárias para coordenar as actividades envolvidas no processo produtivo é entendido neste trabalho como planeamento, programação e controle da produção. De forma geral planejar a produção significa estabelecer metas para um período de tempo futuro, chamado de horizonte de planeamento, visando melhorar o uso de recursos produtivos, atendendo à procura de mercado e antecipando oportunidades de vendas futuras. Para estas actividades são necessárias, algumas informações (*inputs*) como: níveis e políticas de *stock*; posição de pedidos pendentes (*backorders*); previsões de procura; *stock* em processo; níveis de força de trabalho; capacidade produtiva; disponibilidade de material; padrões de produção; padrões de custos e preços de venda e políticas de gestão (Jonhson e Montgomery, 1974; Hax e Candea, 1984; Nahmias, 1995).

Existe uma relação hierárquica entre as actividades de planeamento programação e controle da produção (PPCP), entretanto, não existe na literatura um consenso em relação ao horizonte de tempo relacionado a essas actividades. Alguns autores relacionam o planeamento às actividades de médio prazo onde as decisões são tomadas de forma agregada, em termos do que, quando, onde e como produzir (Kistner e Switalski, 1989; Shapiro, 1993; Gelders e Van Wassenhove, 1981). A programação da produção está associada às actividades de curto prazo, como por exemplo: determinação dos prazos para execução das actividades e o sequenciamento de tarefas ou produtos. Já o controle da produção pode ser definido como a actividade de gestão responsável por regular (planejar, coordenar, dirigir e controlar) no curto prazo o fluxo de materiais em um sistema de produção por meio de informações e decisões para execução (Burbidge, 1978).

Os objectivos específicos das actividades de PPCP em um ambiente produtivo podem ser: estabelecer as quantidades a produzir de cada produto (dimensionamento de lotes); as quantidades a produzir por um processo ou por diversos processos alternativos (selecção de processos); determinar os níveis de produção para cada estação de trabalho (balanceamento de linha); programar as operações produtivas (*scheduling*/sequenciamento); etc.

Estes objectivos, bem como todas as actividades do PPCP, devem estar em sintonia com estratégias globais da empresa (Vollmann et al., 1997). Um sistema de PPCP bem projectado pode fornecer uma vantagem competitiva para a empresa no mercado. Os objectivos do PPCP também estão estreitamente relacionados aos custos e receitas que serão afectados pelos critérios de decisão, por exemplo, custos de produção, custos de armazenagem, custos de preparação, etc., que envolvem uma análise das características do negócio/empresa e dos seus objectivos de desempenho (análise dos *trade-offs*).

De acordo com Godinho Filho e Fernandes (2005), quando são projectados os sistemas de produção, devem ser considerados os *trade-offs existentes* na manufactura, ou seja, as empresas devem considerar os seus esforços em um número reduzido de objectivos.

Diversos modelos podem ser encontrados na literatura de gestão da produção e pesquisa operacional para tratar problemas de PPCP, conforme, por exemplo, Johnson e Montgomery (1974), Hax e Candea (1984), Winston (1991), Askin e Standridge (1993), Williams (1993), Graves et al. (1993), Gershwin (1994) e Nahmias (1995). Estes autores tratam de problemas envolvendo múltiplos produtos, múltiplos processos, múltiplos estágios, limitações de recursos, e outras características comuns ao planeamento da produção envolvendo diferentes objectivos e *trade-offs* entre eles.

3.1. O Problema de Dimensionamento de Lotes

3.1.1. Caracterização do Problema

O problema de dimensionamento de lotes consiste em determinar quando e quanto produzir de cada produto. Este problema está associado a uma das grandes dificuldades do PPCP, que é conseguir flexibilidade nas operações produtivas. Ao contrário dos sistemas de produção em massa, em que se produziam grandes lotes aproveitando-se melhor os tempos de preparação, o surgimento de conceitos como *Just in Time (JIT)* e *Lean Manufacturing*, levaram os sistemas de planeamento a diminuir os tamanhos dos lotes para reduzir os custos de *stock* envolvidos, principalmente os custos de oportunidade financeira. Em contrapartida, aumentaram os custos e tempos de preparação (Vörös, 2002).

Quando a taxa de procura, varia ao longo do horizonte de planeamento, este horizonte é dividido em períodos e o problema é determinar níveis de produção adequados para cada período. Algumas alternativas para ajustar a capacidade produtiva às oscilações da procura são: construir *stock* nos períodos de folga na capacidade; atrasar pedidos ou tolerar vendas perdidas; utilizar horas extras para aumentar a capacidade produtiva; utilizar subcontratação; alterar os níveis de força de trabalho através de contratação e demissão; etc. (Johnson e Montgomery, 1974; Hax e Candea, 1984). Estas alternativas encontram-se combinadas nos modelos encontrados na literatura de acordo com os critérios de desempenho objectivados.

Os problemas de dimensionamento de lotes podem ser modelados conforme as características de um sistema de produção específico. Conforme Karimi et al. (2003), a complexidade destes problemas depende das seguintes características:

- a) Horizonte de Planeamento: pode ser finito ou infinito. Um horizonte de planeamento finito geralmente é considerado junto com procura dinâmica, enquanto o horizonte infinito é considerado para condições de procura estacionária. Ainda em relação ao tempo, um sistema pode ser observado de forma contínua ou discreta, dividindo os problemas de dimensionamento de lotes em '*big-bucket*' ou '*small-bucket*'. Nos problemas '*big-bucket*' os períodos de tempo são grandes o bastante para produzir vários itens, enquanto em problemas '*small-bucket*' os períodos são pequenos, comportando apenas um ou dois itens.
- b) Procura: os problemas de dimensionamento de lotes podem ser divididos: em estáticos ou dinâmicos; determinísticos ou probabilísticos; dependentes ou independentes. Quando os valores da procura não variam ao longo do horizonte de planeamento (são estacionários ou mesmo constantes), a procura é estática. Quando os valores da procura mudam ao longo do horizonte de planeamento, a procura é dinâmica. Se a procura futura é conhecida (estática ou dinâmica) o problema é determinístico, mas se os valores da procura futura são baseados em alguma probabilidade, então a procura é dita probabilística. Na procura independente, as necessidades de um item não dependem das decisões de dimensionamento de lote de outro item. Este tipo de procura é comum nos sistemas de produção nível único. No dimensionamento de lotes multi-nível, a procura em um nível depende da procura dos itens anteriores, por isso é chamada de procura dependente. Problemas com procura dinâmica e dependente são mais complexos que problemas com procuras estáticas ou independentes. Do mesmo modo, os problemas com procuras probabilísticas são mais complexos que os problemas com procuras determinísticas.
- c) Número de estágios de produção: um sistema produtivo pode ser classificado quanto aos estágios do processo de produção, resultando em problemas nível único e em problemas multinível, também chamados mono estágio ou multi-estágio. Os sistemas nível único pressupõem uma única etapa de processamento, onde as matérias-primas são directamente transformadas em produtos finais. Este tipo de produto possui procura independente. Nos sistemas de produção multinível, existem várias etapas de processamento, são produzidos itens intermediários, e existe uma relação de precedência entre estes itens. A procura de um item em um nível depende da procura dos itens anteriores (procura dependente). Problemas multinível são mais complexos que problemas nível único.
- d) Número de produtos: o número de itens ou produtos finais em um sistema de produção é uma característica importante que afecta a complexidade da modelagem e resolução dos problemas de dimensionamento de lotes.

Desta forma, os sistemas produtivos podem ser divididos em único item ou multi-item.

- e) Restrições de capacidade ou de recursos: a capacidade e os recursos em um sistema produtivo incluem força de trabalho, equipamentos, máquinas, orçamento, etc. Um problema é não capacitado quando não há restrições de capacidade ou recursos, quando existem estas restrições o problema é capacitado.
- As restrições de capacidade afectam directamente a complexidade do problema. A resolução de problemas é mais difícil quando existe restrição de capacidade.
- f) Estrutura dos custos e tempos de preparação: os custos ou tempos de preparação, geralmente são modelados através da introdução de variáveis binárias no modelo matemático do problema, causando maior dificuldade para resolução do problema. A estrutura dos tempos ou custos de preparação pode ser simples ou complexa. Se os tempos e custos de preparação são independentes da sequência de produção, a estrutura é considerada simples, mas quando a preparação é dependente da sequência, a estrutura é considerada complexa. De acordo com Karimi *et al.* (2003), as estruturas de tempos ou custos de preparação complexas podem ser divididas em três tipos: preparação entre produtos da mesma família; preparação entre famílias e preparação que pode ser mantida de um período para outro (*carryover*).
- g) Políticas de atendimento da procura: dependendo do tipo de empresa ou negócio, pode ser possível permitir *stock* negativo (*backlogs*), ou seja, permitir que a procura actual possa ser atendida em períodos futuros (atrasos), ou mesmo que a procura não seja totalmente atendida, implicando em perdas nas vendas. Estas possibilidades geralmente são modeladas através da inclusão de custos de atraso na função objectivo e definem a forma das restrições.
- h) Perecibilidade: quando existem riscos associados à deterioração dos itens, devem ser consideradas restrições de tempo no horizonte de planeamento, bem como penalizações associadas ao risco de perecibilidade.

3.1.2. Modelos Matemáticos para o Dimensionamento de Lotes

As pesquisas sobre modelos de dimensionamento de lotes começaram com a fórmula clássica de dimensionamento de lotes - EOQ (*Economic Order Quantity*) (Erlenkotter, 1990), que determina a quantidade de produção para um item individual, considerando o *tradeoff* existente entre os custos de controlo de *stock* e os custos de preparação. Este modelo pressupõe um processo produtivo de nível único, sem restrições de capacidade, único item e procura constante ao longo de um horizonte de planeamento infinito. Embora esta fórmula não seja eficiente para descrever a maioria dos sistemas de planeamento da produção, pois não considera as limitações de capacidade, ela ainda é útil nos sistemas de *stock* para determinar quantidades adquiridas de materiais (Nahmias, 1995).

Devido às limitações desta abordagem, surgiram outros modelos, como o ELSP (*Economic Lot Scheduling Problem*) (Elmaghraby, 1978), onde o problema é programar a produção de mais de um produto em uma única máquina. As principais pressuposições deste modelo são restrição de capacidade, custos e tempos de *setup* independentes da sequência produtiva, assume ainda taxas de produção e procura constantes em um horizonte de tempo infinito (Wagner e Davis, 2002, Elmaghraby, 1978).

Uma próxima evolução foi considerar condições de procura dinâmica. O modelo proposto por Wagner e Whitin (1958) admite um horizonte de planeamento finito dividido em subperíodos, no entanto, não são consideradas restrições de capacidade. As taxas de procura são conhecidas em cada período e um único lote pode ser produzido por período. O problema é determinar o tamanho de lote em cada período que minimiza a soma total dos custos.

Diversos trabalhos abordam o problema de dimensionamento de lotes não capacitado, considerando a programação da produção (ou aquisição) de um único item com taxas de procura. Brahim *et al.* (2006) apresentam uma revisão sobre este problema. A solução óptima do modelo não capacitado de um único item é encontrada pelo algoritmo de programação dinâmica de Wagner Whitin (Jonhson e Montgomery, 1974, Hax e Candea, 1984).

De acordo com Karimi *et al.* (2003), outros autores propuseram abordagens de solução para o problema não capacitado que reduzem a complexidade computacional em relação ao algoritmo proposto por Wagner e Whithin (1958). Pochet e Wolsey (2006) apresentam um modelo do problema de dimensionamento de lotes não capacitado, que inclui na função objectivo os custos de produção. Estes autores também apresentam uma formulação onde o modelo é estendido para vários produtos simultaneamente. Neste caso temos um modelo não capacitado, nível único, multiproduto com procura dinâmica. Como não há restrições de capacidade, o problema pode ser decomposto em N subproblemas independentes, um para cada item a ser produzido. Desta forma que cada subproblema pode ser resolvido independentemente (Pochet e Wolsey 2006, Araújo e Arenales, 2000, Toledo, 1998, Jonhson e Montgomery, 1974). Para Pochet e Wolsey (2006), o modelo não capacitado é um subproblema essencial para o planeamento da produção, pois é resolvido repetidamente para cada item da estrutura do produto nos modelos de dimensionamento de lotes multi-item ou multiestágio.

3.2. O Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes

Os problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, embora bastante relacionados, são frequentemente tratados separadamente na literatura. No entanto, conforme Drexel e Kimms (1997), Laguna (1999), Staggemeier e Clark (2001) e Karimi *et al* (2003), a tendência mais recente é combinar o problema de dimensionamento de lotes às decisões de programação da produção (*lot-sizing and scheduling problems* ou *lot- scheduling*).

3.2.1. Caracterização do Problema

Conforme apresentado anteriormente, o problema de dimensionamento de lotes (*lot sizing*) consiste em determinar o que e quanto produzir, ajustando a capacidade produtiva às variações da procura. O problema de sequenciamento e programação de lotes (*sequencing and scheduling*) consiste em determinar em que ordem produzir os lotes, de forma a minimizar os tempos de preparação, que diminuem a capacidade produtiva (Johnson e Montgomery, 1974; Hax e Candea, 1984; Graves *et al.*, 1994; Gershwin, 1994; Nahmias, 1995).

O método mais utilizado na prática para resolver o problema é o MRP II (*Manufacturing Resource Planning*), que é uma evolução do MRP. O MRP II combina três fases para construir um plano de produção factível. Em uma primeira fase os tamanhos de lote são calculados para todos os itens em todos os níveis da estrutura, ignorando-se as restrições de capacidade. No segundo passo é feito o balanço de capacidade nos períodos, alterando-se alguns lotes para encontrar um plano de produção dentro dos limites de capacidade. Contudo, as relações de precedência são ignoradas. E, finalmente, no terceiro passo são tomadas decisões de sequência e os pedidos são libertos para a produção. No entanto, conforme discutido em Drexel e Kimms (1997), a solução deste método pode resultar em longos *lead times*, altos *stocks* intermediários (*work-in-process*) e pedidos atrasados (*backlogging*).

Outra ferramenta muito usada pelas empresas de manufactura é os sistemas de gestão ERP (*Enterprise Resource Planning*), que além do MRP, disponibilizam outros módulos para a produção, como módulo para previsão de vendas, módulo para programação das linhas (*Line Scheduling*), etc. Em alguns *softwares* de sistemas ERP estão incluídos módulos otimizadores que utilizam abordagens de Pesquisa Operacional, por exemplo, o *SAP's Advanced Production Optimizer (SAP-APO, 2002)* e o *i2's Trade Matrix (i2, 2002)*. A maior dificuldade na utilização destes módulos está associada ao facto de que são muito genéricos, não contemplando as especificidades de cada

sistema produtivo.

Diversos autores têm apresentado modelos de dimensionamento de lotes para sistemas MRP multiestágios. Por exemplo, Clark (2003) desenvolve três modelos de programação inteira mista e métodos de solução para encontrar um programa mestre de produção capacitado e realizável para os sistemas MRP, então chamados modelos CMRP (*Capacitated Material Requirements Planning*).

Toledo e Shiguemoto (2005) apresentam um caso particular do problema de dimensionamento de lotes, envolvendo o planejamento da produção de um único item em vários centros produtivos sem restrições de capacidade. O problema pode ser visto como uma decomposição de alguns problemas, como MRP e problemas de dimensionamento de lotes com múltiplos itens e capacidade de produção limitada.

Estas abordagens discutidas até então relacionam-se com problemas multiestágios. Os modelos discutidos a seguir tratam de forma integrada os problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção para problemas mono estágios, que também podem ser utilizados de forma acoplada para modelar os casos multiestágios.

3.2.2. Modelos matemáticos para o problema integrado

Alguns modelos clássicos que consideram as decisões de sequenciamento de lotes juntamente com as decisões de dimensionamento são: DLSP (*Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem* - Problema de Dimensionamento de Lotes e Programação da Produção Discreto); CSLP (*Continuous Setup Lot Sizing Problem* - Problema de Dimensionamento de Lotes com Preparação Contínua); PLSP (*Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem* - Problema de Dimensionamento de Lotes e Programação da Produção Proporcional); e, GLSP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem* - Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Programação da Produção).

O DLSP consiste em um problema de único nível, multiproduto e dinâmico, que foi introduzido para incluir no CLSP as decisões de sequenciamento (Fleischmann, 1994). Neste problema os períodos considerados são curtos (horas), ao invés de semanas como no CLSP, portanto alguns autores chamam de micro períodos (Drexel e Kimms, 1997; Staggemeier e Clark, 2001; Araújo, 2003). A pressuposição principal é a produção ‘tudo ou nada’, ou seja, somente um item é produzido por período usando toda sua capacidade. Salomon *et. al* (1997) ressaltam a importância prática do DLSP.

O CSLP pode ser considerado uma extensão do DLSP, onde a pressuposição ‘tudo ou nada’ é abandonada, ou seja, a capacidade por período não tem de ser completamente utilizada, mas

como no modelo anterior, apenas um item pode ser produzido por período.

De acordo com Drexel e Kimms (1997), esta diferença em relação ao DLSP permite que após um período de inatividade, não seja implicado um novo custo de *setup*. Drexel e Kimms (1997) apresentam uma revisão completa destes modelos.

O PLSP é um modelo mais flexível que os anteriores, admitindo no máximo dois itens por período. De forma geral, a ideia básica do PLSP é usar a capacidade remanescente em um período para produzir um segundo item (Drexel e Haase, 1995). Uma variação deste modelo é o PLSP-ML (*Multi-level Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem*) que considera problemas multiestágios e várias máquinas (Meyr, 2002).

Segundo a classificação de Karimi *et al.* (2003), os modelos DLSP, CSLP e PLSP são modelos ‘*small bucket*’, ou seja, somente um ou dois itens podem ser produzidos em cada período. Para aplicação destes modelos, os períodos de produção devem ser definidos para que o seu tamanho seja coerente com os tamanhos de lote.

No modelo GLSP (Fleischmann e Meyr, 1997) cada período t é dividido em vários subperíodos. Cada lote é designado a um subperíodo (s), ou seja, uma posição dentro de cada período (t) para definir uma sequência. O número de subperíodos dentro de cada período é pré-fixado, mas o comprimento de cada um é função das variáveis de decisão do modelo, podendo inclusive ser nulo.

De acordo com Fleischmann e Meyr (1997), o GLSP é um modelo geral devido ao facto de que diversos modelos para dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção diferem do GLSP apenas por restrições adicionais que modificam a estrutura de tempo das soluções. Segundo estes autores, o grupo de soluções do GLSP contém o grupo de soluções de diversos modelos como CSLP, DLSP e DLSP-SD, CSLP, e PLSP.

Algumas variações do GLSP, que diferem deste apenas no tratamento do estado de *setup* depois dos períodos ociosos, são o GLSP-CS (*Conservation of Setup State*) e o GLSP-LS (*Loss of Setup State*). Para estes modelos, existem casos práticos onde os custos sempre aumentam se uma máquina está ociosa (Fleischmann e Meyr, 1997).

Meyr (2000) apresenta uma variação de modelagem para o GLSP que inclui custos e tempos de preparação dependentes da sequência produtiva - GLSP-ST (*Setup Times*).

3.3. Métodos de Solução

Conforme apresentado anteriormente, estes problemas podem ser modelados por programação inteira mista. Outra abordagem para representar o problema consiste na construção de modelos conceituais que podem ser resolvidos por métodos heurísticos, por exemplo, heurísticas construtivas, heurísticas de busca local e metaheurísticas. Devido aos desafios e complexidades dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, existem abordagens que combinam diferentes métodos de solução, tanto exactos quanto heurísticos.

3.3.1. Métodos Exactos

Os métodos exactos mais utilizados para resolver modelos de programação matemática inteiristas (MIP - *Mixed Integer Program*) são *Branch-and-Bound (B&B)* e *Branch-and-Cut (B&C)*.

O *Branch-and-Bound* é um método de enumeração implícita, cuja ideia básica é a procura da solução óptima por meio da divisão do conjunto de soluções possíveis do problema em subconjuntos mais restritos (subproblemas). Cada subproblema fornece limites que servem para avaliar a necessidade de novas divisões no processo de enumeração. O número de subproblemas cresce exponencialmente com o número de variáveis inteiras, e o tempo computacional de resolução pode se tornar inviável em situações de aplicações práticas.

De acordo com Pochet e Wolsey (2006), uma boa formulação é determinante para resolver um MIP usando o método *Branch-and-Bound*. Uma forma de melhorar o método é adicionar desigualdades válidas na formulação inicial para reduzir a região factível, sem eliminar nenhuma solução inteira. Estas desigualdades válidas são conhecidas como Planos de Corte, que combinadas com o método *Branch-and-Bound* resultam no método *Branch-and-Cut*.

Uma implementação computacional eficiente destes métodos é bastante complexa e exige conhecimentos específicos das áreas de computação e matemática. Desta forma, a partir das décadas de 50 e 60 houve grande desenvolvimento de algoritmos e códigos de programas para a resolução de problemas complexos de programação matemática, entre eles a programação inteira e a programação inteira mista. Alguns sistemas comerciais eficientes para resolução destes modelos são: CPLEX (ILOG, *Inc.*), LINDO (LINDO *Systems, Inc.*) e XPRESS-MP (*Dash Optimization Ltd.*). De acordo com Atamtürk e Salvesberg (2005), o “estado da arte” destes sistemas de programação inteira é um algoritmo *B&B* baseado em programação linear (PL), que tem se tornado cada vez mais complexo com a incorporação de técnicas sofisticadas, como avançadas estratégias de busca, pré-processamento e técnicas de investigação, algoritmos de planos de corte e

heurísticas primárias. Estes sistemas comerciais para programação inteira e programação inteira mista incluem uma série de estratégias padrão (*default*) que foram escolhidas pelo ajuste a inúmeros exemplares de problemas. A ideia básica é resolver as relações lineares o mais rápido possível e fazer ramificações inteligentes (Wolsey, 1998; Bixby, 2002).

3.3.2. Métodos Heurísticos

Devido à sua natureza complexa, a utilização de modelos de programação matemática para o dimensionamento de lotes e para o dimensionamento e sequenciamento de lotes não é comum na prática. Além disso, o tempo computacional para resolução destes modelos, frequentemente torna a sua aplicação prática inviável. Desta forma, em paralelo ao desenvolvimento de modelos matemáticos, surgiram várias abordagens heurísticas baseadas no conhecimento do problema.

Um método heurístico consiste em um grupo de passos bem definidos para uma rápida identificação de uma solução de alta qualidade para um dado problema, onde uma solução é um grupo de valores para um problema desconhecido, e a qualidade é definida por um critério de avaliação (Pureza, 2005). As soluções geralmente são pressupostas factíveis atendendo todas as restrições. O propósito de um método heurístico é identificar boas soluções para o problema com baixo tempo computacional.

De acordo com Karimi et al. (2003), a estrutura das heurísticas para os problemas de dimensionamento de lotes pode ser caracterizada em três passos: o dimensionamento dos lotes, uma rotina de factibilização e um passo de melhoria. O passo de dimensionamento dos lotes consiste em transformar a matriz da procura em uma matriz de tamanhos de lote de produção, é esta uma das diferenças entre as heurísticas, ou seja, a forma como elas combinam a procura em lotes. A rotina de factibilização visa contornar as restrições de capacidade e garantir que toda a procura seja atendida sem atrasos. No passo de melhoria são aplicadas diversas regras para refinar e melhorar a solução encontrada. Neste passo a procura pode ser dividida em vários lotes, o que geralmente é muito efectivo. Em Maes e Van Wassenhove (1988) as heurísticas de dimensionamento de lotes são divididas em dois grupos: as heurísticas período a período e as heurísticas de melhoria.

As heurísticas período a período trabalham construindo a solução do período de 1 ao t . Depois de determinar a quantidade a ser produzida para todos os produtos no período t , o excesso de capacidade pode ser utilizado para produzir a procura dos períodos futuros, visando a economia nos custos de preparação. Para escolher o produto e a respectiva quantidade a ser produzida nos períodos futuros, estas heurísticas utilizam índices de prioridade.

As heurísticas de melhoria começam com uma solução inicial, geralmente impraticável, que pode ser gerada através das técnicas para dimensionamento de lotes não capacitado. Estas heurísticas são compostas de três passos: geração da solução inicial, ignorando-se as restrições de capacidade; tentativas de factibilizar a solução, através de mudanças nos lotes de um período a outro com mínimo custo; e, finalmente, o terceiro passo consiste em minimizar os custos sem permitir soluções impraticáveis (Karimi, *et al.*, 2003).

Trigeiro (1989) desenvolveu uma heurística de melhoria para o CLSP com tempos de preparação, baseada na heurística Silver-Meal. A heurística começa com uma solução inicial lote por lote, ou seja, o tamanho do lote é igual à procura em cada período. Para factibilizar a solução é usada um procedimento retroactivo, onde a produção da procura dos períodos com capacidade insuficiente é antecipada nos períodos com excesso de capacidade. O objectivo deste procedimento é minimizar a soma dos custos de preparação e custos de *stock*, eliminando a necessidade de horas extras. Finalmente, o algoritmo tenta melhorar a solução através de rearranjo.

Existem muitas heurísticas para os problemas de dimensionamento de lotes, que variam de acordo com as especificidades de cada problema. De acordo com De Boldt *et al.* (1984), a escolha de uma heurística para uma aplicação específica é muito difícil e depende de factores como a variabilidade da procura e a estrutura de custos.

Gupta e Magnusson (2005) consideram o problema de dimensionamento e sequenciamento da produção com tempos de custos de preparação dependentes da sequência, assumindo também que a preparação da máquina deve ser mantida de um período para outro (*setup carryover*). Para a resolução deste problema, é proposta uma heurística chamada de ISI (*Initialize, Sequence, and Improve*), que consiste em três passos: busca uma solução inicial factível para determinar as quantidades produzidas; procura encontrar sequências produtivas com mínimo custo para cada período; e, tenta refinar a solução, buscando antecipar a produção para economizar nos tempos de preparação. Esta heurística pressupõe que a desigualdade triangular é válida para os tempos de preparação e é testada apenas para instâncias pequenas. Segundo os autores para resolver instâncias grandes, considera-se os tempos de preparação dependentes da sequência inviáveis.

De acordo com Jans e Degraeve (2004), na década passada muitas metaheurísticas como Busca Tabu (TS - *Tabu Search*), Algoritmos Genéticos (GA - *Genetic Algorithms*) e *Simulated Annealing* (SA) tornaram-se ferramentas populares e eficientes para resolver problemas de optimização combinatoria (Michalewicz e Fogel, 2002; Glover e Laguna, 1997; Reeves (1997).

Sikora (1996) apresenta um Algoritmo Genético para resolver um problema de programação da produção, integrando decisões de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produtos, envolvendo tempos de preparação em cada máquina dependentes da sequência, restrições de capacidade, capacidade limitada de *stock* intermediário entre as máquinas e datas de entrega. Ponnambalam e Reddy (2003) fazem uma adaptação do GA desenvolvido por Sikora (1996) e uma combinação com as técnicas de SA, resultando em um procedimento híbrido de duas fases, que apresenta melhores resultados nos testes realizados.

Toledo (2007) e Toledo *et al.* (2007) formulam um problema de dimensionamento de lote e programação da produção em máquinas paralelas com restrições de capacidade, custos e tempos de preparação dependentes da sequência para a indústria de bebidas. O modelo é bastante complexo, apresentando características do GLSP e envolvendo dois estágios e sincronia entre os estágios. A resolução por meio de métodos exactos só é viável para instâncias pequenas, para isso foi usado o pacote GAMS/CPLEX. Para instâncias maiores foram desenvolvidos dois procedimentos heurísticos: um Algoritmo Genético e um Algoritmo Memético.

Hindi (1995) propõe um algoritmo de Busca Tabu para um problema de dimensionamento de lotes de item único, capacitado, dinâmico, com custos de *start-up* e reserva (*reservation costs*), que encontra soluções ótimas em todos os testes. Pereira *et al.* (2002) combina as técnicas de Busca Local e Busca Tabu para um DLSP multi-itens, multimáquinas com custos de preparação dependentes da sequência.

Capítulo 4

ESTUDO DE CASO

4. Introdução

A pesquisa bibliográfica efectuada permitiu concluir que, o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção é importante em muitos ambientes industriais, para a eficiência do processo produtivo e consequentemente para a competitividade das empresas.

Neste capítulo analisa-se o caso particular da indústria de produção agro-alimentar e descreve-se o processo produtivo típico da empresa, de forma a identificar o tipo de problemas de dimensionamento e sequenciamento existentes.

Serão também expostos os procedimentos desenvolvidos na empresa ao nível do planeamento. A compreensão destes procedimentos é determinante para que se possa entender como o problema de dimensionamento e sequenciamento da produção é relevante para a eficiência da empresa neste tipo de indústria.

4.1. Apresentação da empresa em estudo na indústria alimentar

Este trabalho realizou-se na Frulact S.A, na unidade localizada na Zona Industrial do Tortosendo. A Frulact nasce em 1987 fruto de uma ideia empresarial familiar consubstanciada no domínio das técnicas e das tecnologias das actividades de transformação de frutas e de lácteos. Desde logo a empresa foi habituada a uma constante evolução de conhecimento em todas as áreas operacionais, desde o fabrico até à comercialização, com especial destaque para a investigação e desenvolvimento de produtos e de processos industriais. Os produtos elaborados na Frulact são usados principalmente na indústria dos lacticínios, gelados, bebidas e pastelaria industrial. Cada produto final tem uma referência diferente, e não há referências nem produtos iguais, daí que o número de referências activas neste tipo de indústria seja muito grande. Na Frulact existem mais de 300 referências activas, o que torna complexo o sistema de dimensionamento e sequenciamento da produção.

4.2. Unidade fabril em estudo

Em 2006 a FRULACT aposta no desenvolvimento do grupo com o início da laboração da nova fábrica em Tortosendo na Covilhã. Uma unidade estrategicamente localizada próxima de zonas de elevada produção frutícola.

A unidade fabril do Tortosendo é constituída pelos sectores administrativo, manutenção, logística, controlo de qualidade e produção:

- a logística é constituída por três câmaras com temperatura controlada, duas para matérias-primas (congelamento e refrigeração) e uma câmara refrigerada para produto acabado, um armazém para matérias-primas à temperatura ambiente e uma zona de expedição do produto acabado.
- o controlo de qualidade é ordenado por dois laboratórios, um de análises físico-químicas e outro de análises microbiológicas.
- o sector de produção é composto por uma sala de preparação e pesagem de fruta, uma sala de micro-pesagens de matérias-primas à temperatura ambiente e produtos alergénicos, uma área de produção que contempla três linhas contínuas e duas linhas descontínuas (*batch*) de processamento de frutas, uma zona CIP (Cleaning in Place) e SIP (Steam in Place) de lavagem, esterilização e preparação de contentores e uma sala de planeamento e controlo da produção.

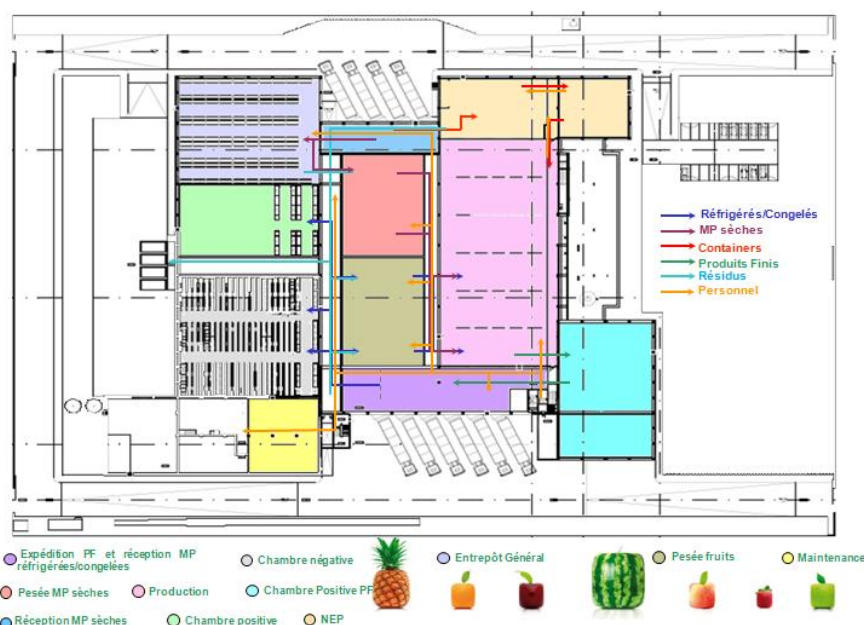


Figura 4.1 - Layout da unidade fabril de Tortosendo

4.3. Descrição do processo produtivo de preparados de fruta

O processo produtivo é a combinação de várias etapas, transformando um conjunto de matérias-primas num produto acabado final. A produção na unidade fabril Frulact - Tortosendo é dividida por fases e executadas de acordo com as encomendas dos clientes. Assim, dada a encomenda do cliente, o planeamento emite ordens de fabrico (OF), dimensiona e sequencia essas ordens de fabrico nas linhas de produção, consultando anteriormente a disponibilidade no *stock* de matéria-prima (MP).

O Fluxograma do processo produtivo desde o planeamento da OF à expedição da encomenda é o seguinte:

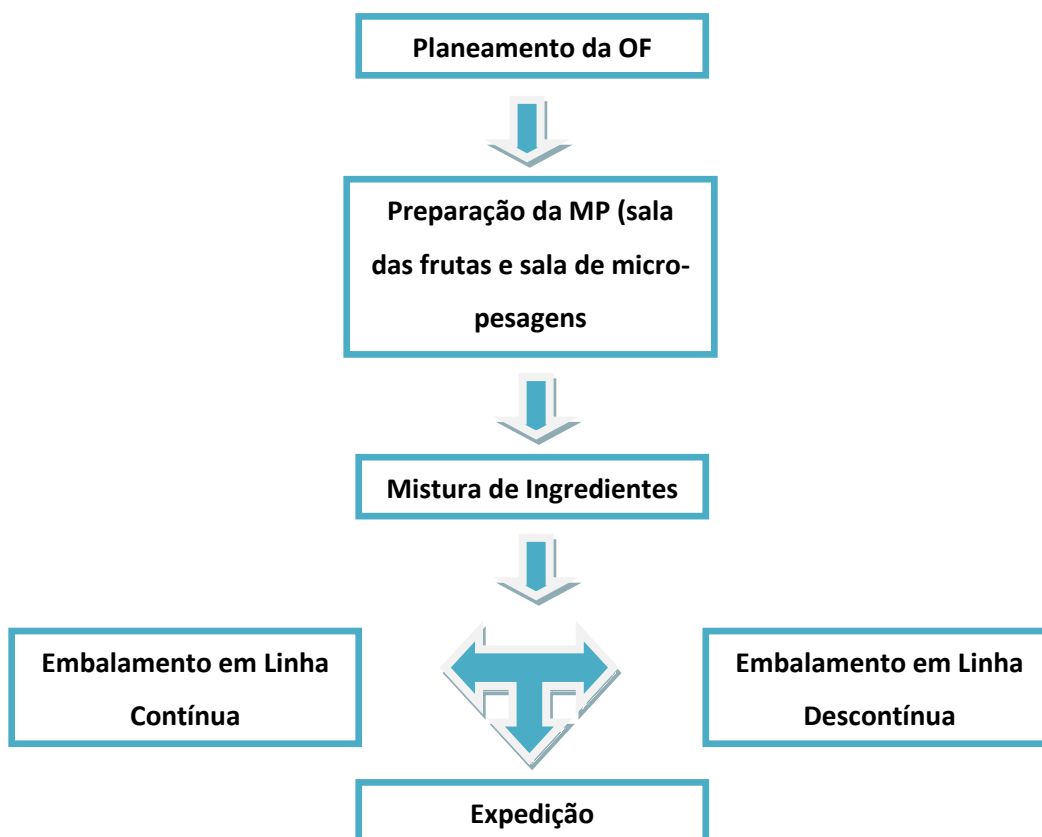


Figura 4.2 - Fluxograma do processo produtivo

4.3.1. Etapas do processo produtivo em linha contínua

Recepção e controlo das matérias-primas e materiais de embalagem

A secção da logística é responsável pela recepção das matérias-primas e materiais de embalagem e distribuição das mesmas consoante o local de armazenagem. Após a recepção, o controlo de qualidade averigua a conformidade das matérias-primas.

Armazenamento

As frutas e polpas recebidas são armazenadas nas câmaras de congelação ou refrigeração e as restantes matérias-primas (amido, pectinas, aromas, corantes, xaropes, ácidos, gomas, açúcar) são armazenadas no armazém dos secos à temperatura ambiente.

Os materiais de embalagem são arrumados no armazém dos secos, à excepção dos contentores de aço inoxidável que são embalagens retornáveis que vão para a zona CIP/SIP para serem submetidos a um tratamento de lavagem e esterilização.



Figura 4.3 - Materiais de embalagem

Preparação das Matérias-Primas e Materiais de Embalagem

As frutas e polpas congeladas ou refrigeradas são pesadas e preparadas na sala das frutas; os ingredientes provenientes do armazém dos secos são pesados e preparados na sala de micro pesagens de acordo com o planeamento.

Os contentores de aço inoxidável são retornados dos clientes, ao serem recepcionados vão para a zona CIP, onde após uma pré-lavagem são inseridos nos terminais CIP, nos quais vão ser submetidos a um ciclo de lavagem.

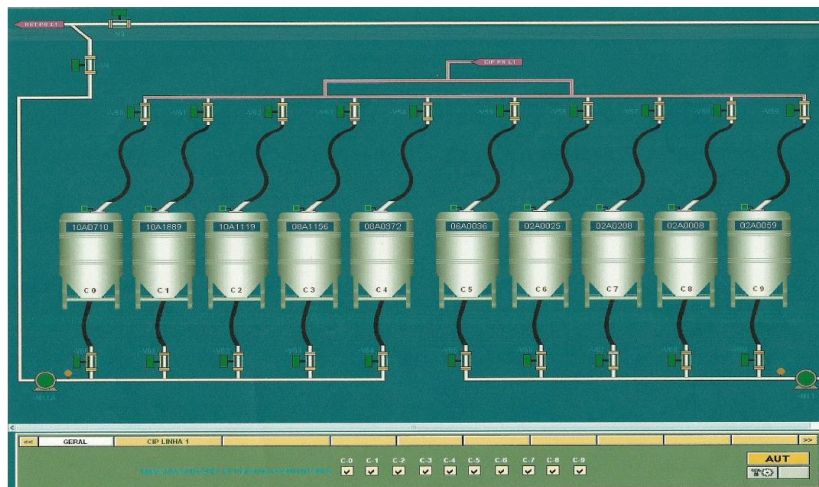


Figura 4.4 - Esquema da Linha CIP

Após a lavagem são transferidos para a zona SIP onde são esterilizados.

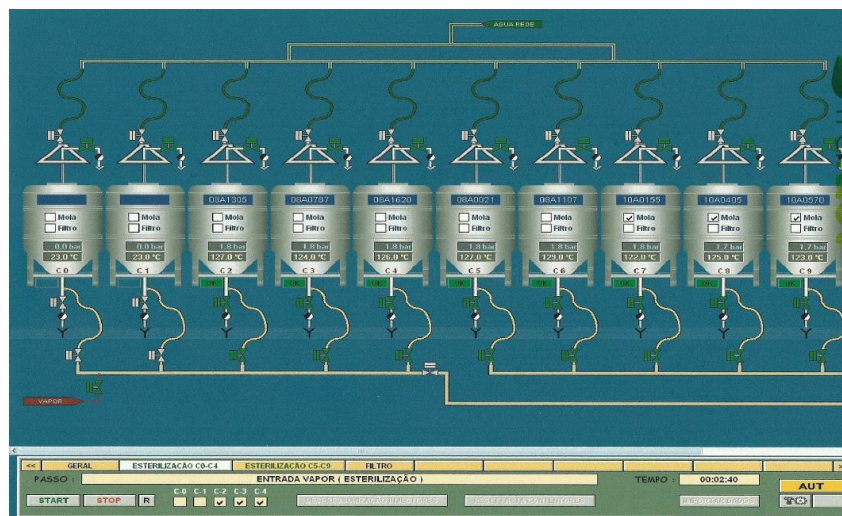


Figura 4.5 - Esquema da Linha SIP

Quando concluído o tratamento realizado no CIP/SIP os contentores são colocados no parque de contentores que está disponível para as várias linhas de produção, os baldes e bidões são disponibilizados pelo armazém consoante a necessidade do planeamento.

Primeira e Segunda Filtragem

A filtragem consiste na existência de uma malha (filtro) na descarga das matérias-primas para os tanques de mistura.

A primeira filtragem é efectuada nos açúcares líquidos e sólidos provenientes dos silos. A segunda filtragem é realizada nas polpas de fruta á entrada nos tanques de mistura nas linhas de produção.

Mistura de ingredientes

As várias matérias-primas são adicionadas e misturadas num tanque de mistura de acordo com a receita (pré-soluções, ordem de entrada das matérias-primas, temperatura de preparação e velocidade das pás). Cada linha contínua possui dois tanques de mistura com capacidade para 2000Kg, que possuem um veio central rotativo com pás, que tem como função homogeneizar o produto e uma camisa de vapor na parte inferior, que permite fazer um pré-aquecimento do produto. A velocidade das pás e a temperatura são reguláveis conforme as especificações de modo a facilitar o aquecimento no pasteurizador.

A linha de produção contempla um misturador (mixer) que permite a mistura e preparação de hidrocolóides (espessantes, gomas, corantes), com um fundo cónico que permite o envio directo para o tanque seleccionado. O misturador à semelhança do tanque de mistura também é aquecido por uma camisa de vapor situado na parte inferior.

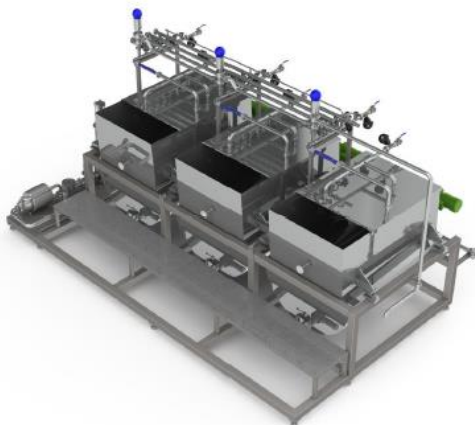


Figura 4.6 - Tanques de mistura de ingredientes

Controlo e Acerto de Parâmetros

No final da mistura dos ingredientes o operador faz o controlo de parâmetros (Brix, pH, quantificação dos pedaços) para averiguar se o produto está dentro das especificações. Caso o produto se encontre não conforme, o operador informa o encarregado de produção para efectuar os ajustes necessários.

Bombagem de produto

O produto é bombeado para a linha por uma bomba de pistão que possui dois excêntricos desfasados de 180°, um tambor contendo um êmbolo que se desloca num pino rotativo articulado. Ao girar o tambor, o êmbolo oscila subindo e baixando, funcionando desta forma como uma válvula de controlo do produto que está sendo transportado da boca de aspiração até a boca de recalque da bomba.

Esta etapa é muito importante no processamento, devido à velocidade da bomba ser ajustada para que o produto mantenha um caudal que permita atingir a temperatura de pasteurização e cumprir o tempo de “*holding*” (binómio tempo temperatura).

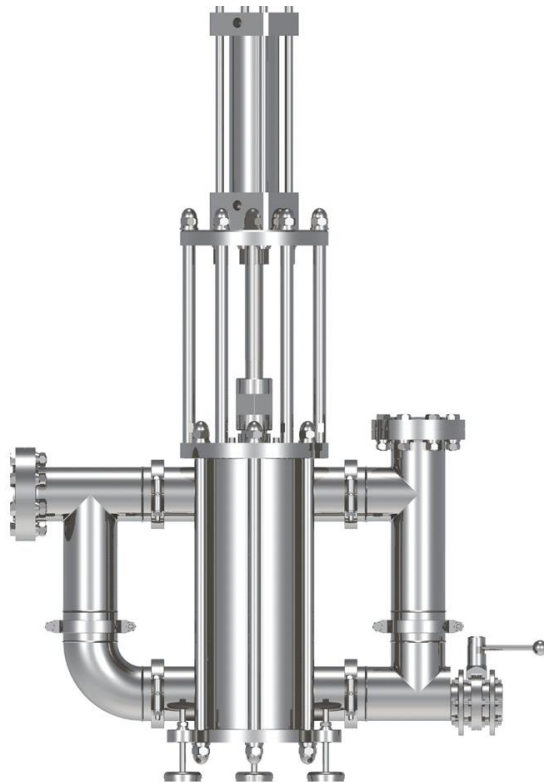


Figura 4.7 - Bomba de pistão

Terceira Filtragem

O produto atravessa um crivo com uma malha metálica especificada de acordo com as características do produto.



Figura 4.8 - Cartucho para filtros

Íman

De seguida, o produto passa por um íman magnético que retém as micro partículas ferrosas.



Figura 4.9 - Íman magnético

Pasteurização

O pasteurizador (permutador tubular de superfície raspada) é constituído por vários tubos concêntricos no interior de uma carcaça externa. O produto circula no interior dos tubos por intermédio de uma força hidráulica que é exercida e o meio de aquecimento (vapor) circula na parte exterior dos tubos. O produto é pasteurizado à temperatura especificada nos painéis de controlo e sujeito a registo gráfico efectuado por uma sonda disposta no final do pasteurizador.



Figura 4.10 - Pasteurizador tubular

“ *Holding* ”

O “ *Holding* ” mantém o produto a uma determinada temperatura durante um determinado tempo, ou seja, é o binómio tempo temperatura.

O produto completa o tempo de pasteurização numa tubagem composto por duas secções de tubo isoladas e por um isolamento denominado “*Coquilha Rockwool*” para evitar perdas de energia. É nesta etapa que o produto vai cumprir a relação tempo/temperatura, em que o tempo de permanência do produto nas tubagens vai ser modelado pela densidade do produto e velocidade da bomba.

A temperatura e o tempo de permanência mínimo são estabelecidos através do tempo de morte térmica, tendo em conta a termo-sensibilidade do produto, de modo a preservar as características nutricionais e organolépticas. A pasteurização vai também influenciar a textura do produto dado que algumas matérias-primas como espessantes adquirem as características desejadas com o aquecimento.

No final do “ *holding* ” é efectuado o registo de temperatura de segurança através de duas sondas, caso a temperatura seja inferior ao “ *Set Point* ” especificado, o produto não é embalado e é desviado por uma válvula para circuito o curto. No circuito curto o produto passa para um permutador tubular, constituído por vários tubos, onde circula o produto, envoltos numa câmara com circulação de água arrefecida, com o objectivo de evitar o escurecimento do produto e evitar possíveis queimaduras dos colaboradores. Esse produto retorna ao tanque de mistura para ser novamente processado.

Cumprido o binómio tempo/temperatura, se o registo de temperatura de segurança estiver conforme, o produto segue para os arrefecedores.

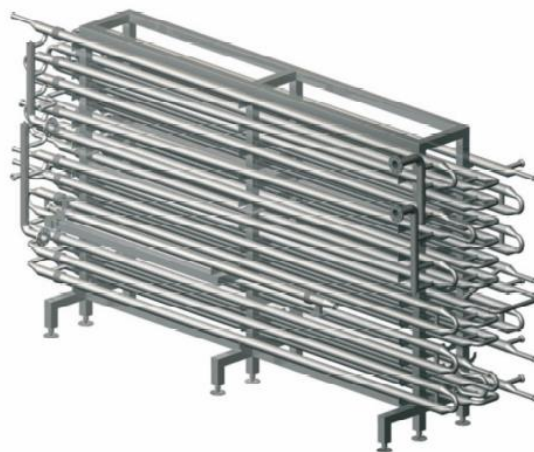


Figura 4.11 - “ *Holding* ”

Arrefecimento

A linha engloba um conjunto de dois arrefecedores fisicamente idênticos ao pasteurizador, com uma sonda situada no final do segundo arrefecedor que regista a temperatura. Na câmara exterior do arrefecedor circula água fria com uma temperatura entre 7 e 10°C, com intuito de arrefecer o produto à temperatura de embalagem (30 a 40°C).

Após o arrefecimento do produto este passa por um refractómetro e por um detector de metais.

Detector de metais

O detector de metais é apropriado para a inspecção de líquidos, polpas ou preparados com pedaços. O tubo onde é feita a detecção tem um comprimento cingido ao mínimo possível para não formar incrustações. O detector de metais permite em caso de detecção de partículas ferrosas com um mínimo de 1,0 mm, partículas não ferrosas 1,2 mm e partículas de inox 2,0 mm, rejeitar o produto para um contentor específico.



Figura 4.12 - Detector de metais

Esterilização do tubo de enchimento

A esterilização do tubo de enchimento é executada antes do embalamento de cada contentor por uma tubagem onde circula vapor a uma temperatura 121°C, durante 10 min.

Filtragem IV

A última filtragem consiste na colocação de um filtro dentro do tubo de enchimento, de acordo com o especificado nos painéis de controlo.

Embalamento Asséptico e recolha de amostra

Na etapa de embalamento existem três postos de embalamento para contentores, providos cada um com uma balança que é pré-definida para o peso desejado e um sensor de pressão que ajusta a pressão durante o enchimento, sujeito a registo gráfico. A linha possui também um terminal, que permite embalar bidões com sacos assépticos através de uma boca na parte superior.

Durante o embalamento é retirada uma amostra para análises microbiológicas de cada tanque de mistura e uma amostra para análises físico-químicas de cada contentor de produto acabado. Nas análises microbiológicas utiliza-se o meio PCA (*Plate Count Agar*) para pesquisa flora total, o meio YGC (*Yeast extract Glucose Chloramphenicol agar*) na pesquisa de leveduras e bolores e o meio Caldo Brilla para pesquisa de coliformes. Nas análises físico-químicas verifica-se Brix (teor de açúcar), pH, quantificam-se os retidos (pedaços de fruta) nos peneiros especificados e nas 24 horas posteriores efectua-se a medição da viscosidade (produto mais ou menos espesso) de embalamento.

No final de cada produção são realizadas as análises organolépticas (cor, aroma e textura) de cada produto e são comparadas com o padrão da última produção.

Os preparados com finalidade para indústria dos lacticínios são aplicados a uma determinada dosagem no tipo de iogurte especificado.

No fim do embalamento o restante produto que não foi embalado nos contentores vai ser arrastado por uma solução de água e desviado pela válvula de desvio para o circuito curto. No fim de linha vai retirar-se o reprocessável para recipientes adequados (barricas, contentores e baldes plástico), para ser utilizado como matéria-prima na próxima produção e armazenados nas câmaras das matérias-primas (congelação ou refrigeração).

Armazenamento do Produto Acabado

Os contentores de produto acabado são armazenados na câmara de refrigeração do produto acabado, a temperatura controlada na ordem dos 5°C para depois serem expedidos.

Expedição

Na zona de expedição a logística é responsável pela pesagem dos contentores, identificação dos contentores com rótulo final e expedição. O controlo de qualidade é responsável por controlar a pressão dos contentores e validar a conformidade da embalagem de produto acabado. A zona de expedição tem uma temperatura controlada na ordem 13°C.

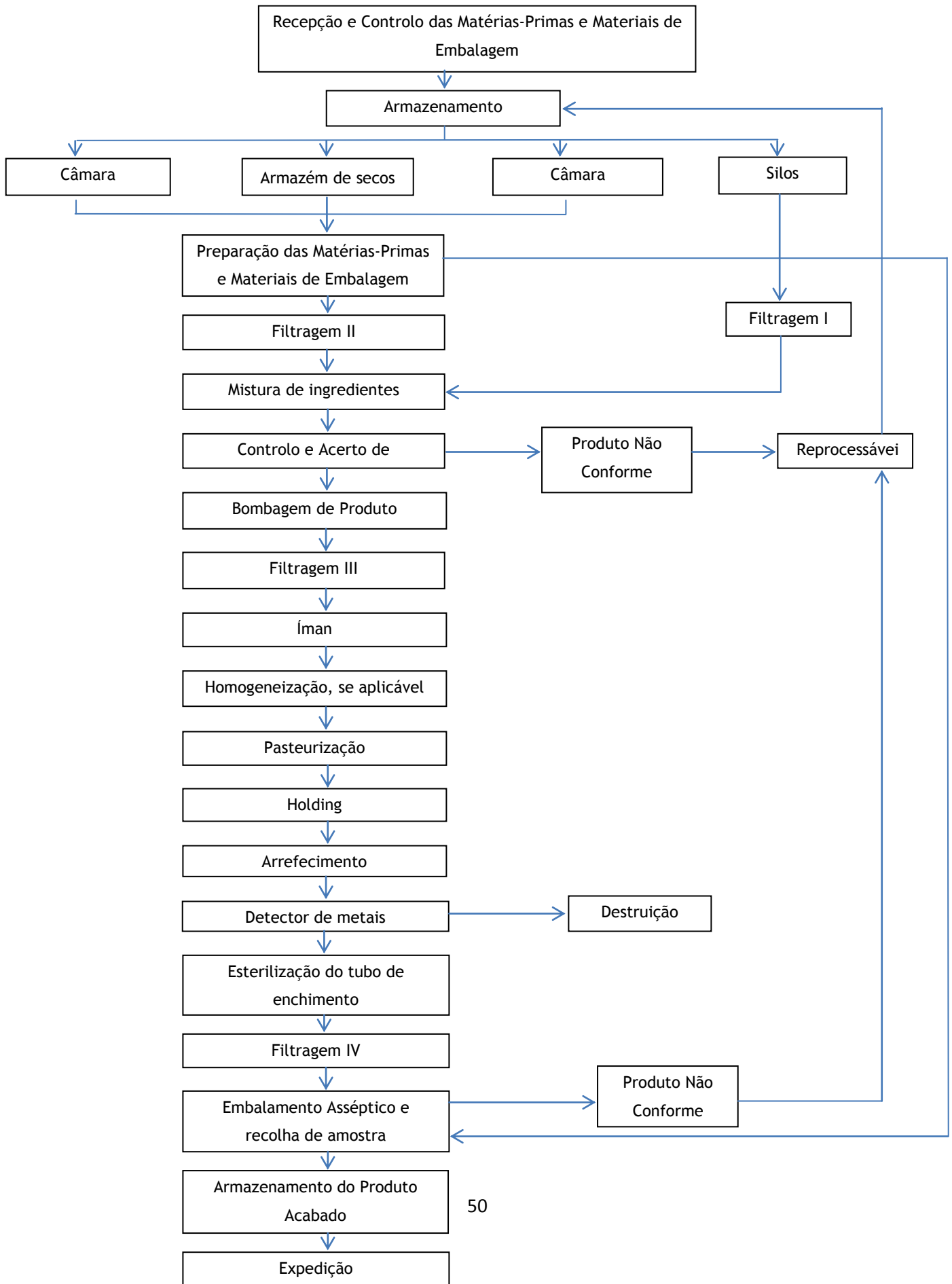


Figura 4.13 - Fluxograma do processo produtivo em linha contínua

4.3.2. Etapas do processo produtiva em linha descontínua (*Batch*)

Algumas das operações unitárias e/ou processos que decorrem na linha descontínua são idênticos ao da linha contínua. Apenas se irão identificar os semelhantes e descrever os que diferem da linha contínua.

Recepção e controlo das matérias-primas e materiais de embalagem

Armazenamento

Preparação das Matérias-Primas e Materiais de Embalagem

Primeira e Segunda Filtragem

Mistura de Ingredientes

Aspiração Produto

No final da mistura dos ingredientes o operador puxa o produto que se encontra no tanque de mistura para a marmitta por vácuo.

Terceira Filtragem

Íman

Controlo e Acerto de Parâmetros

Pasteurização

Dentro da marmita o produto vai ser pasteurizado à temperatura especificada, registo efectuado por duas sondas situadas em cada canto da marmita. A marmita possui uma camisa em toda volta onde circula o vapor e faz aquecer o produto à temperatura desejada. De seguida o produto efectua o tempo de pasteurização dentro da marmita.

Nas linhas descontínuas como o produto é pasteurizado e o tempo de pasteurização é feito dentro da marmita, não existem grandes perdas de calor não havendo necessidade de pasteurizar a temperaturas tão altas como nas linhas contínuas.

Arrefecimento

Cumprido o binómio tempo/temperatura do produto, circula água fria (7 a 10°C) pela mesma camisa onde passou o vapor, arrefecendo o produto até à temperatura de embalagem (30 a 40°C).

Esterilização de Enchimento

Durante o arrefecimento o operador esteriliza a linha de enchimento cada vez que muda a referência do produto a uma temperatura 121°C durante 10 minutos.

Bombagem

Na etapa seguinte o produto vai ser bombeado da marmita para a zona de enchimento por uma bomba de lóbulos, depois da esterilização de enchimento estar concluída. A bombagem é realizada mediante dois rotores cada um com dois lóbulos que giram entre si sem se tocarem, movimentadas por um conjunto de engrenagem situadas num compartimento independente criando sucessivas câmaras que produzem aspiração e movimentação do produto sem o danificar, que pode funcionar em duplo sentido. Este tipo de bomba é caracterizada pela suavidade com que transporta os produtos e usada para bombear qualquer tipo de produto de variada viscosidade.

Detector de metais

Esterilização do tubo de enchimento

Filtragem IV

Embalamento Asséptico e recolha de amostra

Armazenamento do Produto Acabado

Expedição

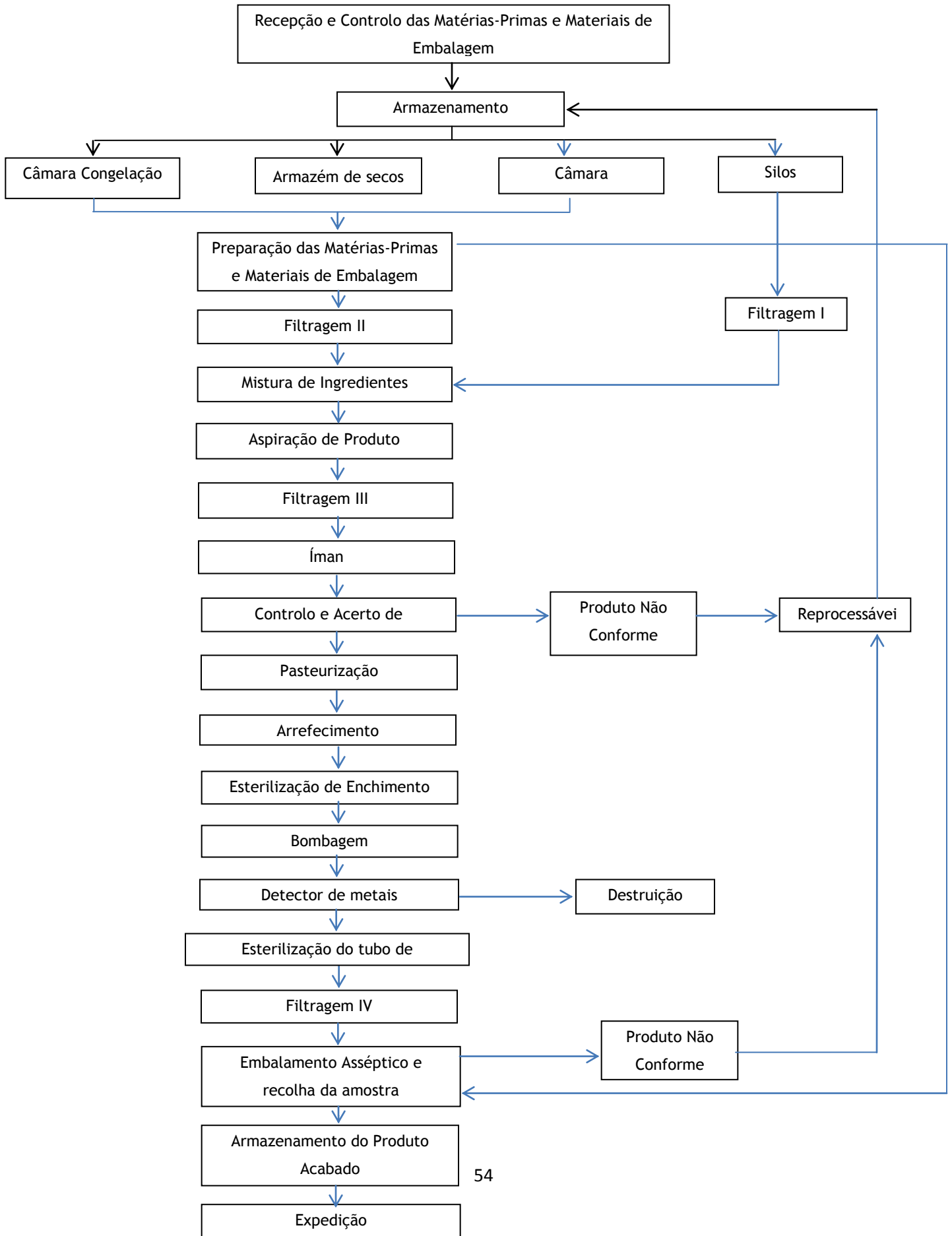


Figura 4.14 - Fluxograma do processo produtivo em linha descontínua

4.4. Planeamento na indústria em estudo

A análise efectuada ao processo produtivo, permite concluir que a metodologia de planeamento apresenta as seguintes características:

- o fluxo entre secções/processos é típico da produção contínua, onde prevalece a produção por lotes. Em cada secção/processo podemos encontrar ambientes difíceis de enquadrar numa classificação específica, sendo o mais frequente um misto de ambiente contínuo com etapas de máquinas paralelas;
- o trabalho é feito essencialmente por encomenda, havendo apenas algumas fases do processo produtivo em que se trabalha para armazém como forma de reduzir os tempos de resposta;
- cada secção é fornecedora ou cliente da secção que a sucede ou precede, respectivamente, nesta perspectiva, o planeamento e o controlo da produção são altamente complexos;
- a produção é caracterizada por algumas alterações ao planeamento devido às urgências colocadas pelos clientes; as promoções e flutuações de mercado ao nível das grandes superfícies comerciais provocam este tipo de alterações nas encomendas dos clientes;
- é evidente um decréscimo na dimensão das encomendas, com um impacto visível na dimensão dos lotes;
- o problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes coloca-se em todas as secções das empresas;

Na empresa analisada e em consonância com a literatura, são identificáveis três níveis de planeamento:

- o primeiro, da responsabilidade das administrações, inclui decisões tipicamente estratégicas;
- o segundo, normalmente designado central, da responsabilidade dos quadros superiores da empresa, inclui decisões táticas, nomeadamente a definição das necessidades de materiais e a gestão de capacidades. Por vezes, a este nível de planeamento e em relação a algumas das secções da empresa, também se tomam decisões quanto à dimensão e sequenciamento dos lotes de produção, acções que normalmente são domínio do planeamento operacional;

- o terceiro nível de planeamento coloca-se essencialmente ao nível do sequenciamento. Assenta nalgumas regras heurísticas simples e ocorre nalgumas das secções, sendo da responsabilidade dos responsáveis da secção. Neste nível, o planeamento pode incluir ainda algumas decisões relacionadas com a distribuição das ordens de produção emitidas pelo planeamento central, pelos diversos equipamentos.

O problema do sequenciamento da produção não pode ser analisado de forma integrada para todas as secções das empresas. Tal problema resultaria de enorme complexidade e impossível de resolver.

Este trabalho vai incidir sobre o problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção na secção das linhas de produção.

4.4.1. Planeamento estratégico

O planeamento estratégico, tal como descrito na literatura, consegue-se identificar neste tipo de indústria de produção de preparados de fruta. As directivas estratégicas da empresa reflectem-se no plano director de produção.

Na indústria em estudo, a cada ano fiscal são analisadas as previsões de venda para o próximo ano, mediante estas previsões e com base nos objectivos atingidos no ano anterior, são atribuídos indicadores em todas as áreas.

Para cada indicador são definidas metas. As metas são obtidas através de uma avaliação do histórico de desempenho, pelo *benchmarking* ou por referências teóricas (6 *sigmas*, defeitos zero). As metas tornam-se então factores de comparação para gestores e colaboradores para saber se estão a desempenhar um bom trabalho e o seu significado. Neste sentido as metas são a busca de melhores práticas de desempenho operacional.

De uma forma global, abrangendo todos os departamentos das fábricas, é definido um indicador chamado de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) é a medida de performance do TPM (*Total Productive Maintenance*). É uma métrica muito utilizada na monitorização e melhoria da eficiência dos processos de uma organização, envolvendo equipamento, células de trabalho e linhas produtivas. De modo a melhor compreensão do desempenho de uma área de produção e as limitações a maior eficiência, o OEE inclui todos os aspectos de eficiência, rendimento e qualidade num só índice.

Através da multiplicação de três factores, Disponibilidade, Performance (rendimento) e Qualidade, consegue-se expor de forma objectiva a actividade produtiva. A disponibilidade é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{(\text{Tempo disponível} - \text{paragens não programadas})}{\text{Tempo disponível}}$$

Analisa as perdas associadas a *setups*, avarias, mudanças de serie e etc. De salientar que o tempo disponível já deve considerar os tempos de paragens programadas, i.e., apenas deverá levar em conta o tempo em que a máquina realmente deveria está a operar. A performance é calculada através das capacidades do equipamento (também poderá ser calculada através das tempos de ciclo real e teórica):

$$\text{Performance} = \frac{\text{Capacidade real}}{\text{Capacidade teórica}}$$

Avalia, assim, as perdas associadas a perdas de velocidade e micro paragens, traduz as quebras de velocidade da qual ela foi projectada. O terceiro índice é a qualidade:

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Quantidade produzida} - \text{Rejaitada} - \text{Retrabalhada}}{\text{Quantidade produzida}}$$

Conclui-se a avaliação da eficiência global do equipamento, através da análise correcta de acordo com as especificações do produto.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

A supervisão da produção na unidade fabril em estudo acontece com o apoio de 3 plataformas em Excel intituladas: produtividade, OEE e *reporting* semanal. Estas plataformas funcionam numa espécie de ciclo (Figura 4.14), visto que o *output* de umas serve de *input* para outras, sendo que o *reporting* aplica já uma decisão para melhoria da produtividade, ainda que apoiada por alguns dados do sistema de informático. O controlo de tempos é efectuado a partir da mistura de ingredientes até ao fim da etapa de embalamento.



Figura 4.15 - Fluxo de informação através das plataformas

Em resumo, se entendermos o planeamento estratégico, como um plano que define o tipo de produção a efectuar com base nas previsões de vendas e decisões estratégicas de negócio, ele de facto existe neste tipo de indústria.

4.4.2. Planeamento Central

As responsabilidades atribuídas ao planeamento central são:

- colocação da encomenda em sistema com atribuição de prazos de entrega
- gestão de necessidades;
- dimensionamento e emissão de ordens de fabrico.
- confirmação da encomenda;

Colocação da encomenda com atribuição de prazos de entrega

A colocação da encomenda com atribuição de um prazo de entrega é o primeiro passo no sentido da optimização do processo produtivo, uma vez que esta atribuição é feita com base em determinados factores, entre os quais se podem referir:

1. O departamento comercial ao receber uma encomenda do cliente, com uma ou mais referências, coloca a encomenda em sistema e atribui a data de entrega pedida pelo cliente para cada referência. Esta data de entrega, para que a encomenda seja considerada uma encomenda normal, desde a recepção do pedido do cliente até á entrega do produto no cliente, terá de ter uma média de 21 dias. Estes dias contemplam;

a recepção e colocação da encomenda em sistema, o aprovisionamento de matérias-primas, tempo de produção, tempo de análise e libertação do produto e tempo de transporte. Aos dias de hoje, não se consegue ter este tempo de encomenda, a maior parte das encomendas ronda os 15 dias, será este o horizonte de planeamento usado para este trabalho, abaixo deste valor passa a ser considerar uma encomenda urgente, o que quer dizer que a data de entrega pedida pelo cliente está pendente da confirmação por parte do responsável de planeamento, quanto á disponibilidade de produção; por parte do departamento logístico, quanto á disponibilidade de transporte e por fim dependendo da data de produção, pode ser necessário a autorização do cliente para expedição do produto sem análises completas (físico-químicas e microbiológicas) por parte do departamento de controlo de qualidade;

2. Quando colocada a encomenda em sistema o departamento logístico atribui uma data de expedição, tendo em conta o tempo de transporte e entregas já calendarizadas para o mesmo cliente (permite otimizar a expedição, reduzindo custos de transporte);
3. Alteração de previsões, ou seja, o departamento comercial tem de ter em conta se o pedido do cliente está dentro das previsões de venda para o ano corrente, visto o aprovisionamento de matérias-primas ser feito com base nestas previsões. Se o pedido do cliente for superior às previsões, o prazo de entrega está dependente da disponibilidade e aprovisionamento de matérias-primas;

Gestão de necessidades

A agregação de todas as necessidades geradas pelas encomendas e adiantamentos de produção, obtidas a partir do sistema de planeamento de necessidades de materiais, constituem as necessidades reais de produção, para um determinado período de tempo.

A informatização torna a aplicação da metodologia de planeamento de necessidades de materiais muito mais expedita e evita erros decorrentes da intervenção humana.

O programa de planeamento na empresa em estudo está interligado ao programa de gestão de *stocks*. A compra de materiais é feita através das previsões comerciais das referências de cada cliente.

Dimensionamento e emissão de ordens de fabrico

O planeamento central, com base nas encomendas colocadas e nos prazos de entrega, emite ordens de fabrico, o planeamento procura respeitar, a quantidade exacta necessária para satisfazer as encomendas, respeitar o sistema de FIFO e garantir a expedição do produto para o

cliente com os boletins de análise completos (5 dias análise normal e 7 dias para análise com pré-enriquecimento, após a produção), o produto só é expedido sem boletins completos com autorização do cliente. A quantidade a produzir tem sempre de ser acrescida de um coeficiente de segurança para compensar as quebras durante o fabrico.

Quanto à definição das ordens de fabrico, têm de ser tidos em consideração factores como:

1. análise de stock PA;
2. verificação da data de expedição;
3. selecção da referência, linha e dia de produção;
4. selecção da quantidade a produzir;
5. verificação da disponibilidade de materiais;
6. criação e reserva da ordem de fabrico na encomenda;

Face ao exposto, pode-se inferir que a questão do dimensionamento resulta não só das necessidades geradas por uma metodologia de desagregação assente na filosofia do planeamento de necessidades de materiais, mas também de um conjunto de heurísticas deduzidas a partir do próprio processo produtivo.

O problema do dimensionamento de lotes neste tipo de industria assenta no pressuposto de que, quanto maior for o lote maior será a eficiência da empresa. As razões para este pressuposto são as seguintes:

- existem tempos de preparação associados à mudança de lote (*setups*), quanto maiores forem os lotes, menor será o número paragens para preparação e maior será a eficiência das linhas de produção;
- como as necessidades de matérias primas, são geradas a partir da programação da produção, quanto maiores forem os lotes, maior será a optimização nas secções a montante, sala de frutas e sala de micro pesagens.

Confirmação da encomenda

Quando o cliente efectua a encomenda, significa que aceita as condições de entrega propostas. As necessidades de produção afectas à consulta passam assim a estar associadas à encomenda.

À ligação estabelecida entre a encomenda e a necessidade ou ordem de produção chama-se afectação. Esta afectação permite a rastreabilidade do processo produtivo, pois a qualquer

momento se pode verificar o estado de produção de uma encomenda, através do sistema de afectações. O departamento comercial só terá a confirmação da produção da encomenda quando é feita a reserva da ordem de fabrico na encomenda em causa.

O planeamento na empresa em estudo é feito a 5 dias, assim consegue-se ter uma visão do plano de produção a 5 dias, o que faz com que se consiga organizar a produção e a gestão de necessidades com alguma antecedência. Devido ao crescente número de encomendas urgentes que se verifica neste tipo de indústria este plano pode sofrer alterações e torna-se por vezes instável.

Do que foi exposto, pode-se concluir que ao planeamento central estão atribuídas tarefas que se inserem não só na esfera do planeamento tático mas também do planeamento operacional.

4.4.3. Sequenciamento de ordens de fabrico

Sendo este tipo de empresa em estudo do ramo alimentar, o planeamento da produção obedece a regras rígidas de sequenciamento que vão de encontro com as normas de certificação de qualidade e segurança alimentar.

Nas secções a montante das linhas de produção, a sala das frutas e a sala de micro pesagens, o sequenciamento de preparação das matérias-primas está a cargo dos responsáveis da secção, tendo sempre em conta a ordem de produção das linhas e o tempo a que essas matérias-primas têm de estar disponíveis para entrarem nas linhas de produção.

Nas linhas de produção o sequenciamento está a cargo do responsável de planeamento que tem como base as seguintes regras:

Quanto á tipologia de fruta

- preferencialmente planear um tipo de fruto por linha. Caso não seja possível, planear os frutos tendo em conta a cor, dos mais claros para os frutos mais escuros;
- a ordem de produção deve respeitar o calibre dos frutos, do mais pequeno para o maior.

Produtos alergénicos

- preferencialmente planear uma linha só com produtos alergénicos. Caso não seja possível, os produtos alergénicos devem ser planeados no final da produção, ou após o fabrico dos mesmos deve se efectuar uma lavagem completa da linha;
- no planeamento dos produtos alergénicos deve-se ter em conta o alergénico em causa, de forma a evitar a contaminação cruzada entre alergénicos. Caso seja necessário o fabrico de dois tipos de alergénicos diferentes, no mesmo dia de produção, estes devem ser efectuados em linhas diferentes. Se tal não for possível, é necessário efectuar uma lavagem completa entre as produções;
- no caso de alergéneos devido à presença de leite e produtos à base de leite (incluindo a lactose), estes podem ser efectuados em todo o momento de produção, desde que todos os produtos subsequentes sejam para incorporar em lacticínios, caso contrário é necessário efectuar lavagem.

Produtos sem conservantes

- os produtos sem conservante podem se planeados em qualquer momento da produção;
- a contaminação cruzada entre produtos com conservantes e sem conservantes é evitada por uma enxaguamento intermédio com água entre as diferentes referências.

Produtos dietéticos

- os produtos dietéticos podem ser planeados em qualquer momento da produção;
- a contaminação cruzada entre produtos açucarados e dietéticos, é evitada por uma enxaguamento intermédio com água entre as diferentes referências.

Produtos biológicos

- os produtos biológicos devem ser realizados no início da produção após lavagem e esterilização da linha;

As linhas de produção contínuas têm um ciclo máximo de 48h, após este tempo as linhas têm de lavar e esterilizar, o que provoca uma paragem programada de 3h, as linhas descontínuas não têm este tipo de limitação.

Capítulo 5

O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIALMENTE DE LOTES NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PREPARADOS DE FRUTA

5. Introdução

De acordo com a teoria dos constrangimentos e pelo que ficou dito no capítulo 4, as linhas de produção constituem o factor mais importante do processo produtivo no que respeita ao fluxo de produção na indústria de fabrico de preparados de fruta, pelo que no âmbito deste trabalho decidiu-se pelo estudo do problema de dimensionamento e sequenciamento da produção nesta secção de fabrico.

Neste capítulo ir-se-á descrever e caracterizar o problema em análise, tomando por base o processo de produção.

Serão analisados todos os aspectos do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção que se consideram relevantes para a sua formulação e para a construção de uma proposta de resolução.

5.1. Descrição do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no processo de produção de preparados de fruta

O trabalho desenvolvido foi baseado no estudo de um problema real de programação da produção em linhas de produção de preparados de fruta. O trabalho de análise efectuado permitiu identificar um conjunto de características relacionadas com o problema em análise, que se descrevem nesta secção.

Como foi referido no capítulo 4, a produção de preparados de fruta é um processo físico cujo objectivo é a obtenção de um preparado de fruta através da mistura de vários ingredientes. Uma vez que da descrição do fluxo produtivo do processo, apresentado no capítulo anterior, se pode verificar que o fluxo de produção é contínuo (no sentido em que uma vez iniciado o processo este somente termina após a produção de uma lote) e somente a operação de mistura dos ingredientes é verdadeiramente uma operação de processamento (uma vez que todas as outras operações no processo são de preparação), podemos enquadrar o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção no processo de produção de preparados de fruta num problema de nível único, pois os ingredientes depois de processados numa máquina originam um produto.

A secção da produção da empresa em análise é constituída por um parque de máquinas com 5 linhas de produção com as características apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Caracterização das linhas de produção em função da capacidade e velocidade

Tipo de máquina	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Número de linhas	3	1	1
Velocidade máxima de processamento (Kg/h)	2100	1000	100
Capacidade máxima dos tanques de mistura (Kg)	2000	2000	300

Nesta tabela as linhas de produção foram agrupadas em função de duas características fundamentais do processo de produção: (i) velocidade de processamento e (ii) capacidade máxima dos tanques de mistura.

As máquinas do Grupo 1 são paralelas idênticas entre si e os três grupos de máquinas entre si são paralelas não idênticas.

Com base nestas características do parque de máquinas, constata-se que o problema em análise é um problema de máquinas paralelas não uniformes.

Para a descrição do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção tem de se ter presente os seguintes factores apresentados nas secções seguintes.

5.1.1. Tempos de produção são conhecidos

Os tempos de produção no processo são conhecidos nos três grupos de máquinas existentes.

- Grupo 1 tem um tempo de produção de 2100Kg/h
- Grupo 2 tem um tempo de produção de 2000Kg/h
- Grupo 3 tem um tempo de produção de 100Kg/h

Com base nos tempos de produção conhecidos (x, y e z) podemos construir uma matriz.

Tabela 5.2 - Tempos de produção conhecidos

Máquinas	Produto										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Pn
G1	x										x
G2	y										y
G3	z										z

Com base nesta matriz conclui-se que qualquer que seja a sequência o tempo de produção é conhecido.

5.1.2. Tipos de setup conhecidos

Os tipos de setup existentes no processo são conhecidos:

- **Lavagem e Esterilização**

É o *setup* máximo do processo, com um tempo estimado de 3 horas; é usado em situações de produção de produtos alergênicos, produtos biológicos, produtos incompatíveis com as produções seguintes e no fim de 48 horas as linhas de produção contínuas têm obrigatoriamente de efectuar este *setup*.

- **Produto idêntico**

É o *setup* mínimo do processo, com um tempo estimado de 5 minutos; é usado quando as referências são as mesmas, isto é, existem referências que são iguais e tem apenas a diferenciá-las o tipo de embalagem ou a presença de conservantes.

- **Produto compatível**

Tem a duração de 5 minutos e é usado quando as referências em produção são muito idênticas entre si (matérias primas comuns).

- **Solução de água**

Tem a duração de 45 minutos e é o *setup* mais usado nas linhas de produção, aplica-se sempre que haja a mudança para uma referência diferente da que está em produção.

- **Limpeza**

Tem a duração de 1 hora, é usado para situações de produtos que contenham uma matéria-prima mais crítica em que o *setup* anterior não é eficaz e seja necessário uma melhor limpeza da linha de produção.

Com base nos tipos de *setup* conhecidos podem os obter uma matriz.

Tabela 5.3 - Tipos de setup conhecidos

Produto	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Pn
P1	0										
P2		0									
P3			0								
P4				0							
P5					0						
P6						0					
P7							0				
P8								0			
P9									0		
P10										0	
Pn											0

Não se trata de ma matriz triangular porque P1 seguido de P2 não é igual a P2 seguido de P1.

Através da matriz podemos associar qualquer sequência ao tempo de *setup*.

5.1.3. Tempos de atraso conhecidos

A produção está desagregada em lotes e a cada lote corresponde um prazo de entrega. Em função da dimensão da encomenda a produção é desagregada em lotes que podem ir de 2000 kg o lote máximo até 150 kg de lote mínimo, ou seja, quando se procede á alocação da produção do horizonte de planeamento às máquinas, os lotes de produção já estão definidos. Associado a cada lote de produção existe um prazo de entrega conhecido.

Da análise efectuada ao problema e das características da indústria de produção de preparados de fruta conclui-se que, um factor de competitividade para o sector é o cumprimento dos prazos de entrega pelo que esta característica deve ser incluída na formulação do problema.

Verifica-se ainda e para além das características já apresentadas, que existem ainda um conjunto de pressupostos que, em termos da formulação do problema são bastante importantes, nomeadamente:

- uma máquina só pode produzir um lote de cada vez;
- um lote só pode ser processado numa máquina;
- um lote depois de iniciado numa máquina não pode ser interrompido.

O estudo deste caso permitiu identificar as características a incorporar na definição de um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção para o processo de produção de preparados de fruta na indústria alimentar.

O problema em estudo é um problema de sequenciamento em máquinas paralelas não uniformes com tempos de preparação dependentes da sequência e que contém um conjunto de restrições que incluem a capacidade das máquinas, a existência de precedências na execução das encomendas, a dimensão dos lotes e as datas de entrega de cada tarefa.

5.2. Função objectivo

O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em estudo tem por objectivo a minimização, para um dado horizonte de planeamento, dos tempos de preparação e processamento de um conjunto de encomendas com datas de entrega definidas e dos atrasos incorridos na entrega dessas encomendas. O problema ocorre num ambiente em que os equipamentos para a produção dessa encomendas se relacionam entre si como máquinas paralelas não uniformes e em que os tempos de preparação são dependentes da sequência das ordens de fabrico geradas pelas encomendas.

Desta forma a função objectivo será o somatório dos tempos de produção, mais os tempos de *setup*, mais os tempos de atraso. O objectivo será minimizar este somatório.

$$\sum \text{tempo.de.produção} + \sum \text{tempo.de.setup} + \sum \text{tempo.de.atraso} \quad (1)$$

O problema sugere as seguintes restrições:

(2) restrição que garante que só pode ocorrer uma preparação inicial em cada máquina pertencente ao grupo,

(3) restrição que garante que o tempo de conclusão de cada lote é igual ao somatório dos tempos de preparação e de produção que o antecedem, mais o tempo de produção do próprio lote,

(4) restrição que garante se a preparação de um lote ocorre numa máquina de um grupo, então é precedido de outro lote ou está na posição inicial e é processado nessa máquina,

(5) restrição que garante que a máquina só processa um lote de cada vez,

(6) restrição que garante que o processamento de um lote depois de iniciado não pode ser interrompido,

(7) restrição que garante que o atarso é dado pela diferença entre a data de conclusão e a data de entrega,

(8) restrição que garante que a peça só é produzida uma vez e numa máquina compatível,

(9) restrição que garante que todos os lotes são produzidos, ou seja, todos os lotes são atribuídos às máquinas.

Capítulo 6

***HEURÍSTICA PARA A RESOLUÇÃO DO
PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO E
DIMENSIONAMENTO DE LOTES DE
PRODUÇÃO***

6. Introdução

O problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção, proposto neste trabalho, ocorre num ambiente em que os equipamentos de produção representam-se como máquinas paralelas não uniformes e em que os tempos de preparação são dependentes da sequência de processamento das tarefas. Os equipamentos utilizados induzem restrições de capacidade máxima relativamente aos lotes que são processadas. O problema aponta para a minimização, num dado horizonte de planeamento, dos tempos de preparação e processamento de um conjunto de encomendas, constituídas por lotes, com datas de entrega definidas e dos atrasos incorridos na entrega dessas encomendas.

Devido à elevada complexidade do modelo proposto, no capítulo anterior para o problema em análise, este impede a sua resolução por recurso a métodos optimizantes. Com base nesta dificuldade, desenvolveu-se uma heurística que permite encontrar soluções sub-óptimas para o problema, a qual se baseia no algoritmo de recristalização simulada (*simulated annealing*). Heurísticas baseadas neste algoritmo têm sido utilizadas na resolução de diferentes tipos de problemas de optimização combinatoria cuja resolução por recurso a métodos optimizantes não é possível.

6.1. Algoritmo de recristalização simulada

A recristalização simulada é uma técnica de pesquisa local não determinística, que recorre a uma analogia entre a energia mínima no estado de um sistema físico com o custo mínimo num problema de optimização combinatoria (Metropolis *et al.* (1953), Kirkpatrick *et al.* (1983), Radhakrishnan e Ventura (2000) e Wen-Chiunge *et al.* (2006), Fernando Santos (2009)).

No estado líquido um dado material tem uma ordenação atómica aleatória, que se pode considerar caótica. À medida que vai arrefecendo converge para um estado de energia mínima com uma estrutura rigidamente definida e ordenada. Se o arrefecimento é feito rapidamente, na maioria dos materiais, produz-se uma deformação da micro-estrutura que pode originar fissuração. Os diferentes estados por que passa um material durante o processo de arrefecimento controlado correspondem, por analogia, às diferentes soluções possíveis de um problema de optimização, correspondendo a energia do sistema à função que deve ser optimizada.

A recristalização simulada tem sido largamente utilizada nos últimos anos nos mais diversos tipos de problemas.

Antes de se descrever a heurística proposta, começar-se-á por analisar o algoritmo de pesquisa local que está na sua génese.

O algoritmo de pesquisa local parte de uma solução inicial possível. A essa solução inicial corresponde um custo designado por Z_x , a partir da qual é gerada uma solução vizinha cujo custo é designado por Z_y . A diferença entre Z_y e Z_x , é representada por ΔZ_{yx} .

Se o custo decrescer, ou seja, se $\Delta Z_{yx} = Z_y - Z_x < 0$, a solução vizinha, correspondente a Z_y é aceite. Caso contrário mantém-se a solução Z_x . Este procedimento vai sendo repetido até que deixem de surgir novas melhorias, o que significa que um mínimo local foi atingido.

Os algoritmos de pesquisa local apresentam a vantagem de serem de fácil aplicação, mas, convergem para um único mínimo local, o que pode originar desvios significativos em relação à solução óptima.

Para melhorar o desempenho deste tipo de algoritmo é processá-lo a partir de diversas soluções iniciais com o objectivo de seleccionar o melhor mínimo local alcançado.

Em alternativa ao algoritmo de pesquisa local aparece o algoritmo de recristalização simulada em que é possível a aceitação de uma solução, com uma determinada probabilidade, em que $\Delta Z_{yx} = Z_y - Z_x > 0$.

No algoritmo de recristalização simulada a probabilidade de aceitação de uma solução é determinada pela função de aceitação, que é dada pela expressão $\exp(-\Delta Z_{yx}/T)$, onde T é o parâmetro de controlo que, por analogia, corresponde à temperatura no processo de arrefecimento dos metais (Metropolis *et al.* (1953)).

Um número aleatório é gerado a partir de uma distribuição uniforme (0,1) e comparado com o valor da função de aceitação. Se o valor da função de aceitação for superior ao valor gerado aleatoriamente, a pior solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Esta função origina que pequenos acréscimos no valor da função de aceitação têm menor probabilidade de ser aceites uma vez que quanto maior for ΔZ_{yx} menor será o valor da função de aceitação, $\exp(-\Delta Z_{yx}/T)$. Da mesma forma, quanto maior for o valor da temperatura maior será a probabilidade de um acréscimo da função de aceitação ser aceite. À medida que a temperatura vai baixando, diminuem as probabilidades de aceitação de uma solução pior.

O pseudo-código desenvolvido por Madhavan (1993) para o algoritmo de recristalização simulada, é apresentado na figura 6.1. Neste pseudo-código R, T₀, T_u e T_f são parâmetros do algoritmo e representam, respectivamente, o número de iterações por patamar, a temperatura inicial, a temperatura actual do patamar e a temperatura final. A figura 6.2 representa graficamente os parâmetros do algoritmo.

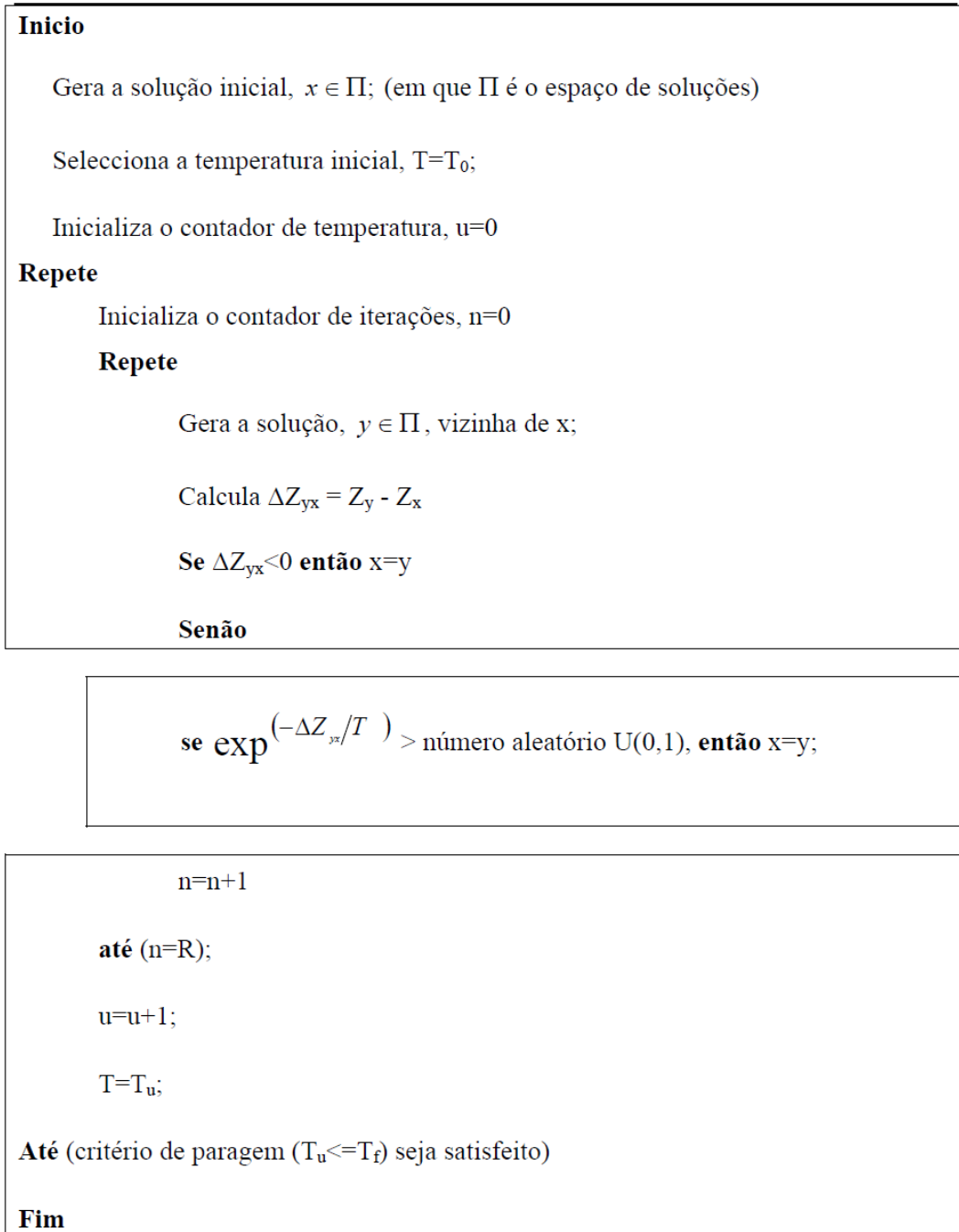


Figura 6.1 - Algoritmo de recristalização simulada

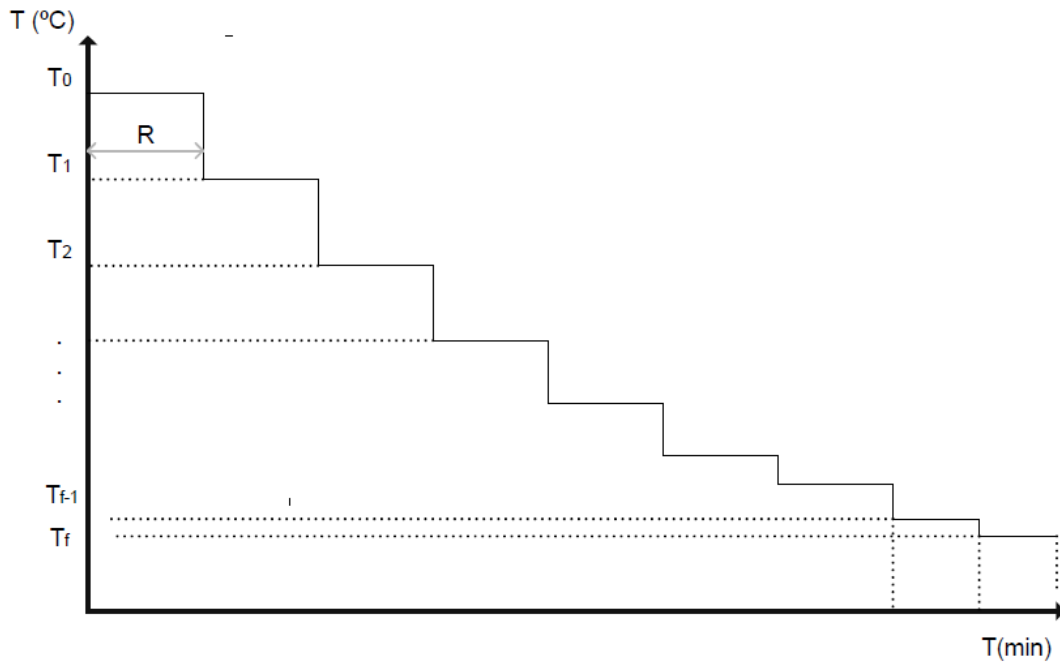


Figura 6.2 - Curva do processo de recristalização

6.2. Metodologia de resolução

Para resolver um problema de otimização através do algoritmo de recristalização simulada têm de se seleccionar os parâmetros do algoritmo e definir a função custo e os processos de geração da solução inicial e das soluções vizinhas.

Os parâmetros do problema incluem:

- os valores iniciais e finais da temperatura, que são parâmetros de controlo, respectivamente T_0 e T_f ;
- a dimensão de cada patamar de temperatura, R , ou seja o número de iterações efectuadas para cada valor de temperatura;
- a taxa de arrefecimento;
- os critérios de paragem.

6.2.1. Determinação da temperatura inicial e final

Um critério possível para determinação da temperatura inicial foi sugerido por Connolly (1990). Este autor propõe a determinação dos valores das temperaturas inicial (T_0) e final (T_f)

a partir das equações 6.1 e 6.2 e são calculados a partir da solução inicial. Com base nesta são geradas, um número significativo de soluções vizinhas, aleatórias. Para cada uma destas soluções é determinado um custo Z .

$$T_0 = \Delta Z_{min} + \frac{\Delta Z_{max} - \Delta Z_{min}}{10} \quad [6.1]$$

$$T_f = \Delta Z_{min} \quad [6.2]$$

Nas equações 6.1 e 6.2 ΔZ_{min} é a menor diferença entre duas soluções consecutivas no conjunto de soluções vizinhas geradas e ΔZ_{max} a maior diferença entre dois valores consecutivos no mesmo conjunto.

Neste trabalho, sugere-se um número fixo (100) de soluções vizinhas a gerar para o cálculo das temperaturas, ou seja, sugere-se que existem 100 soluções vizinhas a partir do qual não existem variações significativas nos valores de Z_{min} e Z_{max} .

6.2.2. Taxa de arrefecimento

A taxa de arrefecimento permite determinar o número de patamares de temperatura a analisar, entre a temperatura inicial T_0 e a final T_f , ou seja todos os valores de temperatura que o algoritmo vai considerar. Para cada valor diferente de T , designado por T_u , é determinado um valor T_{u+1} de acordo com a equação 6.3, proposta por Connolly (1990).

$$T_{u+1} = \frac{T_u}{1 + \beta T_u} \quad [6.3]$$

Na equação 6.3,

$$\beta = \frac{(T_0 + T_f)}{p T_0 T_f} \quad [6.4]$$

e

$$p = \frac{50\delta N(N-1)}{2} \quad [6.5]$$

Na equação 6.5, N é o número de variáveis de decisão e δ é um parâmetro de controlo da taxa de arrefecimento. Quanto menor for o valor de δ maior será a velocidade de arrefecimento e consequentemente menor também será o número de patamares.

O valor N também afecta de forma significativa o número de patamares de temperatura e está associado à dimensão do problema.

6.2.3. Número de interacções por patamar e critério de paragem

O número de iterações no patamar (R) determina o número de soluções geradas para cada nível de temperatura (T). Para este trabalho, como critério de paragem sugere-se a ocorrência de 100 interacções sem que ocorra nenhuma melhoria na temperatura.

O critério de paragem especifica o estado em que se considera o sistema 'recristalizado'. De entre os vários critérios de paragem, podem ser destacados aqueles que se baseiam nas seguintes medidas:

- o número total de soluções candidatas geradas;
- a temperatura mínima que pode ser atingida;
- o valor mínimo da razão entre o número de soluções aceites e o número de soluções geradas.

6.3. Heurística para gerar a solução inicial

A utilização do algoritmo de recristalização simulada envolve a determinação de uma solução inicial para o problema. Esta solução inicial pode, por exemplo, ser gerada por um processo aleatório que respeite as restrições do problema.

A geração de uma solução inicial de forma aleatória não necessita de nenhum conhecimento prévio da estrutura do problema, mas esta abordagem pode conduzir a uma solução inicial de qualidade reduzida, que pode conduzir a elevados tempos de processamento. Pelo contrário, uma heurística específica, mais direccionada, pode restringir a pesquisa a uma zona limitada do espaço de soluções.

Neste caso em análise, sugere-se uma heurística mista em que se são respeitadas as restrições do problema, ou seja, a dimensão do problema, ou seja, o número de lotes.

Os lotes pertencentes ao horizonte de planeamento são ordenados por data de entrega. O lote com data de entrega mais curta é atribuído à máquina compatível com maior disponibilidade. O processo repete-se até todos os lotes serem atribuídos às máquinas. Se tiverem a mesma data de entrega os lotes são atribuídos aleatoriamente.

6.4. Heurística para determinar as soluções vizinhas

Após a determinação da solução inicial e de acordo com a metodologia seguida na aplicação do algoritmo de recristalização simulada é necessário definir a heurística para a determinação das soluções vizinhas (Santos (2009)).

Neste caso as soluções vizinhas são obtidas, de uma solução antecedente, através de transferências e trocas aleatórias de lotes:

- Transferência de lote - o lote muda de posição dentro da fila de espera do grupo em que se encontra sequenciado (designada por “a” no exemplo que se apresenta na figura 6.3). O lote identificado na parte superior da figura 6.3 como 3a é transferido para o primeiro lugar da fila “a”, resultando a fila que se apresenta na parte inferior da figura 6.3. Em alternativa o lote pode ser transferido para outra fila qualquer, desde que pertencente a um grupo compatível, conforme se apresenta na figura 6.4. Neste caso o lote 2a pertencente à fila “a” é transferido para a fila de espera “b” que pode pertencer ao mesmo grupo ou a outro grupo compatível e colocado após o lote 3b. O resultado é a formação de duas novas filas resultantes da transferência, apresentadas na parte inferior da figura 6.4 (Santos (2009)).

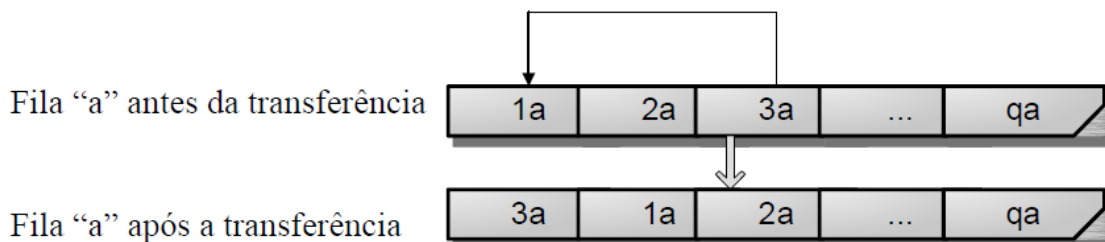


Figura 6.3 - Transferência de lote dentro da fila de espera da máquina (Santos (2009)).

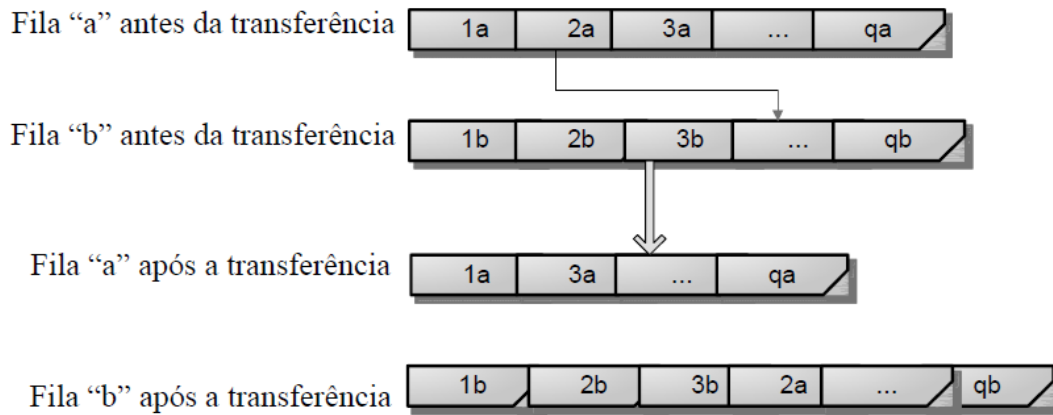


Figura 6.4 - Transferência de lote entre filas de espera de máquinas (Santos (2009)).

- Troca de lote - o lote troca de posição com outro lote dentro da fila de espera do grupo em que se encontra sequenciado (designada por "a" no exemplo que se apresenta na figura 6.5). O lote 3a troca de posição com o lote 1a dentro da fila de espera "a", dando origem à fila que aparece na parte inferior da figura 6.4. Em alternativa o lote pode ser trocado com um lote de outra fila qualquer desde que pertencente a um grupo compatível, conforme se apresenta no exemplo ilustrado na figura 6.6. O lote 2a da fila "a" troca de posição com o lote 3b pertencente à fila de espera "b" do mesmo grupo ou de outro compatível, dando origem às novas filas "a" e "b" que se apresentam na parte inferior da figura 6.6 (Santos (2009)).

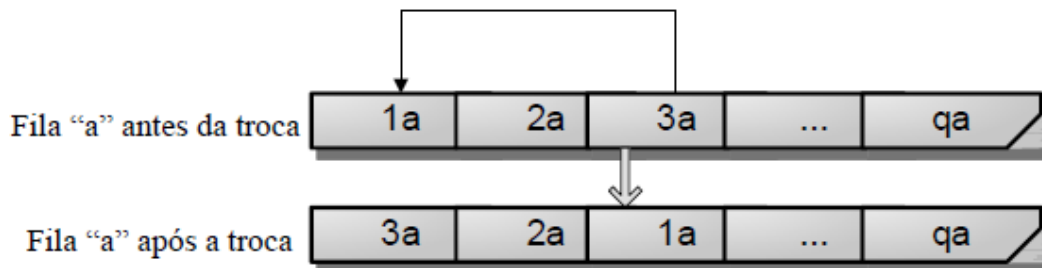


Figura 6.5 - Troca de lote dentro da fila de espera da máquina (Santos (2009)).

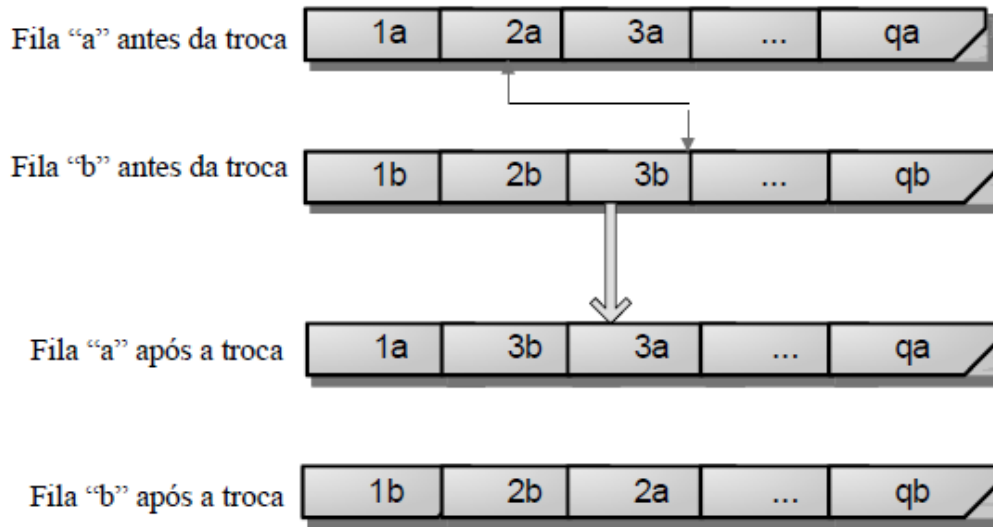


Figura 6.6 - Troca de lote entre filas de espera de máquinas (Santos (2009)).

O valor da função objectivo é calculado tendo em conta: i) os tempos de processamento, ii) os tempos de preparação e iii) e os atrasos ocorridos.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

7. Introdução

O mundo está cada vez mais a transformar-se numa única economia global, muita das vezes designada por “aldeia global”. Os mercados que eram antes dominados por empresas locais ou nacionais são agora vulneráveis à concorrência de empresas em todos os cantos do mundo. Consequentemente, à medida que as empresas expandem os seus negócios num mercado global, também a gestão da produção deve ser mais ampla e global para que as empresas consigam ser competitivas. A gestão da produção é reconhecida hoje como uma área funcional crítica dentro de qualquer organização.

As tecnologias de informação desempenham um papel importante na elaboração e na gestão de processos de produção, contudo, neste trabalho verificou-se que ao nível da programação de tarefas tem havido uma maior dificuldade na implementação destas tecnologias. O trabalho desenvolvido pela comunidade científica acerca deste tipo de problemas tem sido muito vasto.

No geral, as empresas não dão a importância devida ao desenvolvimento de ferramentas para o sequenciamento da produção, no entanto, em conjunto com o aumento da velocidade de processamento computacional, têm sido desenvolvidas novas heurísticas que tem permitido resolver problemas cada vez mais complexos. A resolução deste tipo de problemas está geralmente associada ao desenvolvimento de heurísticas de aproximação que buscam soluções sub-óptimas para os problemas.

7.1. Industria alimentar de produção de preparados de fruta

A empresa em estudo caracteriza-se por uma elevada complexidade no fluxo produtivo.

Quanto a análise feita ao planeamento da empresa, pode se concluir que ao nível das necessidades de produção, a metodologia usada está correctamente aplicada, mas em relação ao sequenciamento da produção, as práticas em vigor centram-se em regras heurísticas complexas que dificultam a resolução do problema.

Em relação ao ambiente industrial, prevalece um misto de ambiente contínuo com máquinas paralelas não uniformes.

Devido às características do processo de planeamento, neste trabalho, optou-se por analisar o problema em mais detalhe na secção das linhas de produção, sendo esta uma secção importante tanto na ligação que estabelece entre as diversas secções fabris, como por ser determinante na definição da capacidade produtiva.

A optimização do processo produtivo está centrada na secção das linhas de produção e passa pelo dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção.

Em resumo, o problema analisado é um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes em máquinas paralelas não uniformes com tempos de preparação dependentes da sequência, restrições de dimensão de lote e penalidades pelo não cumprimento dos prazos de entrega estabelecidos.

De acordo com a pesquisa efectuada, este tipo de problema nunca foi analisado na indústria de preparados de fruta, o que fez com que este trabalho se centra-se no estudo de uma ferramenta que permitisse a sua resolução de forma adequada.

Foi estudado um modelo de programação matemática para o problema em estudo, mas devido á sua complexidade, foi estudada uma heurística baseada no algoritmo de recristalização simulada que permite a obtenção de soluções quase-óptimas.

7.2. Conclusões finais

O trabalho desenvolvido permitiu analisar em pormenor o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção e constituiu uma boa base de trabalho para uma futura implementação na empresa.

Pela pesquisa efectuada e pelos resultados obtidos noutro tipo de indústria com problemas análogos, é previsível que a implementação de uma solução análoga na indústria alimentar tenha resultados positivos.

7.3. Trabalho futuro

Face ao trabalho efectuado a implementação no ambiente estudado seria desejável.

Do ponto de vista da metodologia, seria interessante abordar outro tipo de algoritmo para o mesmo problema.

Relativamente às heurísticas usadas seria importante explorar novas técnicas para a determinação da solução inicial e processo de trocas e transferências.

7.4. Análise crítica

É claro que a motivação para o desenvolvimento deste trabalho está associada ao percurso profissional do seu autor, estando este a desenvolver funções no planeamento da empresa em estudo.

Reconhece-se uma grande motivação e interesse da empresa no desenvolvimento de ferramentas para este tipo de problema.

Para concluir, é importante referir que o desenvolvimento deste trabalho foi bastante gratificante em termos de aprendizagem para o seu autor e vai aportar mais conhecimentos na sua área profissional.

8. Referências bibliográficas

Araujo, S. A. e Arenales, M. N. (2000). Problema de Dimensionamento de Lotes Monoestágio com Restrição de Capacidade: modelagem, método de resolução e resultados computacionais. *Pesquisa Operacional*, v. 20, p. 287-306.

Askin, R. e Standridge, C. (1989). *Modeling and analysis of manufacturing systems*. John Wiley and Sons. New York.

Askin, R. e Standridge, C. (1993). *Modeling and analysis of manufacturing systems*. John Wiley & Sons. New York.

Baranger, P. e Hugel, G. (1994). *A produção*. Editora sílabo. Lisboa.

Benichou, J. e Malhiet, D. (1991). *Études de cas et exercices corrigés en gestion de production*. Éditions D`organisation Université. Paris.

Béranger, P. (1987). *As Novas Regras de produção*. Lidel Edições Técnicas Lda.

Billington, P. J., McClain, J. O., Maes, J., Millen, R. e Van Wassenhove, L. N. (1984). Multi-item lot-sizing in capacitated multi-stage serial systems. *IIE Transportation*, v. 26, p. 12-18.

Billington, P. J., McClain, J. O. e Thomas, L. J. (1983). Mathematical programming approaches to capacity MRP systems: review formulation and problem reduction. *Management Science*, v. 19, p. 1126-1141.

Bitran G.R. e Yanasse H.H. (1982). Computational Complexity of the Lot Size Problem. *Management Science*, v. 28, n. 10, p. 1174-1186.

Bixby, R. E. (2002). Solving Real-World Linear Programs: A Decade and more of Progress. *Operations Research*, v. 50, n. 1, p. 3-15.

Brahimi, N., Dauzereperes, S., Najid, N.M. e Nordli, A. (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 168, p. 1-16, 2006.

Burbidge, J. L. (1978). *The Principles of Production Control*. Plymouth: Mac Donald and Evans Limited.

Cheng T. C. E. e Podolsky S. (1996). *Just-in-Time Manufacturing an Introduction*. 2ªEdição, Chapman and Hall .

Chase, A e Aquilano, N. (1989). *Production and operations Management: A Life oh cycle Approach*. 2ª Edição.

Chase R. B. e Aquilano N. J. (1995), *Gestão da Produção e das Operações- Perspectiva do Ciclo de Vida*. Monitor-Projectos e Edições Lda. Lisboa.

Courtois, A., Martin, C. e Pillet, M. (1993). *Production and Operations Management: Management and Services*. 5ª Edição, McGraw-Hill International Editions.

Courtois A., Martins C. e Pillet B. M. (1997). *Gestão da Produção*. 5ªEdição. Lidel Edições Técnicas.

Dilworth, J. (1992). *Operations Management: Design, Planning and Control for Manufacturing Services*. McGraw-Hill International Editions.

Ferreira, D. (2006). *Abordagens para o Problema Integrado de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes da Produção de Bebidas*. Tese de Doutoramento em Engenharia de Produção. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Gelders L F. e Van W. L. N. (1981). Production planning: a review. *European Journal of Operational Research*. v. 7, p. 101-110.

Godinho F. M. e FERNANDES, F. C. F. (2005). Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura (PEGEMs): Elementos-Chave e Modelo Conceitual. *Rev. Gestão e Produção*. v. 12, n. 3. São Carlos

Hax A. e Candea, D.(1984). *Production and inventory management*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Jonhson, L. A. e Montgomery, D. C. (1974). *Operations research in prodution planning, scheduling and inventory control*. John Wiley and Sons. New York.

Lubben R. T. (1989). *Just-in-Time: Uma Estratégia Avançada de Produção*. McGraw-Hill. São Paulo.

- Marques, A. (1991). *Gestão da Produção*. Texto Editora Lda. Lisboa.
- Mayer, R. (1981). *Administração da Produção*. Atlas S.A. São Paulo.
- Mellichamp, J. e Love, R. (1978). Production Switching Planning Heuristic for the Aggregate Planning Problem. *Management Science*, v. 24, n. 12.
- Monks, J. G. (1987). *Administração da Produção*. McGraw-Hill. São Paulo.
- Moreira, D. (1993). *Administração da Produção e Operações*. Livraria Pioneira Editora.
- Plossl, G. W. (1993). *Administração da Produção*. Makron Books do Brasil Editora Ltda.
- Pochet Y. e Wolsey, L. A. (2006). *Production Planning by Mixed Integer Programming*. Springer Verlag. New York.
- Reis, D. (1987). *Administração da Produção*. Editora Atlas São Paulo.
- Ribeiro, M. I. B. (1999). *O Planeamento e o Controlo da Produção na Indústria Alimentar do Distrito da Guarda*. Dissertação de Mestrado para obtenção de grau de Mestre em Gestão. Universidade da Beira Interior. Covilhã.
- Roldão, V. (1993). Programação da Produção e Gestão de Materiais. *Revista Portuguesa de Gestão*.
- Roldão, V. (1994). Programação de Produção - Despacho e Sequenciamento. *Revista Portuguesa de Gestão*.
- Roldão, V. (1995). *Planeamento e programação da Produção*. 1ª Edição, Edição Monitor Projectos e edições Lda. Lisboa.
- Russomano, V. (1995). *Planeamento e Controlo da Produção*. 5ª Edição, Editora Pioneira. São Paulo.
- Santos, F. M. B. C. (2009). *O Problema do Sequenciamento na Definição de Estratégias de Planeamento da Produção*. Dissertação para obtenção de grau de Doutor em Engenharia da Produção. Departamento de Engenharia Electromecânica. Universidade da Beira Interior. Covilhã. 231pp.

Santos, L. S. F. (2010). Desenvolvimento de um Modelo de Planeamento da Produção na Indústria Alimentar Lisboa Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Schroeder, R. (1989). *Operations Management-Decision Making in the Operations Function*. 2ª Edição, Mcgraw-Hill Book Co.

Stevenson W. J. (1999). *Production Operations Management*. McGraw Hill.

Toledo, F. M. B. (1998). *Dimensionamento de lotes em máquinas paralelas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Eléctrica. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Toledo, F. M. B. e Shigemoto, A.L. (2005). Lot-Sizing Problem with Several Production Centers *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 3, p.479-492.

Toso, E. A. V. (2008). *Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de Produção na Indústria de Suplementos para Nutrição Animal*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos. 191p.

Trigeiro, W. W. (1989). A simple heuristic for lot sizing with setup times. *Decision Sciences*, v. 20, n. 3, p. 294-303.

Trigeiro, W. W., Thomas, J. e McClain, J. O. (1989). Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*, v. 35, p. 353-366.

Vollman T. E., Berry W. L. e Whybark D. C. (1997). *Manufacturing Planning and Control Systems*. McGraw Hill.

Vollman T. E., Berry W. L., Whybark D. C. e Jacobs F. R. (2005). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. McGraw Hill.

Williams, P. (1993). *Model Building in Mathematical Programming*. John Wiley & Sons. New York.

Winston, W. (1991). *Operations Research: Applications and algorithms*. PWS-Kent. Boston.

Zaccarelli, Baptista S. (1987). *Programação e Controle da Produção*. Livraria Pioneira Editora.

