



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

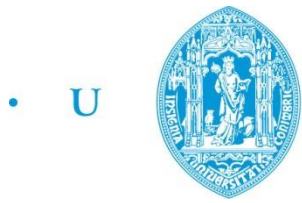
Paulo Jorge Rodrigues Nascimento

**DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE  
LOTES EM LINHAS DE PRODUÇÃO PARALELAS  
COM FAMÍLIAS DE PRODUTOS NA INDÚSTRIA  
DE PAPEL**

Dissertação no âmbito do mestrado em Engenharia e Gestão Industrial,  
orientada pelo Professor Doutor Samuel Moniz e apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

Julho de 2020





• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Dimensionamento e sequenciamento de lotes em linhas de produção paralelas com famílias de produtos na indústria de papel**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

**Lot sizing and scheduling on parallel production lines with product families  
in the paper industry**

Autor

**Paulo Jorge Rodrigues Nascimento**

Orientador

**Professor Doutor Samuel Moniz**

Júri

Presidente	<b>Professora Doutora Aldora Gabriela Gomes Fernandes</b> Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	<b>Professor Doutor Cristóvão Silva</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	<b>Professor Doutor Samuel Moniz</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional

---



**The Navigator Company**

**Coimbra, julho, 2020**



“Your success is only limited by your own imagination and your own hard  
work.”

*Mark Hughes*

Aos meus avós, pais e irmão.



## Agradecimentos

O documento aqui apresentado representa o final de uma etapa que foi iniciada há 5 anos atrás com muitas dúvidas, receio, e até mesmo alguma ingenuidade. Foram 5 anos cheios de aprendizagens, experiências, vitórias, derrotas, momentos bons, menos bons, mas essencialmente, e aqueles que valem a pena recordar, momentos muito bons que fazem com que chegue à conclusão de que a decisão de há 5 anos atrás foi acertada.

O maior dos agradecimentos não poderia deixar de ser aos meus pais e ao meu irmão, pois devo a eles a pessoa que sou hoje e que me permitiu percorrer todo este percurso. O vosso esforço incondicional para me apoiarem independentemente de todas as dificuldades, é algo que não é possível descrever em tão poucas palavras. A vocês, o meu maior obrigado.

Não poderia deixar de fazer um agradecimento especial também ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Moniz, o impulsionador de grande parte dos meus projetos académicos. Obrigado por toda a motivação e conhecimento transmitido.

Um agradecimento também ao Eng. Paulo Serrano e a toda a equipa da Navigator pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos grandes amigos que Coimbra me deu, e que tornaram todo este percurso mágico: Diogo Alves, Duarte Vivas, Fábio Lopes, João Gomes, João Oliveira, João Gonçalves, José Carvalho, Ricardo Maria, Rute Silva e Tiago Francisco.

Ao Eduardo Carvalho, João Santos, Pedro Dinis e Rafael Carvalho. Sem vocês, Coimbra nem tinha tido todo o seu encanto.

À Rita por ter estado presente em todos os momentos mais importantes e por todo o seu apoio ao longo dos últimos anos.

A todos os membros da equipa do NEEMAAC 19/20, obrigado pela experiência proporcionada. Sem dúvida, uma das melhores decisões durante estes 5 anos foi ter aceite este convite.

A todos estes, e a muitos outros que poderiam também estar aqui mencionados, o meu muito obrigado!





## Resumo

O objetivo deste trabalho surge da necessidade de otimizar o dimensionamento e sequenciamento de lotes em linhas de produção paralelas, com tempos de mudança entre famílias diferentes dependentes da sequência de produção, e tempos de mudança independentes da sequência de produção para produtos dentro da mesma família, numa fábrica da indústria de papel, onde são produzidos diversos de papel do tipo *tissue*.

Para tal, e após uma extensa revisão do estado da arte, foi utilizado um modelo eficiente de programação linear inteira mista. O modelo proposto integra três abordagens de modelação diferentes. Uma abordagem discreta é utilizada para o cálculo dos custos de inventário e de *backlog*. Para o sequenciamento da produção das famílias, é utilizada uma abordagem de tempo contínuo com variáveis de precedência, e o escalonamento dos produtos é feito através de restrições de capacidade e de dimensionamento de lotes.

O modelo desenvolvido foi implementado num *solver* comercial de modo a testar a sua eficiência num problema de dimensão real, e através de dados fornecidos pela empresa foi possível avaliar diversos cenários de operação. Os resultados principais sugerem que quando o sistema não está em sobrecarga, o modelo tende a atingir a solução ótima em tempo computacional muito competitivo, quer no planeamento a curto prazo, quer a médio prazo. Contudo, quando ocorre sobrecarga e havendo possibilidade de não cumprir com as datas de entrega, a qualidade das soluções a médio prazo pode ficar comprometida. É ainda possível concluir que o modelo tende a fornecer melhores soluções do que as atualmente obtidas pela empresa. Desta forma, conclui-se que o modelo formulado tem potencial para ser aplicado em ambientes industriais, no entanto, é importante realçar que compromisso entre o detalhe do modelo e a eficiência computacional terá sempre de ser considerado, por forma a assegurar a automatização eficiente do processo de tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Dimensionamento e sequenciamento de lotes, Indústria de papel, Otimização, MILP, Máquinas em paralelo.



## Abstract

The goal of this dissertation is to optimize the lot sizing and scheduling decisions in parallel production lines, with changeover times between different families depending on the production sequence, and setup times independent of the production sequence for products belonging to the same family, in a factory from the paper industry, where sub products from tissue paper are made.

To accomplish this objective, and after an extensive review of the state of the art, an efficient mixed integer linear programming model was used. The proposed model integrates three different modeling approaches. A discrete approach is used for the inventory and backlog cost calculation. For scheduling the families, a continuous-time approach with immediate precedence variables is used, and for scheduling of products, lot sizing capacity constraints are applied.

The developed model was implemented in a commercial solver in order to test its efficiency in a real dimension problem. Through data provided by the company, different operation scenarios were evaluated. The main results suggest that when the system is not overloaded, the model tends to reach the optimal solution in very competitive computational time, whether it is short or medium-term planning. However, when an overload occurs, and there is a possibility of not meeting due dates, the quality of the solution in the medium term may be compromised. It is also possible to conclude that the model tends to provide better solutions than the ones currently generated by the company. Thus, it is concluded that the formulated model has the potential to be applied in industrial environments. However, it is important to highlight that the compromise between the detail of the model and computational efficiency must be always considered, in order to guarantee an efficient automatization of the decision-making process.

**Keywords:** Simultaneous lot sizing and scheduling, Paper industry, Optimization, MILP, Parallel Machines.



## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Siglas .....	xv
1. Introdução.....	1
2. Caso de estudo.....	5
2.1. Empresa .....	5
2.2. Caracterização do estado atual.....	6
2.3. Descrição do problema .....	9
3. Enquadramento teórico .....	15
3.1. Planeamento da produção .....	15
3.1.1. Planeamento na indústria de processo orientada à produção por lotes.....	16
3.1.2. Dependência dos tempos de <i>changeover</i> relativamente ao sequenciamento da produção.....	18
3.1.3. Políticas de inventário na indústria de papel <i>tissue</i> .....	20
3.2. Problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção .....	21
3.2.1. Classificação de modelos de otimização para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes .....	22
3.2.2. Modelos de otimização para problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção .....	25
4. Metodologia .....	29
4.1. Análise geral do sistema .....	29
4.2. Modelação do problema.....	31
4.2.1. Formulação do modelo .....	32
4.3. Implementação .....	38
5. Análise de resultados.....	41
5.1. Análise ABC-XYZ .....	41
5.2. Resultados obtidos com o modelo apresentado na metodologia .....	42
5.3. Extensão para restringir a transferência de <i>backlog</i> entre períodos e resultados obtidos.....	48
5.3.1. Limitações da extensão aplicada e possíveis soluções .....	54

5.4.	Testes ao modelo com sistema em sobrecarga .....	55
5.4.1.	Aplicação de extensão para responder a casos de sobrecarga do sistema.....	57
5.5.	Replicação de um planeamento da produção da empresa .....	58
5.6.	Sugestões de futuros estudos e aplicação de extensões .....	59
6.	Conclusão.....	65
7.	Referências bibliográficas.....	67
ANEXO A – Exemplos de embalamento.....		71
ANEXO B – Exemplos de cilindro gofrador e do resultado final .....		73
ANEXO C – Restrições de integralidade e nomenclatura do modelo .....		75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxo geral de informação .....	9
Figura 2.2. Fluxo do processo produtivo .....	13
Figura 4.1. Procura por tipo de linha nas 2 fábricas da empresa.....	29
Figura 4.2. Procura por linha na fábrica de Aveiro .....	30
Figura 4.3. Quantidade de artigos diferentes produzidos por tipo de linha nas 2 fábricas da empresa.....	30
Figura 4.4. Subseqüências de produção (Erdirik-Dogan & Grossmann, 2008) .....	35
Figura 4.5. Ocorrência de changeovers entre períodos diferentes (Kopanos et al., 2011) ..	36
Figura 4.6. Objetivo da alteração efetuada na restrição (16).....	37
Figura 5.1. Sequenciamento de famílias para a linha doméstica 1 .....	51
Figura 5.2. Sequenciamento de famílias para a linha doméstica 2.....	51
Figura 5.3. Perfis de produção de cada família por período.....	52
Figura 5.4. Perfil de custos por período .....	52





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação de artigos MTO ou MTS em função de uma análise ABC-XYZ com base na procura .....	6
Tabela 5.1. Análise ABC-XYZ aos produtos através do forecast .....	41
Tabela 5.2. Especificação dos dados utilizados na 1ª instância (I1).....	43
Tabela 5.3. Resultados obtidos para a 1ª instância (I1) .....	43
Tabela 5.4. Especificação dos dados utilizados na 2ª instância (I2).....	44
Tabela 5.5. Resultados obtidos para a 2ª instância (I2) .....	44
Tabela 5.6. Especificação dos dados utilizados na 3ª instância (I3).....	45
Tabela 5.7. Resultados obtidos para a 3ª instância (I3) .....	46
Tabela 5.8. Perfil da função objetivo.....	53
Tabela 5.9. Comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e o plano existente.....	58



## **SIGLAS**

MIP – Programação inteira mista

MILP – Programação linear inteira mista

MTO – Make to order

MTS – Make to stock

ATO – Assemble to order



## 1. INTRODUÇÃO

O planeamento da produção é um dos problemas com maior relevância no contexto industrial, sendo responsável, em grande parte, pela eficiência operacional das empresas. As empresas pertencentes à indústria de processo, considerada de capital intensivo, têm o seu foco na melhoria da eficiência e redução de custos para se manterem competitivas. Desta forma, é crucial que a satisfação da procura seja efetuada da forma mais económica possível (Almada-Lobo et al., 2010), através de um plano de produção eficiente e que respeite as restrições inerentes ao problema, o qual é normalmente formulado com o objetivo de minimizar os custos totais (Marques et al., 2020).

Com o rápido desenvolvimento de novas tecnologias, e com a necessidade das empresas se adaptarem rapidamente ao mundo envolvente, é crucial que estas tornem os seus sistemas de planeamento da produção cada vez mais eficientes e flexíveis, aumentando a produtividade, e consequentemente, a satisfação dos clientes enquanto mantêm os custos reduzidos. Assim, um dos principais problemas que as empresas pertencentes à indústria de processo enfrentam neste contexto, é o dimensionamento e sequenciamento de lotes para um determinado horizonte de planeamento.

Adicionalmente a esse problema, em muitos ambientes produtivos, a troca entre lotes de produção de dois produtos diferentes desencadeia operações de ajustamento de máquinas ou de limpeza, cujos tempos e custos são normalmente dependentes da sequência da produção. Consequentemente, a sequência de produção deve estar explicitamente incorporada com o dimensionamento de lotes, pois só através da integração destes dois problemas se podem criar planos de produção melhores do que os obtidos ao resolver os dois problemas de forma hierárquica (Guimarães et al., 2014; Moniz et al., 2014).

Desta forma, este trabalho é motivado pela necessidade de aplicar um modelo simultâneo de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção em contexto real da indústria de processo, onde as margens de lucro são baixas e as tecnologias produtivas são orientadas para longas sequências de produção, quando na realidade é expectável que esta indústria tenha de lidar com séries de produção mais pequenas, adaptando-se rapidamente às necessidades do mercado.

Apesar de este ser um tema amplamente estudado em vários trabalhos publicados, existe uma constante necessidade de adaptar os modelos existentes às necessidades específicas de cada sistema individual (Moniz et al., 2015). Visto que grande parte desses trabalhos são muito gerais, e nem sempre têm aplicação industrial, existem variáveis únicas de cada sistema que não são levadas em conta, sendo por isso necessário estudar diversas extensões do problema para que o modelo desenvolvido se consiga adaptar às necessidades do sistema produtivo em causa (Moniz et al., 2013).

A abordagem seguida para resolver este problema passa pela aplicação de uma formulação matemática de programação linear inteira mista (MILP), a qual será implementada num *solver* comercial, IBM ILOG CPLEX *Optimizer*.

A finalidade deste estudo consiste no desenvolvimento de um modelo matemático para o dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção de um sistema produtivo que utiliza linhas automáticas de produção paralelas, na produção de diversos produtos, como rolos de papel higiénico e rolos de cozinha, a partir de bobines de papel *tissue*. O objetivo primário deste modelo, consiste em determinar a melhor solução possível para o *trade-off* que é gerado entre os custos, a produtividade, e o nível de serviço ao cliente. No entanto, este deve ser ajustado à complexidade das linhas de produção para que a sua aplicabilidade seja viável, uma vez que, mesmo modelos simplificados deste tipo de problemas muitas vezes se tornam impossíveis de resolver em tempo computacional aceitável (Almada-Lobo et al., 2008). Do objetivo primário, surgem alguns objetivos secundários, como é o caso de quais ordens devem ser satisfeitas após a data de entrega, pois neste tipo de indústria, a capacidade pode não ser suficiente para atender à procura, gerando assim custos adicionais de possíveis ruturas de *stock*, refletindo-se no nível de serviço ao cliente. Outro dos objetivos secundários, é a diminuição dos custos de inventário, uma vez que só através de um plano de produção bem formulado é possível fazer uma boa gestão do inventário.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo, é feito um breve enquadramento ao tema e à sua motivação, bem como aos seus principais objetivos. No segundo capítulo, é apresentada uma revisão de literatura do tema em estudo, começando pelo conceito mais amplo de planeamento da produção e algumas das características específicas que este deve levar em conta na indústria de processo, e em

particular, na indústria de papel *tissue*, estudando de seguida os problemas simultâneos de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, bem como respetivos modelos. No terceiro capítulo, é descrito e analisado o caso de estudo que motivou este trabalho. No quarto capítulo, é descrita a metodologia utilizada para a resolução do problema, e no quinto capítulo, é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Neste capítulo são ainda apresentadas algumas das extensões aplicadas ao modelo, bem como sugestões de futuras extensões. Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho realizado.





## 2. CASO DE ESTUDO

Este trabalho foi motivado por um problema real de uma fábrica de produção e transformação de papel *tissue*. O facto de se tratar de uma fábrica recente, leva a que ainda exista espaço considerável para conseguir melhorias naquilo que é o funcionamento atual, e como tal, surge a necessidade de aumentar a eficiência do planeamento da produção, o qual tem repercussões no funcionamento geral da fábrica, tanto a jusante como a montante.

### 2.1. Empresa

A história da Companhia Portuguesa de Celulose, atual The Navigator Company, remonta a 1953 em Aveiro, com a produção de pasta crua de pinho, projeto este liderado por Manuel Santos Mendonça. Em 1957, a fábrica de Aveiro tornou-se a primeira a nível mundial a produzir pasta de papel a partir de eucalipto pelo processo *kraft*, tendo sido o ponto de partida para um longo percurso que viria a tornar esta empresa numa referência a nível nacional e internacional. Atualmente, a The Navigator Company é um produtor integrado de floresta, pasta e papel, *tissue* e energia, tendo a sua atividade alicerçada em diversas fábricas modernas de grande escala, dispersas por Portugal. É a terceira maior exportadora no país, com destino a aproximadamente 130 países nos 5 continentes, e a maior geradora de valor acrescentado nacional, representando cerca de 1% do PIB nacional. A sua capacidade anual instalada ronda atualmente os 1.6 milhões de toneladas de papel, 1.5 milhões de toneladas de pasta, das quais 80% são integradas no papel, 130 mil toneladas de *tissue* e 2.5TWh de energia elétrica.

A unidade de produção onde este trabalho foi desenvolvido, Navigator Tissue Aveiro, surgiu recentemente na sequência da opção estratégica do grupo de diversificar a sua atividade para o negócio de *tissue*, levando a cabo o investimento de uma nova fábrica no complexo industrial de Aveiro para a produção e transformação deste tipo de papel. Deste investimento resultou a implementação de uma máquina de produção de papel e 4 linhas de transformação, o que se converte na capacidade total de produção anual de papel *tissue* anteriormente mencionada, sendo que desta, existe capacidade para transformar 120 mil

toneladas em produto acabado, nomeadamente, papel higiénico e rolos de cozinha. Tudo isto permitiu ao grupo posicionar-se como o terceiro maior produtor ibérico de *tissue*, e líder deste setor em Portugal.

A The Navigator Company é uma sociedade anónima pertencente ao índice PSI-20, tendo como acionistas maioritários a Semapa, e conta com cerca de 3200 empregados nas suas fábricas, sendo que aproximadamente 200 trabalham no mais recente investimento efetuado na nova fábrica em Aveiro.

## 2.2. Caracterização do estado atual

A empresa segue uma política de inventário híbrida com alguns artigos produzidos numa lógica MTO e outros numa lógica MTS, uma vez que existe uma grande complexidade presente no sistema produtivo, e também devido ao elevado número de ordens que são colocadas por diferentes clientes, as quais podem ser compostas por variadíssimos artigos. Isto faz com que uma produção puramente *just in time*, aguardando que sejam colocadas ordens pelos clientes, não seja uma opção viável, e como tal, existem artigos que são produzidos numa lógica de MTS, e outros numa lógica de MTO. Contudo, existe um *stock* intermédio onde são armazenadas as bobines de papel *tissue* após a sua produção, as quais são posteriormente transformadas em produto acabado, e como tal, existe um ponto de desacoplamento de inventário. De uma forma geral, a classificação dos artigos como MTO ou MTS é feita de acordo com o que está descrito na Tabela 2.1. Contudo, deve ser efetuada uma posterior análise não ao nível do artigo, mas sim ao nível do cliente, uma vez que em casos particulares, esta análise pode ser mais relevante para a empresa.

**Tabela 2.1.** Classificação de artigos MTO ou MTS em função de uma análise ABC-XYZ com base na procura

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>X</b>	MTS	MTS	MTS/MTO
<b>Y</b>	MTS	MTS/MTO	MTO
<b>Z</b>	MTS	MTO	MTO

Para os artigos operados numa estratégia de MTS, os quais são normalmente artigos com muita procura, o planeamento da produção é baseado em *forecast*, com um horizonte temporal de aproximadamente 1 mês, equilibrando os níveis de *stock* e as vendas previstas que vão ocorrer ao longo do mês. Atualmente, não existem níveis de *stock* que sejam obrigatórios manter, pois todos os estudos previamente realizados não conseguiram chegar a uma conclusão satisfatória para a empresa, sugerindo sempre níveis de *stock* elevadíssimos, o que se torna impraticável não só a nível de planeamento, mas também em termos de espaço disponível no armazém. No entanto, existem valores de referência que devem ser respeitados sempre que possível. Manter estes níveis de *stock* é essencial para conseguir satisfazer a procura dos clientes, uma vez que estes permitem reduzir o possível impacto que variações entre o *forecast* e a procura real podem causar na produção e na satisfação de encomendas. Para além disso, isto permite libertar capacidade produtiva que poderá ter de ser utilizada para responder a necessidades de curto prazo. Desta forma, para estes artigos é fundamental determinar tamanhos de lote de modo a encontrar um balanceamento aceitável entre as quantidades armazenadas, as quais não devem ser demasiado elevadas, e a suavização da produção, reduzindo tempos de *changeover* para assim aumentar a eficiência das linhas.

Para os artigos produzidos numa estratégia MTO, existe também um *forecast* de forma a conseguir fazer uma previsão de ruturas de *stock* nos clientes e de ocupação das linhas. No entanto, as ordens de fabrico apenas são lançadas quando a encomenda for efetuada por parte do cliente, e nas quantidades pedidas, uma vez que estes artigos não podem ser armazenados.

O *forecast* em causa é enviado para a responsável de *forecast* pelos responsáveis de vendas, os quais recebem estes *inputs* a partir dos comerciais dos diferentes mercados. A responsável de *forecast* trata de o manter atualizado e de o partilhar com a área de planeamento, servindo assim como dado de entrada principal para a elaboração do planeamento da produção. Estes valores, contudo, podem sofrer de um erro percentual de aproximadamente 30% segundo cálculos da empresa. Como tal, é de esperar que o próprio planeamento sofra de alguns erros relativamente à realidade, mesmo quando o sequenciamento e o dimensionamento de lotes são feitos de acordo com a solução ótima para os dados existentes.

A partir dos valores de *forecast* ponderados, isto é, para um horizonte temporal de um mês a partir do dia atual, é efetuada uma análise de cobertura aos diferentes artigos, de modo a perceber quando é que um determinado artigo irá entrar em rutura de *stock*. Ou seja, através desta análise é possível perceber quais os artigos que devem, ou não, estar presentes no planeamento para o horizonte temporal considerado, e as suas quantidades mínimas de modo a satisfazer as necessidades. Contudo, estas quantidades não levam em conta o sequenciamento de lotes ou a capacidade e disponibilidade das linhas. A partir dos dados resultantes dessa análise, é decidido, a um nível superior de planeamento, quais os artigos a produzir em cada uma das fábricas da empresa, e de seguida, é então iniciado o processo de dimensionamento e sequenciamento de lotes nas respetivas fábricas.

De modo a tentar reduzir os impactos derivados da baixa exatidão com que é fornecido o *forecast*, é ainda efetuada uma análise de cobertura pelo histórico de vendas, de modo a perceber se o *forecast* atual sofre variações significativas consoante aquilo que ocorreu em vendas passadas, questionando os comerciais, se for caso disso, se o mesmo está de facto correto.

Através dos dados mencionados anteriormente, e a partir de outros como o *stock* de matéria prima (bobines de papel *tissue*), *stock* de subsidiárias (materiais incluídos no produto final para além da matéria prima), *stock* de produto acabado e determinadas características intrínsecas aos próprios artigos e ao processo produtivo, como por exemplo, a produtividade das linhas para cada um dos artigos, é feito o dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção para aproximadamente 1 mês. Este planeamento tem de ser constantemente analisado e reformulado à medida que vão sendo colocadas as encomendas por parte dos clientes, visto que a realidade pode não corresponder àquilo que estava presente no *forecast*, e muitas vezes, não corresponde. Para além disso, podem ocorrer outros problemas como a indisponibilidade de subsidiárias ou matéria prima para produzir o produto acabado, sendo necessário reformular o plano.

O *forecast* é normalmente fornecido em paletes, e cada palete é sempre composta pelo mesmo número de unidades do artigo. Ou seja, não há variabilidade em termos de quantidade por palete, sendo por isso mais simples de conhecer os detalhes acerca daquilo que é efetivamente produzido, à exceção de possíveis falhas de qualidade.

Existe também um conjunto de lotes mínimos de produção em termos de tempo, os quais devem ser respeitados, tal como ciclos de produção, sendo esta uma das bases para executar o dimensionamento e sequenciamento de lotes. Contudo, em casos extremos, e quando é necessário responder de imediato à procura devido a falhas de *forecast*, uma vez que atualmente existe aproximadamente uma visibilidade de apenas 1 semana relativamente às encomendas firmes, estes valores podem deixar de ser respeitados. É ainda necessário tomar decisões acerca de que linha será utilizada para produzir determinado artigo, avaliar a capacidade disponível das linhas e eventuais paragens das mesmas para operações de manutenção. Na Figura 2.1 é mostrado o fluxo geral de informação ao longo da empresa.

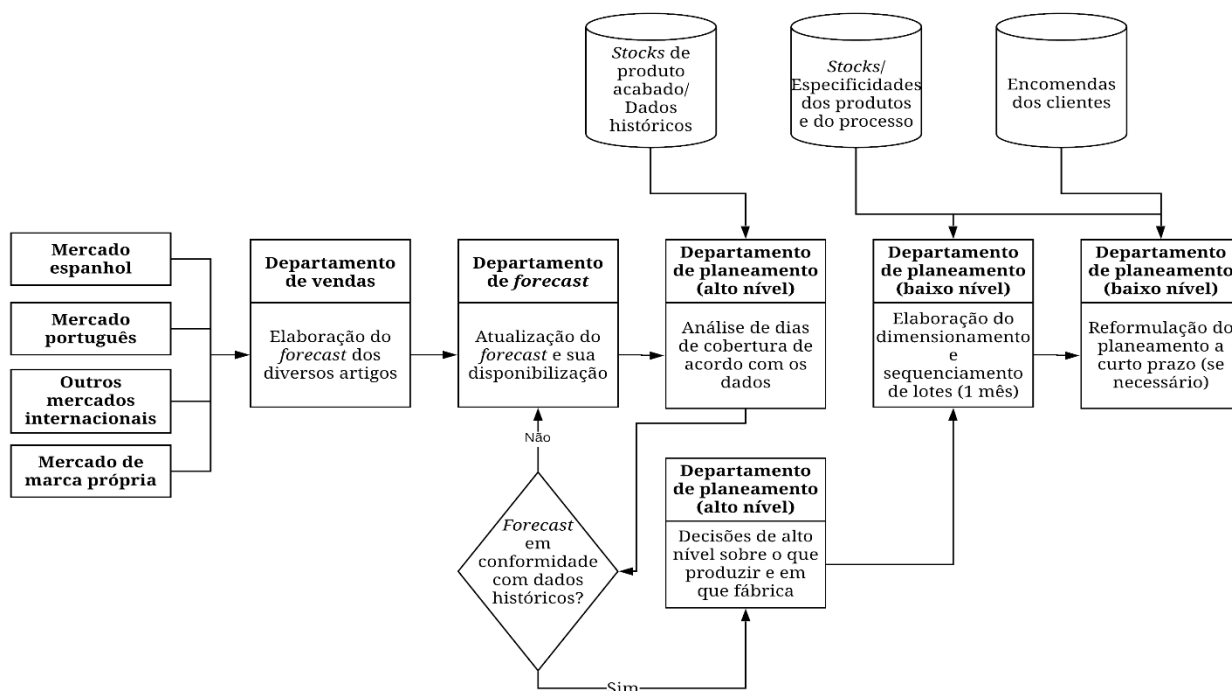


Figura 2.1. Fluxo geral de informação

### 2.3. Descrição do problema

Atualmente, o planeamento da produção é executado de acordo com regras empíricas e experiência dos planeadores, não tendo como base nenhum tipo de modelo ou *software* específico, sendo para isso utilizado o *Excel*. Este é elaborado para um horizonte temporal de aproximadamente 1 mês, reformulado semanalmente, e certas vezes, até

diariamente, de acordo com as necessidades. Isto implica um aumento da carga de trabalho dos planeadores, os quais têm de avaliar a melhor sequência de produção, o melhor tamanho de lote, e a conseqüente introdução destes dados no sistema. É assim demonstrado que existe uma falta de métodos baseados em modelos para determinar o tamanho ideal dos lotes e o seu sequenciamento nas linhas, considerando as variáveis mais importantes do processo, o que à partida permitirá aumentar a eficiência com que se utiliza as linhas de produção.

Desta forma, este trabalho é motivado por um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes encontrado na produção de derivados de papel *tissue*, numa empresa da indústria papeleira, pelo que o mesmo estará focado num planeamento da produção de mais baixo nível. A fábrica possui 2 linhas de produção doméstica, as quais produzem aproximadamente um total de 160 artigos com características diferentes, de entre papel higiénico e rolos de cozinha, sendo que uma das linhas está direcionada para a produção de papel higiénico, enquanto a outra está direcionada para rolos de cozinha e também pode produzir grande parte dos artigos de papel higiénico. Como tal, para além do sequenciamento e dimensionamento, os lotes têm ainda de ser atribuídos a cada uma das linhas, pois existem artigos que podem ser produzidos em ambas. Esta atribuição torna-se mais complexa uma vez que as linhas são idênticas, e por isso, as taxas de produção dos artigos que podem ser produzidas em ambas, tal com os tempos de *changeover*, são iguais.

A produção é executada ao longo de 3 turnos de 8 horas, 7 dias por semana, e cada uma das linhas tem uma paragem semanal de 8 horas para operações de manutenção programada. Cada linha pode ser vista como uma única unidade de planeamento, uma vez que o material circula automaticamente ao longo das linhas, e sempre que é necessário algum tipo de paragem nas mesmas, estas param como um todo, não podendo parar apenas uma parte da linha. Este pressuposto permite que se possa considerar a produtividade da linha como a produtividade da estação considerada *bottleneck*, sendo que essa produtividade irá variar consoante o artigo que está a ser produzido, e também a estação considerada *bottleneck* poderá variar. A produtividade considerada deverá ainda levar em conta a eficiência das linhas, pois isso irá ter influência no tempo de produção visto que as linhas não conseguem trabalhar à sua produtividade máxima sem falhas durante todo o horizonte temporal.

O facto de existirem vários artigos com características semelhantes, sendo apenas diferenciados pelo tipo de filme utilizado no embalamento uma vez que o cliente é diferente, leva a que estes possam ser agrupados por famílias, permitindo reduzir a complexidade do problema. Desta forma, de todos os artigos produzidos nas linhas de produção doméstica, resultam cerca de 80 famílias de produtos distintos. Este agrupamento é feito de acordo com as características do produto acabado, uma vez que são estas que determinarão as implicações do processo e respetivos *changeovers*. Algumas destas características são o formato de embalamento do saco de rolos, sendo possível visualizar alguns dos formatos no Anexo A, o tipo de papel utilizado cuja gramagem e número de folhas pode variar consoante o artigo em questão, o diâmetro, a largura e o comprimento dos rolos, e o tipo de gofragem efetuada, sendo possível verificar algumas das variações utilizadas para a gofragem no Anexo B.

Uma questão muito pertinente está relacionada com os tamanhos mínimos de lote, os quais certas vezes, tendem a não ser respeitados devido a necessidades de curto prazo. Contudo, isto tende a ocorrer pois os níveis de *stock* são muito baixos, havendo assim uma transferência direta da variabilidade da procura para as linhas de produção, o que pode colocar em causa a eficiência das mesmas devido ao aumento de tempos de *changeover*. Como tal, é fundamental conseguir elaborar um plano que garanta a manutenção dos *stocks* de segurança, de modo a conseguir fazer face à variabilidade. No entanto, isso nem sempre é possível devido às constantes reformulações que existem a curto prazo, o que faz com que se perca alguma visibilidade a médio/longo prazo, não conseguindo manter os *stocks* de segurança nos níveis desejados.

Como resultado, a capacidade produtiva nem sempre é utilizada da melhor forma, e surge assim o primeiro grande desafio deste problema onde é necessário determinar tamanhos de lotes ideais. Apesar desse valor variar de artigo para artigo, e depender da respetiva procura, deve existir também um tamanho de lote mínimo bem definido, o qual seja respeitado, caso contrário, a produção desse artigo poderá não compensar os custos incorridos de *changeovers* e tempos de arranque e paragem da produção. Esta trata-se de uma decisão muito importante uma vez que em função do tamanho de lote, irá ser gerado um *trade-off* entre os tempos de *changeover* e as quantidades em inventário, o qual tem de ser gerido de modo a não exceder os limites aceitáveis de artigos em inventário, contudo, os

tempos de *changeover* também devem ser mantidos baixos de modo a que a eficiência das linhas seja o mais elevada possível, garantindo, no entanto, a satisfação da procura.

Relativamente aos *changeovers*, os mesmos têm de ser efetuados sempre que há uma alteração na produção de artigos. Quando esta alteração ocorre dentro da mesma família, não é muito relevante uma vez que o tempo necessário para tal é sempre o mesmo, pois a única mudança possível que existe dentro da mesma família, é a mudança de filme. Contudo, sempre que esta mudança ocorre entre famílias diferentes, o tempo necessário para tal vai depender de qual o último produto a ser produzido e o seguinte. Estas mudanças podem ir desde simples alterações na largura dos rolos, bastando alterar os parâmetros de funcionamento da linha, a longas limpezas devido à produção de artigos com papel colorido. Desta forma, estes tempos são dependentes da sequência de produção, e por isso, a sequência de produção deve ser elaborada de forma a minimizá-los, surgindo assim o segundo grande desafio deste problema. Uma vez que tanto a sequência como o tamanho de lotes têm interferência na utilização da capacidade produtiva, estes dois problemas são interdependentes, e devem por isso ser resolvidos em conjunto, de modo a obter a melhor solução possível para o *trade-off* entre custos totais, produtividade e nível de serviço ao cliente.

Para além da importância que o problema em estudo tem de forma isolada no planeamento das linhas, de modo a satisfazer datas de entrega minimizando custos, este também é importante uma vez que previamente a estas 2 linhas de produção existe uma máquina de papel que produz as bobines de papel *tissue*, a qual é contraprodutivo parar. Como tal, a produção nestas linhas deve estar otimizada de modo a que o *buffer* entre a máquina de papel e as linhas não se torne excessivamente grande, gerando problemas de gestão do armazém intermédio de bobines, uma vez que se as bobines ficarem armazenadas demasiado tempo, podem acabar danificadas ou o próprio papel pode perder as suas propriedades. No entanto, também o armazém automático de produto final deve ser tido em conta, uma vez que a sua capacidade total é limitada. Um esquema da representação geral do sistema pode ser visto na Figura 2.2, sendo que das 4 linhas representadas, apenas irão ser alvo de estudo a linha doméstica 1 e a linha doméstica 2, pelas razões explicadas na metodologia.



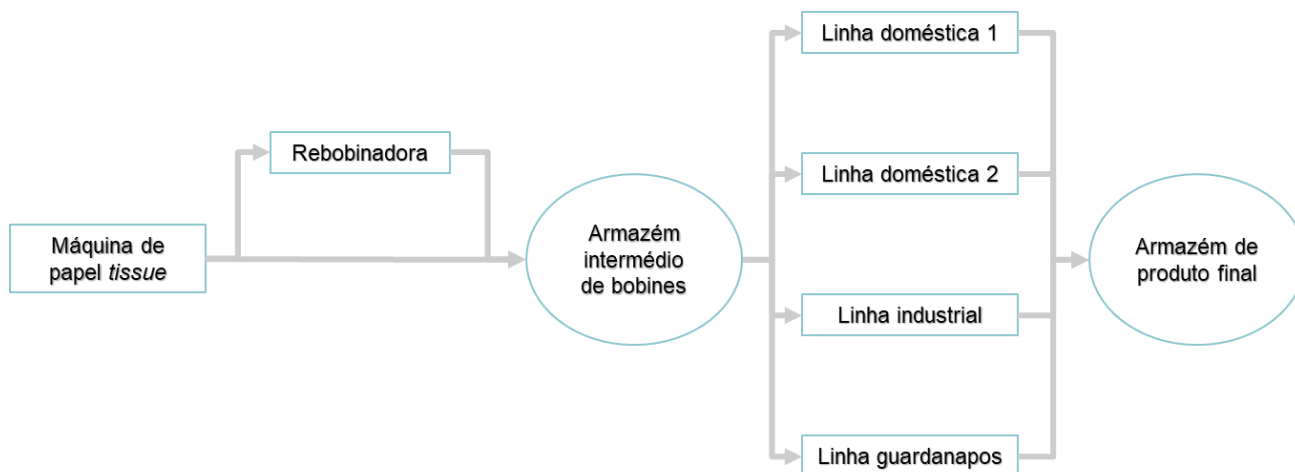


Figura 2.2. Fluxo do processo produtivo

No que à minimização de custos diz respeito, deve ser tido em conta não só os custos de manutenção de inventário e de *changeovers*, mas também os custos de *backlog*, os quais podem existir se a capacidade produtiva não for suficiente para satisfazer toda a procura dentro das datas de entrega. Estes custos deverão fazer parte de uma função objetivo, a qual tenderá a ser minimizada, contudo, todos estes custos são difíceis de categorizar, exigindo um trabalho minucioso por parte da empresa.

A juntar a tudo isto, a atual conjuntura do mercado, onde a variabilidade é cada vez maior, faz com que a dinâmica de planeamento se venha a agravar constantemente, sendo necessárias constantes reformulações aos planos elaborados. Como tal, e como o atual método é a utilização de *Excel*, se o planeamento é alterado a curto prazo, tudo aquilo que estava planeado para depois desse horizonte temporal fica de imediato fora do contexto. Desta forma, é necessário voltar a analisar todo o planeamento, uma vez que é essencial conseguir ter uma visão a médio prazo devido às necessidades de matéria prima e subsidiárias, as quais têm de estar disponíveis aquando da produção do respetivo artigo, e também devido a razões intrínsecas da empresa, como por exemplo, fornecer estimativas para as datas de primeiras produções de novos artigos. Torna-se assim essencial possuir uma ferramenta que possa responder de forma rápida e com boas soluções ao planeamento de curto prazo, uma vez que a ineficiência do *forecast* obriga a que se trabalhe muitas vezes

nessas circunstâncias, e que ao mesmo tempo possa fornecer estimativas viáveis para o planeamento a médio prazo.

Para além disso, o atual método utilizado foi desenhado para planos muito mais estáveis e para uma fábrica de menor dimensão do que a atual, não permitindo trabalhar com a rapidez e flexibilidade necessária. Como tal, uma das maiores dificuldades atualmente enfrentadas no planeamento é a incapacidade de criação de cenários diferentes de forma rápida e eficiente. Ou seja, atualmente, como o sistema em utilização para elaborar o planeamento é muito pesado, é impossível criar vários cenários com dados de entrada diferentes, como por exemplo a concretização ou não do *forecast* disponibilizado, em tempo aceitável para a tomada de decisão. Desta forma, é normalmente criado apenas um cenário através de intuição e experiência dos planeadores. Esta situação torna-se ainda mais grave pois semanalmente, são efetuadas reuniões onde estão presentes diversas vertentes da empresa. Nestas reuniões, o *forecast* é analisado e ajustado, bem como as encomendas que já estão colocadas pelos clientes, e a partir daí é necessário ajustar o plano de produção, pelo que rápidas soluções são necessárias consoante diferentes dados de entrada.

A construção de um modelo que represente com fidelidade o comportamento das linhas e do sistema em geral, permitindo obter diferentes soluções otimizadas a uma função objetivo, dependendo dos dados de entrada, num tempo computacional aceitável, é assim crucial para melhorar a eficiência do planeamento da empresa.

### **3. ENQUADRAMENTO TEÓRICO**

Este trabalho pretende abordar duas das atividades mais importantes no contexto da indústria de processo e do planeamento da produção: (1) dimensionamento de lotes, e (2) sequenciamento da produção. Estas atividades envolvem a alocação de recursos limitados a operações que ocorrem em determinado espaço de tempo, impondo assim decisões e restrições a vários níveis. De acordo com Moniz et al. (2014), as decisões de planeamento, onde está inserido o dimensionamento de lotes, e escalonamento, têm uma grande importância devido à sua interdependência com outras funções, tais como vendas, compras, produção, e controlo. Desta forma, a integração de modelos de otimização para dar suporte a estas decisões tem sido alvo de grande interesse e desenvolvimento.

Apesar de todo esse desenvolvimento representar um grande avanço na integração de modelos de otimização nos processos de tomada de decisão, existem algumas lacunas que são constantemente encontradas na literatura, como é o caso destes modelos muitas vezes não serem testados em contextos reais da indústria, limitando assim a avaliação prática dos modelos e respetivas conclusões. Desta forma, para integrar modelos de otimização teóricos em ambiente industrial, torna-se crucial explorar e compreender vários aspetos do sistema em questão, tendo como exemplo, as políticas de inventário, dependência dos tempos de *changeover* consoante a sequência de produção, bem como considerações intrínsecas do processo produtivo.

#### **3.1. Planeamento da produção**

Elaborar o planeamento requer tomar decisões ao nível do sistema de produção, no qual diferentes tipos de eventos, tais como falhas inesperadas, manutenção preventiva, abastecimento de matéria prima e flutuações na procura, podem ocorrer ao mesmo tempo (Yin et al., 2003). Limitações e restrições no processo produtivo, capacidade e espaço de armazenamento, bem como múltiplas opções de produção, dificultam ainda mais a tomada de decisões relativas ao planeamento da produção, o qual é definido por Gelders & Van Wassenhove (1981), como o processo de alocação de recursos a diferentes atividades

produtivas, com o objetivo de satisfazer a procura do cliente, ou as previsões de procura, durante um determinado período de tempo, da forma mais eficiente e económica possível. Desta forma, apesar de um dos objetivos principais de qualquer planeamento ser o cumprimento das datas de entrega aos clientes, surge o desafio de obter um equilíbrio rentável entre vários fatores conflituosos. Como resultado, são gerados *trade-offs* relativamente a custos de inventário, taxa de utilização dos recursos, nível de serviço ao cliente, entre outros que podem estar dependentes da indústria onde se atua (Moniz et al., 2015).

Segundo Vercellis (2009), uma forma de se proceder à tomada de decisões consiste em dividir o planeamento da produção em planeamento estratégico, tático e operacional, tomando a melhor decisão em cada um dos três níveis.

Em concordância com Karimi et al. (2003), o planeamento estratégico, relativo a decisões de longo prazo como escolhas de produto, equipamento e processos, desenho e localização das instalações, e planeamento de recursos, fornece a orientação e a direção global da empresa. O planeamento tático, com um horizonte de tempo médio, envolve tomada de decisões sobre o planeamento das necessidades de materiais e o dimensionamento de lotes de produção durante o período de planeamento, de modo a otimizar critérios de desempenho, como a minimização dos custos totais, garantindo a satisfação da procura e das restrições de capacidade. O último dos três níveis, o planeamento operacional, é um planeamento de curto prazo, o qual regula as decisões diárias das operações, como por exemplo, o sequenciamento da produção. Contudo, em certos casos o dimensionamento de lotes também pode ser considerado uma decisão do planeamento operacional.

### **3.1.1. Planeamento na indústria de processo orientada à produção por lotes**

Muitos dos estudos existentes na área do planeamento da produção, são focados nas necessidades da indústria de produção discreta, no entanto, existem diferenças notórias entre esta e a indústria de processo.

A indústria de processo possui problemas e restrições específicas quando se fala de planeamento e sequenciamento da produção. Num estudo realizado por Allweyer et al.

(1994) em empresas da Europa de diferentes indústrias de processo, orientadas para lotes, foram identificados os principais requisitos de planeamento, apresentados de seguida:

- a. **complexidade da estrutura de produção:** a dificuldade em encontrar um bom planeamento da produção está, em grande medida, dependente da complexidade da estrutura produtiva dentro da fábrica, e das interdependências com outras fábricas;
- b. **tempos e custos de *changeover*:** a redução destes tempos e custos é sempre uma atividade de extrema importância para qualquer atividade de planeamento. *Changeovers* incluem as trocas de configurações de equipamentos, montagem e desmontagem, e procedimentos de limpeza;
- c. **escalonamento de campanhas:** uma das formas de lidar com o problema dos tempos e custos de *changeover*, é a criação de campanhas de produção. Isto quer dizer que uma campanha inteira tem de ser planeada e agendada, não sendo permitido produzir qualquer outro tipo de trabalho enquanto se opera numa determinada campanha;
- d. **parâmetros e horários dependentes dos recursos:** a utilização de diferentes tipos de recursos, pode alterar parâmetros do processo e restrições do sequenciamento, tal como se houver alteração do tamanho do lote;
- e. **configuração variável do equipamento:** muitas vezes, os recursos primários necessitam de estar equipados com diferentes tipos de equipamentos adicionais. Desta forma, a viabilidade de um planeamento pode não estar apenas dependente dos recursos primários, mas também dos secundários (Moniz et al., 2012);
- f. **conexões variáveis entre unidades:** as diferentes unidades podem estar diretamente conectadas por determinados caminhos. Se essas conexões podem ser alteradas, isso também deve ser levado em conta no planeamento;
- g. **subprodutos:** a criação de subprodutos ao longo do processo pode influenciar significativamente decisões relacionadas com o planeamento;

- h. **produtos instáveis/perecíveis:** este tipo de produtos apenas pode ser armazenado durante algum tempo, tornando-se uma restrição importante para o planeamento;
- i. **testes de qualidade:** processos produtivos requerem, normalmente, uma monitorização contínua da qualidade, sendo que muitas vezes, decisões sobre o futuro tratamento de um material só podem ser tomadas após determinados testes de qualidade serem efetuados;
- j. **recursos partilhados:** em muitas fábricas, existem recursos que são partilhados, os quais têm uma capacidade máxima. Caso existam trabalhos que estejam a esgotar a capacidade destes recursos, outros trabalhos podem estar a ser atrasados.

Méndez et al. (2006), numa extensa revisão sobre as abordagens de modelação para problemas de escalonamento, enumeram a (1) tipologia do processo, (2) atribuição de equipamentos, (3) conectividade de equipamentos, (4) políticas de inventário, (5) transferência de material, (6) tamanho dos lotes, (7) tempo de processamento dos lotes, (8) padrões de procura, (9) *changeovers*, (10) restrições de recursos, (11) restrições de tempo, (12) custos, e (13) grau de certeza, como os aspetos mais relevantes a considerar no desenvolvimento de um modelo de escalonamento para processos em lotes. Como é possível observar, certos aspetos são mencionados em ambos os estudos.

De referir que os requisitos enunciados por ambos os estudos podem variar consoante o caso em particular, no entanto, devem ser sempre considerados na elaboração de qualquer modelo de otimização para a resolução de problemas da natureza do desafio em questão.

### **3.1.2. Dependência dos tempos de *changeover* relativamente ao sequenciamento da produção**

Um dos requisitos que está implicitamente contemplado nas características identificadas na secção anterior, e que pode fazer uma grande diferença na modelação do problema, é a dependência, ou não, dos tempos de *changeover* consoante a sequência de produção. Sendo que um *changeover* ocorre quando a produção numa linha é alterada de um produto para outro, se os tempos associados a esta mudança forem dependentes da sequência

de produção, então a utilização da capacidade da linha vai depender da sequência pela qual os produtos são produzidos. Conseqüentemente, não levar em conta estes tempos, bem como esta dependência, pode resultar numa sobrestimação da capacidade de produção disponível e em objetivos de produção tendencialmente otimistas (Erdirik-Dogan & Grossmann, 2007). Estes autores mostraram que, um modelo que leve em conta estes tempos, gera soluções mais realistas, no entanto, também aumenta significativamente a complexidade do problema.

Foram realizados vários estudos que levaram em conta esta dependência e, de acordo com Günther (2014), é necessário confirmar se o custo e tempo atribuídos a uma mudança entre determinados produtos, reflete realisticamente o respetivo processo de *changeover*. Isto é, num grande número de configurações industriais, este autor verificou que as condições de *changeover* estão associadas ao modo de processamento do equipamento de produção, e não ao tipo de produto em si. Desta forma, atribuir custos e tempos de mudança a produtos individuais pode ser questionável, uma vez que esses custos podem ser variáveis consoante a configuração básica do equipamento de produção em análise.

Esta dependência pode ainda assumir várias formas. O caso mais geral, é a situação onde há flexibilidade total na qual a produção pode ser sequenciada de forma arbitrária, levando em conta que os tempos e custos de *changeover* irão depender dessa sequência. No entanto, existe um caso mais particular, e que diminui a complexidade do problema, no qual os produtos são agrupados por famílias de acordo com as suas características, existindo *changeovers* dependentes da sequência entre essas mesmas famílias, e *setups* independentes da sequência dentro de produtos da mesma família. Este caso mais particular é usualmente visto na indústria de processo e, em especial, na indústria de papel *tissue*, uma vez que nesta, existem vários artigos que são produzidos exatamente com as mesmas características, no entanto, devido à existência de várias marcas próprias, a customização do filme de embalagem exige pequenas mudanças no processo produtivo. Deste modo, considera-se que esse conjunto de produtos pertencem à mesma família, uma vez que o tempo de mudança necessário para alterar a produção entre eles é mínimo.

### 3.1.3. Políticas de inventário na indústria de papel *tissue*

De uma forma geral, a maioria dos sistemas produtivos opera em dois tipos de políticas de inventário: (1) *make to stock* (MTS), e (2) *make to order* (MTO) (Soman et al., 2004).

Relativamente à primeira, o foco do planeamento da produção está na antecipação da procura e no planeamento para a satisfazer, sendo que os principais problemas encontrados são o planeamento de inventário, dimensionamento de lotes e previsões da procura. As medidas de performance são normalmente focadas no produto, como por exemplo, taxa de utilização das linhas por produto e níveis médios de inventário.

Já na segunda, o foco está na execução da ordem, e as medidas de desempenho estão ligadas à ordem em si, como por exemplo, o tempo médio de resposta e o atraso médio do pedido. Os principais problemas confrontados são o planeamento da capacidade dos equipamentos, a aceitação/rejeição de pedidos e a satisfação das datas de entrega.

O planeamento da produção e a gestão de inventário são atividades muitas vezes vistas como separadas, no entanto, a coordenação entre estas duas tem de ser corretamente efetuada de forma a reduzir os níveis de inventário, mantendo o desejado nível de serviço ao cliente, e os restantes custos baixos. Isto é especialmente importante numa indústria tão competitiva como a do papel, onde as margens de lucro são reduzidas, e cada vez mais produtos de marca própria são introduzidos ganhando uma parte da quota de mercado (Björk & Carlsson, 2007). Esta situação não seria um problema se as tecnologias de produção de papel atuais fossem orientadas para curtas séries de produção e vários produtos diferentes, contudo, não é isso que ocorre. Desta forma, é gerado um *trade-off* muito importante entre a produtividade, níveis de inventário e resposta à procura, o qual deve ser gerido da melhor forma possível. Poucos estudos existem acerca deste tópico, e em particular nesta indústria, no entanto, Björk & Carlsson (2007) desenvolveram duas abordagens de programação linear inteira mista (MILP) com horizonte de tempo fixo, de modo a perceber os elementos chave da dinâmica entre produção e gestão de inventário, com o objetivo principal de demonstrar o efeito de *lead times* flexíveis.

De acordo com Simchi-Levi et al. (2004), um dos temas centrais da gestão da cadeia de abastecimento é a coordenação entre a produção e inventário. Indo de encontro aos estudos realizados por Karmarkar et al. (1985) e Bemelmans (1986), a produção de itens



numa lógica MTO significa a redução de inventário desses itens, no entanto, poderá significar um aumento no inventário de itens MTS para manter o nível de serviço. Para além disso, inexistência total de inventário de itens MTO significa um aumento no número de *changeovers*, aumentando *lead times*, os quais só poderão ser reduzidos aumentando o ciclo de *stock* e o *stock* de segurança dos itens MTS.

Kapuscinski et al. (2004), mencionaram que de uma forma geral, é lucrativo passar de uma estratégia de MTS para uma estratégia de MTO. No entanto, a realidade da indústria em causa, impossibilita uma estratégia pura de MTO, uma vez que elevados custos de *changeover*, e procura variável ou influenciada pelo ambiente externo, torna inevitável que se produza para inventário (Björk & Carlsson, 2007).

Consequentemente, é necessário operar numa estratégia híbrida de MTS/MTO para alguns tipos de produto, e numa estratégia de MTS para outros. Na estratégia híbrida de MTS/MTO, também conhecida por *assemble to order* (ATO) na indústria de produção discreta, existe um ponto de desacoplamento onde é mantido um *stock* de produto intermédio, o qual só é processado após existir uma determinada ordem de produto final. Este tipo de estratégia gera várias interações ao nível do planeamento da produção que não ocorrem em estratégias puras de MTO ou MTS. Já nos produtos numa estratégia de MTS, o *stock* intermédio pode também existir, no entanto, os produtos finais continuarão a ser produzidos para *stock*.

### **3.2. Problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção**

No fabrico de bens comuns, como é o caso da indústria de papel *tissue*, é muito usual a produção de um grande número de produtos finais, em várias linhas paralelas com capacidade finita, cada uma delas consistindo em muitas estações de trabalho. Visto que o material circula automaticamente entre as estações de trabalho de uma linha de produção, esta pode ser considerada como uma única unidade de planeamento.

A procura individual de cada produto está normalmente associada a um período, e varia ao longo do tempo como resultado do procedimento de *forecast*, ou devido à entrada de pedidos de clientes. Ocorrem assim custos para o inventário em *stock* no final de cada período.

Os produtos finais podem ser atribuídos a diferentes famílias. No caso de *setups* entre produtos da mesma família, estes podem normalmente ser menosprezados uma vez que não são dependentes da sequência de produção. Já no caso de *changeovers* entre produtos de famílias diferentes, incorrem tempos e custos de *changeover*, os quais normalmente são dependentes da sequência de produção. Numa situação como esta, é necessário tomar decisões acerca do tamanho dos lotes de produção, da atribuição desses lotes a cada uma das linhas de produção, e do seu sequenciamento.

Surge assim um dos principais problemas industriais operacionais, o dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção, da forma mais eficiente e económica possível. Em várias aplicações, em especial na indústria de processo, a relação entre dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, principalmente devido a *changeovers* dependentes da sequência de produção, força a que estas decisões tenham de ser tomadas simultaneamente, de modo a utilizar a capacidade de forma eficiente (Almada-Lobo et al., 2008). Também Meyr (2002) e Copil et al. (2017) mencionaram a necessidade de integrar o dimensionamento de lotes e o sequenciamento da produção em ambientes industriais com tempos de *changeover* dependentes da sequência, visto que a capacidade final disponível apenas é conhecida após a definição do tamanho e sequência dos lotes.

Dada a complexidade presente nos sistemas de produção atuais, da qual se consegue ter uma noção através das características mencionadas neste capítulo e nos anteriores, este tipo de problemas são habitualmente abordados através de modelos de otimização, os quais, de acordo com Copil et al. (2017), são normalmente baseados em programação inteira mista (MIP).

### **3.2.1. Classificação de modelos de otimização para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes**

Apesar de não existir uma grande diversidade de artigos que abordem estes temas de forma integrada e com aplicação industrial, existe uma grande variedade de modelos de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, envolvendo diferentes características e suposições. Estes modelos foram discutidos com mais detalhe e alvo de revisão por Drexl & Kimms (1997), Méndez et al. (2006), e mais recentemente, por Copil et al. (2017). De acordo com estes autores, após se conhecer as restrições e características

específicas do problema em questão, é de extrema importância escolher a abordagem de otimização mais adequada, uma vez que alternativas diferentes vão ter impacto direto na eficiência computacional e nas capacidades e limitações do modelo de otimização resultante.

Para a escolha da abordagem mais adequada, um dos aspectos mais importantes a ter em conta é a representação do tempo, sendo que estes modelos podem ter formulações de tempo discreto ou contínuo, dependendo se os eventos apenas podem ocorrer em determinados momentos, ou em qualquer altura do horizonte de planeamento.

Para o caso das formulações de tempo discreto, o horizonte de planeamento é dividido num número finito de períodos definidos *a priori*, cuja duração é normalmente igual. Estes podem ser macro períodos, onde vários produtos podem ser produzidos por período, bem como vários *changeovers* podem ser realizados. A principal dificuldade desta abordagem é que o sequenciamento da produção é executado dentro de cada período, e desta forma, a possível transferência de estados entre períodos gera problemas na modelação (Günther, 2014). Estes também podem ser micro períodos, onde apenas um *setup* pode ser efetuado por período, e por isso, são mais adequados para desenvolver planeamentos de curto prazo (Almada-Lobo et al., 2010). Com este tipo de formulação, apenas é necessário monitorizar as restrições em pontos específicos e conhecidos no tempo, o que reduz a complexidade de formulação do modelo, cuja estrutura se torna mais simples. No entanto, por essa mesma razão, a eficiência computacional do modelo vai ser tanto menor quanto mais intervalos de tempo forem definidos, o que poderá fazer com que deixe de ser possível obter uma solução em tempo computacional viável, principalmente se o horizonte de planeamento for relativamente extenso. Para além disso, reduzir o domínio das decisões de tempo, definindo previamente e de forma arbitrária o número e duração dos períodos, pode gerar soluções não admissíveis.

Relativamente às formulações de tempo contínuo, o horizonte de planeamento é dividido num número fixo de períodos, cuja duração é determinada pela otimização. Estes modelos podem ser ainda subdivididos em abordagens que utilizam uma única linha temporal, comum a todas as unidades de processamento, ou ter várias linhas temporais específicas para cada unidade de processamento. Neste tipo de formulação, as decisões temporais são representadas por um conjunto de variáveis contínuas que definem os horários exatos nos quais os eventos ocorrem, permitindo uma redução significativa no número de variáveis do modelo, e soluções mais flexíveis em termos temporais, o que por sua vez, tem

tendência em melhorar a eficiência computacional. Contudo, devido à modelação destas variáveis, as limitações de recursos e inventário requerem normalmente restrições mais complexas, tornando todo o modelo mais difícil de estruturar e compreender (Méndez et al., 2006).

Como ambas as formulações têm as suas limitações, vários autores combinam as diferentes formas de modelar o tempo conseguindo lidar com restrições complexas, como é o caso de Kopanos et al. (2011), o qual combina os dois tipos de formulações de modo a conseguir lidar com restrições de inventário de forma discreta, e restrições de sequenciamento da produção de forma contínua.

Outro fator importante, é definir como lidar com os problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção dependendo da natureza do desafio em questão. Estes problemas podem ser abordados de forma monolítica, resolvendo-os simultaneamente, ou de forma sequencial, decompondo o problema em dimensionamento de lotes e posterior escalonamento da produção. Apesar do ideal ser optar pela primeira opção, a complexidade de problemas reais pode tornar a obtenção de soluções viáveis apenas possível através da segunda opção (Méndez et al., 2006).

Após definir as condições anteriores, é ainda importante perceber como é que se pretende representar os eventos ao longo do tempo, os quais podem ser representados de forma temporal, através de pontos ou intervalos no tempo, ou através de relações de precedência (Méndez et al., 2006).

Por último, diferentes formas de avaliar a qualidade da solução podem ser utilizadas. O critério selecionado para a otimização tem normalmente um grande efeito na eficiência computacional. Desta forma, deve ser avaliado o *trade-off* que se gera entre uma solução melhor, no entanto, mais lenta, derivado a uma função objetivo complexa, e uma solução mais rápida, no entanto, inferior, devido a uma função objetivo mais simples. Funções objetivo demasiado complexas, podem até mesmo dar origem a modelos impossíveis de resolver (Méndez et al., 2006).

De referir ainda que, grande parte dos problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção encontrados em ambiente industrial, podem ser considerados problemas de otimização combinatoria complexa e de grande escala, nos quais raramente pode ser obtida uma solução ótima em tempo computacional aceitável. Essa explosão

combinatória está relacionada com o aumento do número de produtos a serem processados, longas sequências e estágios de processamento, múltiplas unidades disponíveis para cada tarefa, e a própria extensão do horizonte de planejamento (Méndez et al., 2006).

### **3.2.2. Modelos de otimização para problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção**

No presente estudo, pretende-se abordar um problema num sistema com um único estágio de produção constituído por unidades de produção paralelas, as quais são idênticas. Dada a importância deste tipo de desafio, existem várias abordagens na literatura para este problema, no entanto, os problemas reais tendem a ter as suas próprias características específicas, pelo que os modelos existentes precisam de ser adaptados a cada situação particular.

Como já foi referenciado anteriormente, tanto a formulação de tempo contínuo como a de tempo discreto têm as suas limitações, e como tal, de modo a não tornar o modelo demasiado complexo, mantendo uma eficiência computacional aceitável, Chen et al. (2008) propuseram um modelo MIP baseado em intervalos de tempo, cuja representação é híbrida. Ou seja, o horizonte de planejamento da produção foi dividido de forma discreta em várias semanas, e cada semana foi formulada com uma representação contínua do tempo. Este modelo foi proposto para uma situação de apenas um estágio e uma unidade de processamento. Mais tarde, Liu et al. (2008) melhoraram o trabalho anteriormente mencionado, desenvolvendo uma abordagem MIP com base no problema do caixeiro viajante, propondo que um modelo sem intervalos de tempo era mais eficaz, e Liu et al. (2010) estenderam este desenvolvimento para abordar o caso de unidades de produção paralelas. Este último desenvolvimento é de extrema importância uma vez que, atualmente, existem muitas indústrias que funcionam com máquinas paralelas, sejam elas idênticas ou não. Isto implica que para alguns produtos não existe uma atribuição inequívoca a uma máquina, podendo ser produzidos em qualquer uma delas. Desta forma, a complexidade do problema de planejamento da produção aumenta, uma vez que é necessário tomar decisões acerca de qual, ou quais máquinas utilizar, para produzir determinado produto, num determinado período.

Também Erdirik-Dogan & Grossmann (2006) desenvolveram um modelo MIP baseado em intervalos de tempo, de modo a fazer o planejamento de um único estágio com

uma unidade produtiva. Mais tarde, Erdirik-Dogan & Grossmann (2008) estenderam esse trabalho para abordar a situação de unidades produtivas paralelas num único estágio de produção.

Todos os estudos anteriormente mencionados têm abordagens interessantes, tendo sido importantes para perceber qual a melhor forma de abordar o problema em questão de uma forma simples, no entanto, eficiente e eficaz. Contudo, aquele onde foram encontradas maiores semelhanças e melhor capacidade de adaptação ao problema em causa, foi o estudo elaborado por Kopanos et al. (2011). No seu trabalho, o autor apresenta uma formulação que combina uma linha de planeamento de tempo discreto, utilizando macro períodos, com um tratamento de tempo contínuo no que toca a decisões de sequenciamento dentro de cada período e entre períodos adjacentes. Ao nível do planeamento da produção, este modelo lida com encomendas em datas de entrega intermédias, e leva em conta custos de manutenção de inventário, e de ordens não satisfeitas dentro da sua data de entrega. Esta última questão é importante uma vez que, em muitas situações reais, é simplesmente impossível de garantir a satisfação de todas as encomendas dentro da sua data de entrega, sendo por isso necessário tomar decisões ao nível de quais produtos devem ser entregues em atraso. Para além disso, não incluir esta característica no modelo pode fazer com que não exista sequer uma solução viável para o problema caso não exista capacidade para satisfazer toda a procura. Ao nível do sequenciamento, leva em conta restrições dos equipamentos produtivos e tempos. Não obstante a isso, este modelo aborda de forma correta aspetos como a transferência e a execução de *changeovers* entre períodos, o que permite obter soluções com maior taxa de utilização dos recursos. Outro fator que torna este modelo bastante interessante é que o mesmo foi aplicado em um problema real de ambiente industrial. Desta forma, e de acordo com os autores, o modelo tem assim capacidade para lidar com problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção a uma escala industrial, de maneira eficaz.

Kopanos et al. (2011) classifica os produtos finais em famílias de produtos, uma vez que, em vários ambientes industriais existem produtos que partilham as mesmas características. No entanto, este agrupamento entre famílias pode ser feito consoante diversos critérios, dependendo da indústria onde se atua. O objetivo principal deste agrupamento é, portanto, simplificar o modelo de otimização tornando-o

computacionalmente eficiente sem comprometer a qualidade da solução. Assim, sempre que em uma unidade a produção é alterada de uma família para a outra, ocorrem tempos e custos de mudança, os quais são dependentes da sequência de produção. Contudo, dentro da mesma família de produtos considera-se que os tempos e custos de mudança são independentes da sequência, o que simplifica bastante a obtenção de uma solução, uma vez que o sequenciamento dentro de uma determinada família se torna irrelevante para a obtenção da capacidade final dos recursos.

Em suma, o estudo de Kopanos et al. (2011) permite, em contexto real de indústria, alcançar o objetivo de satisfazer a procura minimizando os custos totais, fazendo a atribuição e sequenciamento da produção das várias famílias e produtos, nas diversas unidades produtivas, bem como a quantidade a produzir de cada um dos produtos nos respectivos períodos. Tudo isto é feito através da integração de três abordagens diferentes de modelação. De modo a calcular os custos de manutenção de inventário, e de não entregar encomendas dentro do seu prazo de entrega, é utilizada uma abordagem de tempo discreto. Para fazer o sequenciamento da produção das diversas famílias, é adotada uma abordagem de tempo contínuo usando variáveis de precedência imediata, e para o escalonamento da produção dos diversos produtos, são utilizadas restrições de capacidade e dimensionamento de lotes.

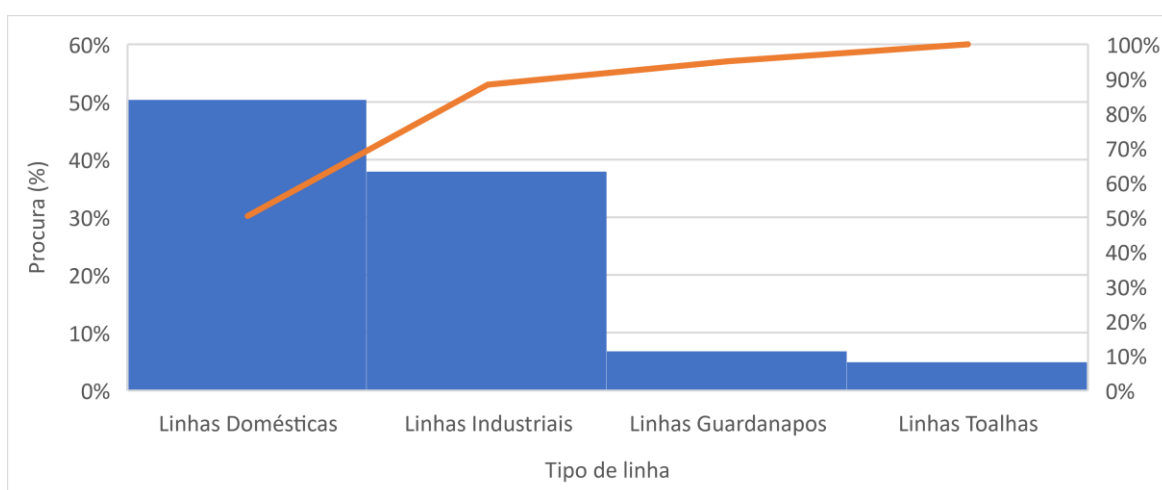




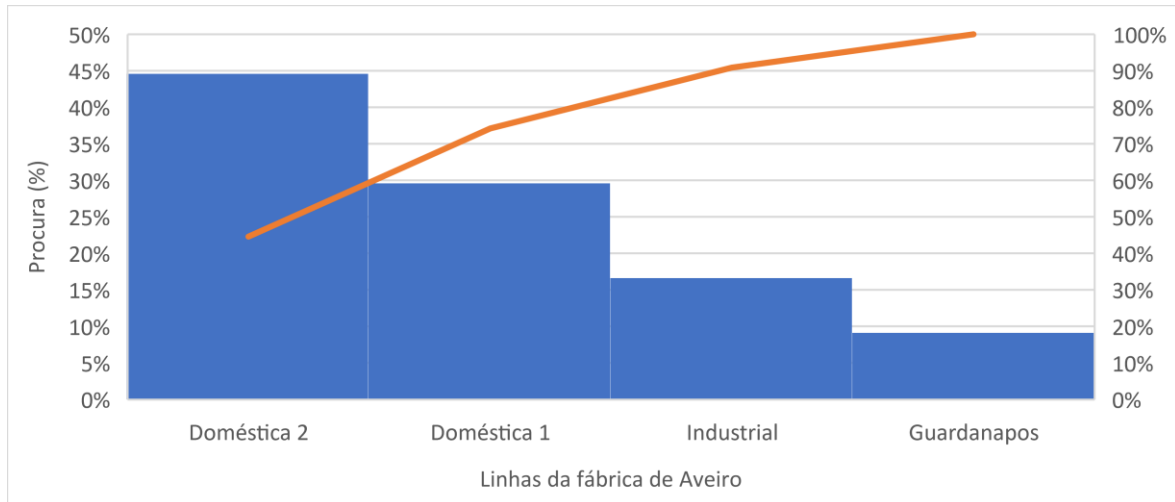
## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Análise geral do sistema

Como primeira fase deste estudo, foi feita uma análise geral do funcionamento da fábrica. Pela observação da Figura 2.2, é possível compreender que o problema em causa tem diferentes estágios de produção, nos quais pode existir diversas máquinas a funcionar em paralelo. Desta forma, a dimensão do sistema é significativamente grande, e abordá-lo como um todo poderia tornar-se demasiado complexo ou até impossível de resolver em tempo útil. Assim, foi decidido abordar o problema por partes, começando por aquelas que são mais importantes. Chegou-se então à conclusão que se iria abordar apenas as linhas de produção, uma vez que a máquina de papel e a rebobinadora não têm grandes problemas de capacidade, estando o *bottleneck* do sistema localizado nas linhas. Foram realizadas duas análises às linhas de produção, onde foi estudada a procura por tipo de linha nas duas fábricas da empresa, e a procura por linha apenas para a fábrica de Aveiro. Estas análises são apresentadas na Figura 4.1 e na Figura 4.2, respetivamente.



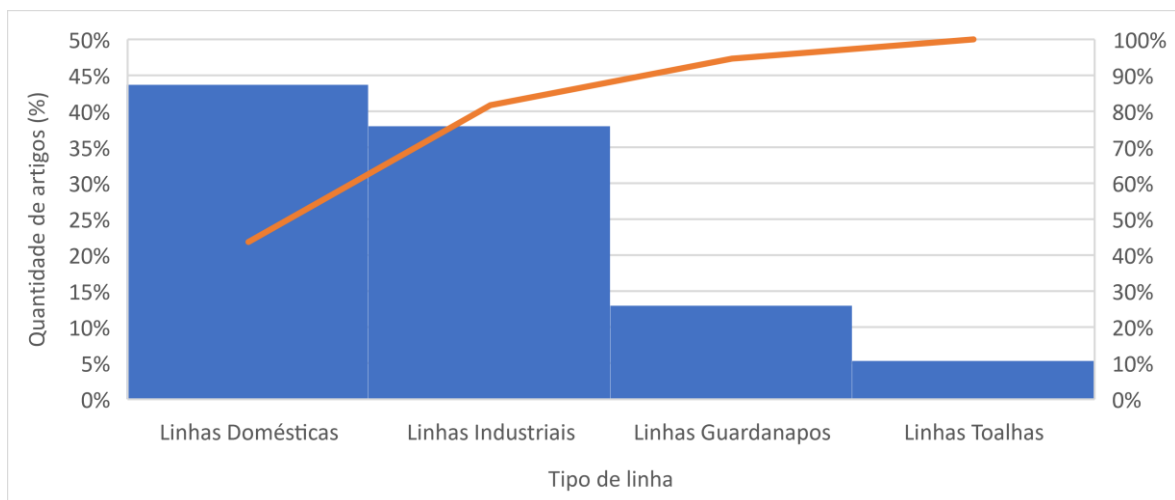
**Figura 4.1.** Procura por tipo de linha nas 2 fábricas da empresa



**Figura 4.2.** Procura por linha na fábrica de Aveiro

Através da observação dos gráficos acima, é possível concluir que as linhas domésticas representam a grande maioria da procura existente.

Para além das análises anteriores, foi realizado um estudo de modo a perceber qual o tipo de linha que contém mais artigos diferentes, podendo aumentar a complexidade do planeamento. Esta análise está apresentada na Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Quantidade de artigos diferentes produzidos por tipo de linha nas 2 fábricas da empresa

A partir do gráfico acima, é possível perceber que as linhas domésticas, para além de representarem grande parte da procura, também são as que contêm a maior variedade de artigos a serem produzidos, sendo que apesar das linhas industriais ficarem próximas, a

sua complexidade é significativamente menor uma vez que não existem tantos formatos de embalagem. Através das análises anteriores e de entrevistas com os planeadores da fábrica, chegou-se então à conclusão que se deveria começar por estudar as linhas domésticas de modo a conseguir melhorar a eficiência e flexibilidade do seu planeamento, uma vez que abordar todas as linhas em apenas um modelo se poderia tornar demasiado complexo.

Foi ainda efetuada uma análise ABC-XYZ de modo a perceber qual a complexidade existente no planeamento da produção das linhas domésticas devido à variabilidade da procura dos produtos, apresentada na análise de resultados.

## 4.2. Modelação do problema

Após analisar e perceber o funcionamento do sistema em si, tal como foi descrito no Capítulo 3, e a partir das análises anteriores, foi necessário encontrar uma abordagem de modelação que levasse em conta as características principais do sistema, tendo potencial de ser aplicado em contexto real no planeamento da empresa. Algumas das características principais procuradas em diversos modelos foram as seguintes:

- a. restrições de balanceamento entre quantidades produzidas, procura, inventário e *backlog*, ao longo do tempo;
- b. restrições de sequenciamento da produção por famílias, permitindo reduzir a complexidade do modelo;
- c. restrições de dimensionamento de lotes por artigo;
- d. restrições de capacidade disponível dos recursos utilizados, nomeadamente as linhas, e também de capacidade disponível em inventário;
- e. capacidade para lidar com *changeovers* dependentes da sequência da produção;
- f. capacidade para lidar com linhas de produção paralelas idênticas;
- g. capacidade para fornecer soluções para instâncias de dimensão considerável em tempo computacional aceitável;
- h. otimização do *trade-off* entre custos, nível de serviço ao cliente e produtividade.

Após considerar todos estes aspetos, foi possível efetuar uma extensa revisão de vários modelos existentes na literatura, escolhendo um que serviu como ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo que pode ser iterativamente melhorado de modo a adaptar-se às necessidades do sistema produtivo em causa.

O modelo escolhido foi desenvolvido por Kopanos et al. (2011), e é apresentado como um modelo de programação linear inteira mista para o planeamento da produção e sequenciamento de processos contínuos paralelos, na presença de tempos de mudança entre famílias diferentes dependentes da sequência da produção, e tempos de mudança entre artigos da mesma família independentes da sequência. Este combina uma formulação de tempo discreto com uma formulação de tempo contínuo para decisões de sequenciamento dentro de cada período, e entre períodos diferentes. O modelo foi implementado numa fábrica real, tendo sido testado para instâncias de dimensão considerável, pelo que deverá conseguir fornecer boas soluções também para o caso em estudo neste problema.

#### **4.2.1. Formulação do modelo**

Para a utilização do modelo escolhido, e de acordo com a descrição do problema feita anteriormente, existem alguns dados que foram considerados como essenciais de obter:

- a. o horizonte temporal de planeamento, o qual é dividido num conjunto de períodos;
- b. a capacidade disponível das linhas de produção em cada um dos períodos considerados;
- c. o conjunto de famílias que engloba todos os artigos produzidos nas linhas de produção, sendo que algumas destas famílias apenas podem ser atribuídas a uma das linhas de produção;
- d. o conjunto de produtos com uma determinada procura no final de cada período considerado, custos de *backlog* e de inventário, taxas máximas e mínimas de produção, bem como tempos mínimos e máximos de processamento e quantidades máximas de artigos em inventário;
- e. tempos de mudança dependentes da sequência de produção para quando existe mudança de produção entre 2 famílias diferentes;

- f. tempos de mudança independentes da sequência de produção para quando existe mudança de produção dentro da mesma família.

O objetivo principal deste modelo passa então por, através dos dados mencionados acima, satisfazer a procura dos clientes a um custo mínimo total, incluindo custos de mudanças dependentes da sequência de produção, bem como de inventário e *backlog*, fazendo: (1) a alocação das diferentes famílias às diferentes linhas em cada período, (2) o sequenciamento entre famílias diferentes em cada linha em cada período, (3) a alocação dos diferentes produtos às diferentes linhas em cada período, (4) a determinação de quantidades a produzir de cada produto em cada período, (5) a determinação de perfis de inventário e *backlog* de todos os produtos em cada período. A forma como este modelo faz isto, a qual pode ser dividida em 3 conjuntos de restrições diferentes, é apresentada de seguida, contudo, só através da integração de todas elas é que é possível obter as soluções desejadas.

#### 4.2.1.1. Restrições de balanceamento de carga

Existem 3 restrições cuja função é executar o balanceamento das quantidades produzidas, em inventário e em *backlog* em cada período, através daquilo que é o *forecast* de cada artigo para cada período.

$$P_{it} = \sum_{j \in J_i} Q_{ijt} \quad \forall i, t \quad (1)$$

$$S_{it} + B_{it} = S_{i(t-1)} - B_{i(t-1)} + P_{it} - \zeta_{it} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$\sum_i S_{it} * \alpha_i \leq \text{Capacidade total de inventário} \quad \forall t \quad (3)$$

A restrição (1) representa o balanceamento entre as quantidades totais produzidas de um determinado artigo  $i$ , em um determinado período  $t$ , e as respetivas quantidades que são produzidas em cada uma das linhas disponíveis  $j$ . A restrição (2) executa o balanceamento das quantidades produzidas, em inventário e em *backlog* de cada artigo  $i$ , no período  $t$ , de acordo com as suas quantidades em inventário e *backlog* no período  $t - 1$ , levando em conta a procura do respetivo artigo cuja data de entrega é o período  $t$ . Os

valores de  $S_{i(t=0)}$  e  $B_{i(t=0)}$  devem ser parâmetros de entrada do modelo, sendo que neste estudo foram considerados como sendo igual a zero. A restrição (3) foi adaptada do modelo de Kopanos et al. (2011), pois optou-se por trabalhar o modelo com as quantidades em toneladas. Uma vez que a capacidade total de inventário é dada em número de paletes, é necessário um fator conversor,  $\alpha_i$ , que faça a conversão de toneladas para número de paletes.

#### 4.2.1.2. Restrições de sequenciamento da produção

O processo de sequenciamento de lotes é mais complexo, e uma vez que é utilizada uma abordagem mista de tempo, o facto de existir uma grelha de tempo discretizado aumenta consideravelmente o número de variáveis binárias que têm de ser utilizadas nestas restrições. Para tal, são utilizadas 10 restrições apresentadas de seguida.

$$Y_{fjt}^F \geq Y_{ijt} \quad \forall f, i \in I_f, j \in J_f, t \quad (4)$$

$$Y_{fjt}^F \leq \sum_{i \in I_f} Y_{ijt} \quad \forall f, j \in J_f, t \quad (5)$$

$$\sum_{f' \neq f, f' \in F_j} X_{f'fjt} + WF_{fjt} = Y_{fjt}^F \quad \forall f, j \in J_f, t \quad (6)$$

$$\sum_{f' \neq f, f' \in F_j} X_{ff'jt} + WL_{fjt} = Y_{fjt}^F \quad \forall f, j \in J_f, t \quad (7)$$

$$\sum_{f \in F_j} \sum_{f' \neq f, f' \in F_j} X_{ff'jt} + 1 = \sum_{f \in F_j} Y_{fjt}^F \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$C_{f'jt} \geq C_{fjt} + T_{f'jt}^F + \gamma_{ff'j} X_{ff'jt} - \omega_{jt} * (1 - X_{ff'jt}) \quad \forall f, f' \neq f, j \in (J_f \cap J_{f'}), t \quad (9)$$

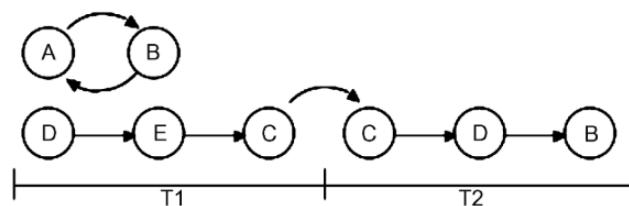
$$WF_{fjt} = \sum_{f' \in F_j} \bar{X}_{f'fjt} \quad \forall f, j \in J_f, t > 1 \quad (10)$$

$$WL_{fj(t-1)} = \sum_{f' \in F_j} \bar{X}_{ff'jt} \quad \forall f, j \in J_f, t > 1 \quad (11)$$

$$\bar{U}_{jt} + U_{j(t-1)} = \sum_{f \in F_j} \sum_{f' \in F_j, f' \neq f} \gamma_{ff'j} \bar{X}_{ff'jt} \quad \forall j, t > 1 \quad (12)$$

$$\bar{U}_{jt} + U_{jt} + \sum_{f \in F_j} T_{fjt}^F + \sum_{f \in F_j} \sum_{f' \in F_j, f' \neq f} \gamma_{ff'j} X_{ff'jt} \leq \omega_{jt} \quad \forall j, t \quad (13)$$

As restrições (4) e (5) têm como objetivo garantir que uma família apenas está atribuída a uma linha de produção em um determinado período de tempo, se pelo menos um produto pertencente a essa família é produzido nessa linha no mesmo período de tempo. As restrições (6) e (7) garantem que se uma família  $f$  está alocada a uma linha de produção  $j$  no período  $t$ , ou seja,  $Y_{fjt}^F = 1$ , então pelo menos uma família  $f'$  é produzida antes ou após esta, respetivamente. Caso a família  $f$  seja a primeira a ser produzida no respetivo período  $t$ , então não existe antecessor, pelo que  $WF_{fjt} = 1$ . Similarmente, se a família for a última do período,  $WL_{fjt} = 1$ . A restrição (8) ativa o número correto de variáveis de precedência, uma vez que o número total de variáveis de precedência, ou número de *changeovers* existentes num período, corresponde sempre ao número total de famílias produzidas nesse período menos 1. A restrição (9) pretende evitar a existência de subsequências, garantindo um tempo viável para as famílias atribuídas à mesma unidade de processamento. Basicamente, esta restrição evita a ocorrência de casos como o representado na Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Subseqüências de produção (Erdirik-Dogan & Grossmann, 2008)

As restrições (10), (11) e (12), permitem modelar a existência de *changeovers* a ocorrer durante a transição entre dois períodos diferentes, tal como representado na Figura 4.5.

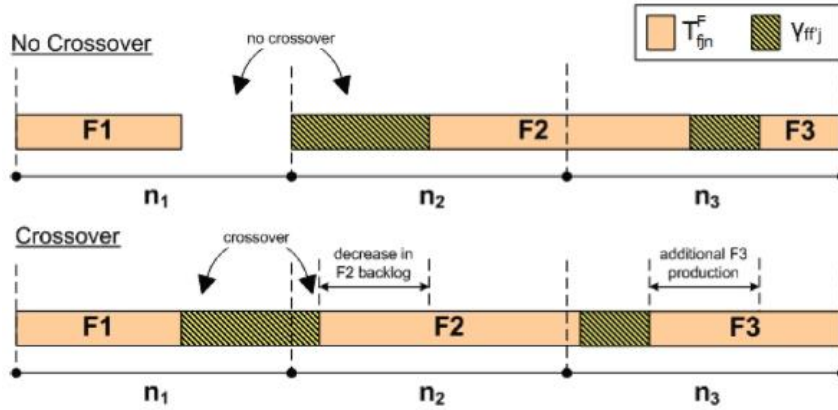


Figura 4.5. Ocorrência de *changeovers* entre períodos diferentes (Kopanos et al., 2011)

Por fim, a restrição (13) garante que o somatório de todos os tempos de produção de famílias que são processadas na linha  $j$  durante o período  $t$ , mais o somatório de todos os tempos de *changeover* existentes nessa mesma linha durante o mesmo período, não excedem a capacidade disponível da linha para o respectivo período.

#### 4.2.1.3. Restrições de dimensionamento de lotes

O dimensionamento de lotes é efetuado através de 3 restrições, as quais são ativadas sempre que o artigo  $i$ , é produzido na linha  $j$  durante o intervalo de tempo  $t$ , ou seja,  $Y_{ijt} = 1$ .

$$\rho_{ij}^{\min} * T_{ijt} \leq Q_{ijt} \leq \rho_{ij}^{\max} * T_{ijt} \quad \forall i, j \in J_i, t \quad (14)$$

$$\tau_{ij}^{\min} * Y_{ijt} \leq T_{ijt} \leq \tau_{ij}^{\max} * Y_{ijt} \quad \forall i, j \in J_i, t \quad (15)$$

$$T_{fjt}^F = \sum_{i \in I_f} (T_{ijt} + \delta_{ij} * Y_{ijt}) - \lambda_{fj} * Y_{fjt}^F \quad \forall f, j \in J_f, t \quad (16)$$

Através das restrições (14) e (15), é feito o dimensionamento de lotes consoante as quantidades mínimas e máximas de produção, e consoante as produtividades mínimas e máximas do produto  $i$  na linha  $j$ , respetivamente. A interação entre estas duas restrições é muito importante pois permite ao modelo decidir a eficiência da linha consoante as necessidades, variando as produtividades entre os valores  $\rho_{ij}^{\min}$  e  $\rho_{ij}^{\max}$ . Com a decisão



tomada nas restrições anteriores, é calculado o tempo total de produção da família  $f$ , na linha  $j$ , durante o período de produção  $t$ , a partir da restrição (16). Esta restrição foi adaptada a partir da existente no modelo de Kopanos et al. (2011), uma vez que nesta era admitido que um *setup* ocorria sempre que era produzido um produto. Como tal, existia sempre um *setup* a mais por cada família que era produzida, pelo que foi necessário eliminá-lo. Isto foi efetuado através da subtração do tempo de *setup* que é praticado na respetiva família, caso a mesma seja produzida, uma vez que dentro da mesma família, independentemente da alteração, o tempo necessário é sempre o mesmo. O objetivo da alteração efetuada é possível de observar na Figura 4.6, onde se representa o antes e depois da alteração, à esquerda e à direita, respetivamente.

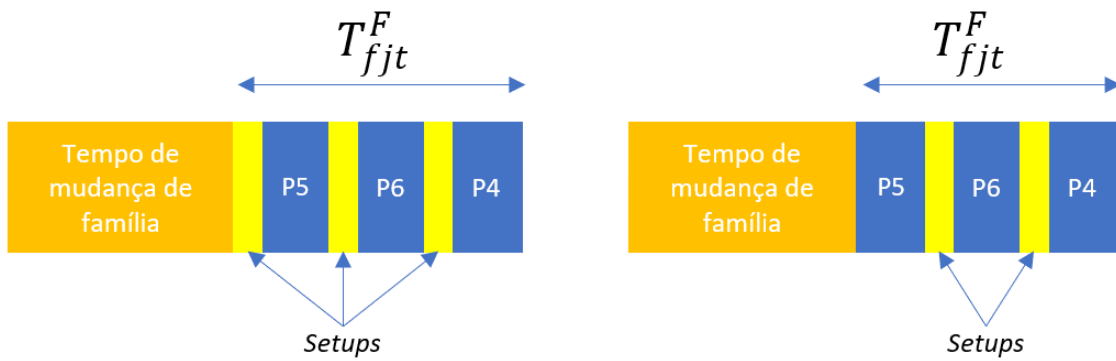


Figura 4.6. Objetivo da alteração efetuada na restrição (16)

Importa mencionar ainda que o valor de  $\tau_{ij}^{min}$  foi considerado igual a 3 horas para todos os produtos, sendo este o tempo mínimo considerado pela empresa para a produção de cada artigo em cada linha. O valor de  $\tau_{ij}^{max}$  foi calculado de acordo com as estimativas sugeridas por Kopanos et al. (2011), de acordo com a equação (17).

$$\tau_{ij}^{max} = \begin{cases} \omega_{jt} & \text{se } \sum_t \zeta_{it}/\rho_{it}^{min} \geq \omega_{jt} \\ \sum_t \zeta_{it}/\rho_{it}^{min} & \text{se } \sum_t \zeta_{it}/\rho_{it}^{min} < \omega_{jt} \end{cases} \quad (17)$$

#### 4.2.1.4. Função objetivo

O propósito da otimização é a minimização dos custos totais de inventário, *backlog* e de *changeovers*. Como tal, a função objetivo de Kopanos et al. (2011) foi adaptada, resultando na apresentada abaixo.

$$\min \sum_i \sum_t (\xi_{it} * S_{it} + \psi_{it} * B_{it}) + \sum_f \sum_{f' \neq f} \sum_{j \in (J_f \cup J_{f'})} \sum_t \varepsilon * \gamma_{ff'j} * (X_{ff'jt} + \bar{X}_{ff'jt}) \quad (18)$$

Através desta função objetivo é possível otimizar o *trade-off* entre custos de inventário, nível de serviço ao cliente e produtividade, onde  $\xi_{it}$  e  $\psi_{it}$  representam os custos de inventário e de *backlog* do artigo  $i$  no período  $t$ , respetivamente, e  $\varepsilon$  representa o custo de paragem das linhas por unidade de tempo. Contudo, uma vez que estes dados são muito subjetivos e difíceis de calcular, a utilização desta função objetivo pode não fornecer os melhores resultados caso o *trade-off* não seja bem representado.

Para o caso em estudo, uma vez que não foi possível obter dados fiáveis quanto a estes parâmetros, os valores de  $\xi_{it}$  e  $\psi_{it}$  foram estimados, sendo que  $\xi_{it}$  representa aproximadamente 10% do valor do artigo por semana, e  $\psi_{it}$  representa 2 vezes o valor do artigo. Com base nesse valor do artigo, foi calculado o valor de  $\varepsilon$  através da produtividade média das linhas. Como exemplo, caso a produtividade média das linhas seja  $x$  toneladas por minuto, então o valor de  $\varepsilon$  deverá corresponder a  $x * \text{valor do artigo}$ , obtendo assim um resultado em € por minuto.

As restrições de integralidade e não negatividade do modelo, bem como toda a nomenclatura utilizada, encontra-se no Anexo C.

### 4.3. Implementação

A funcionalidade e eficácia do modelo foi testada utilizando um *solver* comercial, IBM ILOG CPLEX, o qual apresenta um ambiente de desenvolvimento que suporta linguagem de programação de otimização, permitindo modelar matematicamente problemas de otimização, de forma simples, obtendo soluções precisas e lógicas. Este

*software* utiliza a técnica de *branch and bound*, bem como a técnica *branch and cut* e outras técnicas avançadas de resolução, executando a procura ao longo dos vários nós da árvore de decisão. A implementação do modelo neste *software* foi validada através de instâncias pequenas e respetiva análise do funcionamento de todas as restrições.

Uma vez que se trata de um problema real, a sua dimensão tende a ser bastante elevada, e como tal, a complexidade computacional aumenta, o que faz com que se torne difícil para os *solvers* comerciais como o CPLEX, atingir soluções viáveis para este tipo de dimensão, em tempo computacional aceitável. Assim, torna-se essencial encontrar formas de reduzir o espaço de resultados, caso seja possível e faça sentido tendo em conta o problema em causa, ou optar por aplicar métodos de decomposição. Algumas das formas encontradas foram implementadas e descritas no capítulo seguinte, sendo que outras foram deixadas com sugestões de futuros estudos.

Foi ainda possível identificar algumas dificuldades durante o trabalho desenvolvido, nomeadamente, ao nível de entendimento das limitações e capacidades do modelo relativamente ao sistema real, uma vez que o entendimento completo do sistema em causa, de modo a conseguir representar o mesmo no modelo, é algo que leva sempre muito tempo, e que por vezes se torna contraprodutivo. Para além disso, tal como Moniz et al. (2014) mencionou no seu estudo, apesar do grandes progressos que têm vindo a ser feitos ao nível do desenvolvimento de formulações matemáticas, a implementação de métodos de otimização tem ainda um longo caminho até se tornar em algo trivial para a aplicação industrial.



## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Análise ABC-XYZ

Foi efetuada uma análise ABC-XYZ aos dados recolhidos de modo a perceber qual a possibilidade de criar um planeamento da produção mais padronizado, obtendo assim soluções para médio/longo prazo, menos suscetíveis de sofrer alterações a curto prazo. Para tal, foram considerados os produtos ativos neste momento. Desta análise podemos concluir que existem vários produtos pertencentes à classe A que sofrem variabilidade significativa na procura, pelo que soluções de médio/longo prazo poderão não ser a melhor opção. Esta é uma situação que não é desejável pois torna todo o planeamento mais complexo e instável, uma vez que para vários produtos que são relevantes para a empresa, se torna impossível de padronizar o planeamento da produção ao longo do tempo. Para estes produtos é fundamental que exista uma eficiente relação entre a gestão de *stocks* e o planeamento da produção, de modo a reduzir impactos que esta variabilidade possa causar na disponibilidade do produto.

**Tabela 5.1.** Análise ABC-XYZ aos produtos através do *forecast*

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>X</b>	9	10	14
<b>Y</b>	2	2	0
<b>Z</b>	3	0	0

## 5.2. Resultados obtidos com o modelo apresentado na metodologia

De acordo com os dados recolhidos, nomeadamente, através dos atuais planos de produção, foi possível perceber que é produzida alguma variedade de artigos em cada linha, em cada período de tempo, o qual foi considerado como uma semana, tornando-se assim evidente a necessidade de otimizar a utilização da capacidade das linhas e os tempos de *changeover*.

As instâncias do problema foram geradas através dos dados fornecidos pela empresa, sendo que os mesmos tiveram de ser transformados, em particular, ao nível de conversão de unidades, de modo haver uniformização de unidades no modelo. Foram considerados um total de 157 produtos, correspondentes a 80 famílias diferentes, e 2 linhas de produção paralelas idênticas. Dependendo da instância, o máximo de produtos cujo *forecast* existe, e por isso é considerado, são 40 produtos correspondentes a 31 famílias diferentes, pelo que desta forma, apenas estes produtos são alvo de planeamento no modelo. De acordo com aquilo que foi possível observar nos dados da empresa, é aproximadamente este o número de produtos que são produzidos nas linhas no total de um mês. Este *forecast* é mensal, e uma vez que não foi possível obter dados acerca de datas de entrega, as mesmas foram geradas aleatoriamente ao longo dos períodos de planeamento considerados em cada instância, e dependendo da instância, é considerado um número de períodos diferente.

Apesar das 2 linhas consideradas serem idênticas, certos produtos apenas podem ser produzidos em 1 delas, sendo que isso foi algo que se pretendeu garantir no modelo, de modo a representar o sistema real. Com o objetivo de analisar a aplicabilidade do modelo em contexto real, foram feitas várias corridas, de forma a conseguir analisar não só os resultados fornecidos pelo modelo, mas também a sua capacidade de resposta em tempo útil.

As instâncias testadas possuíram as seguintes características:

I1: apenas produtos A com 2 períodos de tempo;

I2: todos os produtos com 3 períodos de tempo;

I3: todos os produtos com 4 períodos de tempo.

Através da formulação final do modelo apresentado na metodologia baseado em Kopanos et al. (2011), foi possível resolver o problema para as 3 instâncias em tempo computacional aceitável. Todas as corridas foram efetuadas num Xiaomi Mi Air 13.3 com

8GB RAM e um CPU Intel Core i5-6200U, utilizando o CPLEX Studio IDE 12.10.0. Os resultados obtidos são apresentados de seguida.

**Tabela 5.2.** Especificação dos dados utilizados na 1ª instância (I1)

<b>Produtos</b>	14
<b>Famílias</b>	11
<b>Linhas</b>	2
<b>Períodos de tempo (semana)</b>	2

**Tabela 5.3.** Resultados obtidos para a 1ª instância (I1)

<b>Restrições</b>	938
<b>Variáveis binárias</b>	999
<b>Variáveis contínuas</b>	280
<b>Erro de integridade</b>	0%
<b>Função objetivo</b>	173 550 €
<b>Tempo de computação</b>	33 segundos

Com uma procura total de 929.8 toneladas de produtos A, a solução tem 0 toneladas em *backlog*, e não tem necessidade de armazenar qualquer tipo de artigo. Isto demonstra que existe capacidade suficiente para produzir todo o *forecast* de referências A para um mês, em menos de 2 semanas. A ocupação média das linhas 1 e 2, é aproximadamente 58% e 61%, respetivamente. Daqui é possível concluir que a ocupação das linhas está abaixo daquilo que seria de esperar, contudo, a procura existente não exige que estes valores sejam maiores. Como tal, é normal e até desejável, que nesta situação a ocupação das linhas seja baixa. Esta produção requer 9 *changeovers* entre famílias diferentes, e 3 *setups* entre produtos da mesma família.

Dada a rapidez com que foi possível obter esta solução, podemos concluir que o modelo é muito responsivo quando é necessário obter um planeamento de curto prazo onde a procura é inferior à capacidade disponível das linhas.

**Tabela 5.4.** Especificação dos dados utilizados na 2ª instância (I2)

<b>Produtos</b>	40
<b>Famílias</b>	31
<b>Linhas</b>	2
<b>Períodos de tempo (semana)</b>	3

**Tabela 5.5.** Resultados obtidos para a 2ª instância (I2)

<b>Restrições</b>	6 997
<b>Variáveis binárias</b>	10 281
<b>Variáveis contínuas</b>	1 158
<b>Erro de integridade</b>	0%
<b>Função objetivo</b>	566 028 €
<b>Tempo de computação</b>	15.5 minutos

Com uma procura total de 1 340.7 toneladas, admitindo assim, portanto, todos os produtos, a solução tem cerca de 1.6 toneladas em *backlog* no final do horizonte de planeamento, e aproximadamente 1,5 toneladas de artigos em armazém. Algo que já se começa a ver nesta instância, é que a quantidade em armazém vai variando ao longo dos períodos. Ou seja, existem produtos para os quais as datas de entrega são em períodos posteriores à sua produção, contudo, devido aos *trade-offs* existentes, é mais vantajoso produzir esses produtos em períodos anteriores, mantendo os mesmos em armazém até à sua data de entrega. A ocupação média das linhas 1 e 2, é aproximadamente 87% e 50%, respetivamente. Podemos observar que o valor médio de ocupação da linha 1 é bastante elevado, havendo inclusive um período em que se forem contabilizados os tempos de



mudança entre artigos, a taxa de ocupação da linha é de 100%, sendo que isto se pode dever ao facto de existirem vários artigos que apenas podem ser produzidos na linha 1. Para além disso, o facto de os rolos de cozinha apenas poderem ser produzidos na linha 2, e os tempos de *changeover* entre rolos de cozinha e papel higiénico serem elevados, faz com que a linha 1 seja privilegiada, reduzindo os custos de *changeover*, demonstrando o bom funcionamento do modelo. Isto vai de encontro ao sistema real, onde a linha 1 tem sempre mais carga do que a 2. Esta produção requer 27 *changeovers* entre famílias diferentes e 4 *setups* entre produtos da mesma família.

Nesta solução, é importante referir que, a partir da análise dos resultados obtidos, podemos concluir que os artigos que se encontram em *backlog* não se devem à falta de capacidade das linhas, mas sim devido ao *trade-off* existente entre custos de *backlog*, inventário e *changeovers*, presente na função objetivo. Nesta solução foi também possível perceber que devido a este mesmo *trade-off*, podem existir famílias de produtos que sejam produzidas mais do que uma vez ao longo do horizonte temporal, em períodos diferentes. Isto deve-se ao facto de que produzir uma quantidade de material que apenas será entregue num período seguinte, se torna mais caro, devido aos custos de armazenamento, do que produzir a mesma família mais do que uma vez ao longo do horizonte temporal. Contudo, e no caso em estudo, isso poderá ser uma limitação do modelo a qual pode ser resolvida através da introdução de restrições sugeridas, as quais serão estudadas adiante.

Relativamente ao tempo computacional, e considerando o horizonte de planeamento em causa, pode-se considerar que o modelo se mantém bastante responsivo conseguindo atingir soluções ótimas.

**Tabela 5.6.** Especificação dos dados utilizados na 3ª instância (I3)

<b>Produtos</b>	40
<b>Famílias</b>	31
<b>Linhas</b>	2
<b>Períodos de tempo (semana)</b>	4

**Tabela 5.7.** Resultados obtidos para a 3ª instância (I3)

<b>Restrições</b>	9 368
<b>Variáveis binárias</b>	13 727
<b>Variáveis contínuas</b>	1 544
<b>Erro de integridade</b>	0%
<b>Função objetivo</b>	644 498 €
<b>Tempo de computação</b>	2.18 horas

Com uma procura de 1 340.7 toneladas, a solução tem aproximadamente 0.65 toneladas em *backlog* e um total de 7.4 toneladas de produto acabado em armazém, no final do último período. A quantidade que se encontra em *backlog*, já provém de períodos anteriores. A ocupação média das linhas 1 e 2, é 67% e 47% respetivamente. Esta produção requer 28 *changeovers* entre famílias diferentes e 6 *setups* entre produtos da mesma família.

Tal como na instância anterior, certos artigos encontram-se em *backlog* devido à mesma razão. Nesta instância, a ocupação média das linhas é bastante baixa, pelo que o *backlog* de um artigo nunca deveria ser transferido de um período para o outro. No entanto, nesta solução, o *backlog* existente no final do horizonte de planeamento, provém de períodos anteriores. Esta limitação na modelação será abordada no capítulo seguinte.

Outra limitação que podemos encontrar nesta instância, é que o modelo obriga a que exista produção de pelo menos um artigo em cada período. Devido a essa limitação, no período 4, na linha 2, é produzido um artigo cujo *forecast* para esse período não existe. Desta forma, podemos concluir que para a produção desta procura, o horizonte temporal necessário é inferior ao considerado. Contudo, o número de períodos utilizados para o planeamento é considerado um parâmetro de ajuste pelo planeador, o que permite anular esta limitação.

O tempo necessário para alcançar uma solução aumenta significativamente relativamente à instância anterior, em grande parte, devido ao aumento de um período de planeamento, contudo, o mesmo mantém-se aceitável tendo em conta o horizonte de planeamento em estudo. Para além disso, a demora em encontrar uma solução para esta instância também se deve, em parte, à qualidade dos dados. Isto é, uma vez que a capacidade

disponível é muito superior à necessária para a satisfação da procura, o espaço de soluções aumenta consideravelmente, o que faz aumentar o número de soluções diferentes que podem ser escolhidas. Como tal, previamente à corrida da otimização, e de modo a não perder tempo valioso, é sugerido que se efetue uma breve análise à capacidade necessária para a produção da procura em causa, de modo a esta ir de encontro às necessidades reais, escolhendo assim um horizonte temporal mais adequado. De referir ainda que, caso se pretenda um resultado mais rápido, pode-se obter soluções com um erro de integridade de 3% em aproximadamente 1.5 horas, e com um erro de integridade de 5% em cerca de 1 hora.

Comparando as três corridas, é possível perceber que todas elas são capazes de fornecer resultados em tempo útil, considerando os horizontes de planeamento em causa, atingindo a solução ótima. Desta forma, é possível concluir que independentemente de a necessidade ser um planeamento de muito curto prazo, como por exemplo, uma semana, ou um planeamento de médio prazo, como por exemplo, 1 mês, o modelo em questão é capaz de fornecer soluções viáveis em tempo computacional aceitável para os planeadores da empresa, e para os dados em causa.

Com o aumento do número de produtos e de períodos de tempo ao longo das instâncias consideradas, o problema aumenta significativamente a sua complexidade e tempo de resolução, uma vez que o número de variáveis binárias aumenta consideravelmente. Contudo, tendo em conta o período de tempo para o qual o planeamento é efetuado, o tempo computacional mantém-se aceitável.

No que toca a rácios entre tempos de *changeover* e *setup* face a tempos de produção, estes valores situam-se em aproximadamente 4% para a instância 1, e 7% para as instâncias 2 e 3. Estes valores são indicadores positivos tendo em conta a quantidade de produtos produzidos em cada uma das instâncias, visto que um dos objetivos é minimizar estes tempos, mantendo o compromisso do *trade-off* em causa. O aumento deste valor da 1ª instância para as outras deve-se ao facto de que o número de produtos considerados no planeamento aumentou significativamente, pelo que é normal o aumento destes tempos de paragem. O facto destes valores serem baixos pode significar a produção de lotes maiores, levando a maiores quantidades de produto em armazém, no entanto, esses valores serão geridos de acordo com o que *trade-off* presente na função objetivo.

### 5.3. Extensão para restringir a transferência de *backlog* entre períodos e resultados obtidos

Um dos problemas encontrados com a formulação de Kopanos et al. (2011) na resolução deste caso de estudo está relacionado com a existência de ordens de artigos em quantidades muito pequenas, pelo que essas quantidades têm tendência a ficar em *backlog* ao longo dos períodos, apesar de existir capacidade disponível para as produzir. Isto ocorre uma vez que, como essas quantidades são muito pequenas, os custos de *backlog* são pequenos quando comparados com os custos de *changeover* necessários para produzir esse produto. Como tal, foi necessário adicionar uma extensão ao modelo que evitasse a ocorrência dessa situação. A solução encontrada foi a adição de uma restrição que não permita que um artigo esteja em *backlog* em um período, se já esteve em *backlog* no período anterior. Desta forma, uma vez que o produto terá de ser obrigatoriamente produzido ao longo do horizonte temporal, o mesmo só ficará em *backlog* durante um período, se efetivamente for vantajoso, em termos de função objetivo, que isso ocorra.

As restrições (19) e (20), têm como objetivo, portanto, evitar que um artigo permaneça em *backlog* durante mais do que um período seguido, sendo que estas permitem reduzir o espaço de resultados, o que poderá fazer com que seja possível obter soluções de forma mais rápida, ainda que o número de variáveis binárias aumente.

$$B_{it} \leq M * X_{back_{it}} \quad i, t \quad (19)$$

$$X_{back_{it}} + X_{back_{i(t-1)}} \leq 1 \quad i, t > 1 \quad (20)$$

Nestas restrições,  $M$  representa um número muito grande, e  $X_{back_{it}}$  é uma variável binária que representa se no período  $t$  existe ou não *backlog* do artigo  $i$ .

Após a introdução destas restrições, foram corridas novamente as 3 instâncias anteriores de modo a perceber como é que esta restrição poderia afetar não só os resultados, mas também a capacidade de obtenção de soluções pelo modelo.

Relativamente à primeira instância, a solução manteve-se exatamente a mesma, o que seria de esperar, uma vez que a solução anterior já não continha qualquer tipo de *backlog*. Quanto ao tempo de computação, este também se manteve aproximadamente igual.

Para a segunda instância, foi obtida a solução ótima após cerca de 10.5 minutos, o que permitiu reduzir o tempo de computação em aproximadamente 5 minutos. Quanto à solução em si, o resultado manteve-se aproximadamente igual, tendo aumentado apenas de 566 028 € para 567 163 €, comparativamente à solução previamente obtida. Este aumento era expectável uma vez que as restrições impostas anularam o espaço de resultados onde era obtida a solução ótima anterior. No que toca ao *backlog*, o mesmo foi reduzido de 1.6 para 1.2 toneladas. A continuação de existência de *backlog* deve-se ao facto de que alguns dos produtos que têm procura em quantidade muito pequena, têm como data de entrega o último período. Desta forma, as novas restrições não conseguem evitar esta situação uma vez que o *backlog* se situa apenas no último período, sendo isto chamado de *end-effect* do modelo. Devido a estas restrições também, as quantidades em inventário aumentaram, sendo que isto se deve à existência de quantidades mínimas de produção. Ou seja, uma vez que os artigos cuja procura é muito pequena são agora obrigados a serem produzidos desde que a sua procura não se situe no último período, e essa procura é normalmente abaixo das quantidades mínimas de produção,  $\tau_{ij}^{min}$ , a restante quantidade que é produzida fica em armazém. No entanto, isso não é necessariamente mau para artigos cuja procura, apesar de pequena, existe de forma constante e periódica, como por exemplo, artigos C-X. Quanto à ocupação média das linhas, a mesma aumentou para 91% e 58% na linha 1 e 2 respetivamente, mostrando assim que a implementação desta restrição também prima por maximizar a utilização das linhas. Para além disso, o rácio da quantidade de tempo gasto em *changeovers* e *setups* face aos tempos de produção, baixou para os 6%.

No que à 3ª instância diz respeito, a solução foi obtida em 3.5 horas, ou seja, cerca de 1.2 horas a mais do que considerando o modelo sem as novas restrições. Este aumento poderá dever-se ao facto de que, devido às novas restrições, o número de famílias produzidas aumenta, visto que o *backlog* no final da solução é de zero toneladas, e uma vez que a capacidade disponível é muito grande, o leque de combinações de sequenciamento a serem testadas cresce consideravelmente. No que toca à solução, o valor obtido aumentou de 644 498 € para 658 502 €. Isto representa um aumento de 2%, pelo que o mesmo não é muito significativo quando comparado com a possível perda de clientes devido ao *backlog* que possa advir da 1ª solução. Nesta instância, é possível perceber que a inexistência de *backlog* se deve às novas restrições e ao facto de que os produtos que têm de ser entregues

no final do último período, têm uma procura muito grande, o que faz com que o custo de os deixar em *backlog* seja maior do que não os produzir, permitindo assim perceber que o *trade-off* considerado na função objetivo está a funcionar bem. Quanto a produtos em inventário, as quantidades vão variando ao longo dos períodos, havendo vários produtos cuja procura é produzida em períodos prévios à data de entrega, chegando ao final do horizonte de planeamento com uma quantidade total de cerca de 11 toneladas. Relativamente a taxas de utilização das linhas 1 e 2, os valores mantiveram-se sensivelmente iguais, no entanto esta solução privilegia a linha 2, ao contrário da solução previamente obtida. Isto pode-se dever ao facto de que os itens que anteriormente não eram produzidos, e que agora são, geram melhores *trade-offs* em termos de tempos de *changeover* na linha 2, e desta forma, obtém-se melhores soluções caso se opte por privilegiar esta linha. Como seria de esperar, uma vez que são produzidos mais produtos diferentes, em quantidades pequenas, a taxa de tempos de *changeover* e *setup* face ao tempo produtivo aumentou para 9%.

Das 6 corridas a partir das 3 instâncias anteriores, podemos concluir que o modelo baseado no estudo de Kopanos et al. (2011) apresentado na metodologia se adapta ao problema em causa, no entanto, o mesmo necessita de algumas extensões de modo a representar o sistema com maior fidelidade, sendo uma dessas extensões a desenvolvida e apresentada. Pode-se ainda concluir que é muito importante que a escolha do número de períodos de tempo considerados seja efetuada de forma cautelosa e com alguma análise prévia, uma vez que escolher um número de períodos superior ao necessário para a satisfação da procura, pode gerar soluções menos razoáveis e aumentar consideravelmente o tempo computacional para a sua obtenção, tal como é possível observar por comparação das corridas efetuadas através da instância I2 e I3. Pode-se então concluir que para o caso em estudo, apesar da procura considerada corresponder ao *forecast* mensal, o melhor resultado foi obtido na corrida da 2<sup>a</sup> instância após a introdução das novas restrições, uma vez que é a que tem o melhor valor da função objetivo dentro das soluções que cumprem com o maior número de imposições do sistema real até agora consideradas.

Na Figura 5.1 e Figura 5.2, é possível observar o Diagrama de Gantt desta solução para o sequenciamento da produção das diferentes famílias ao longo do horizonte de planeamento, para a linha de produção 1 e 2, respetivamente. As barras amarelas representam os tempos de *changeover*. Os perfis de produção de cada família são possíveis

de observar na Figura 5.3, e na Figura 5.4 podemos observar uma análise de custos efetuada por período. Na Tabela 5.8 pode-se observar o perfil de custos obtido na função objetivo.

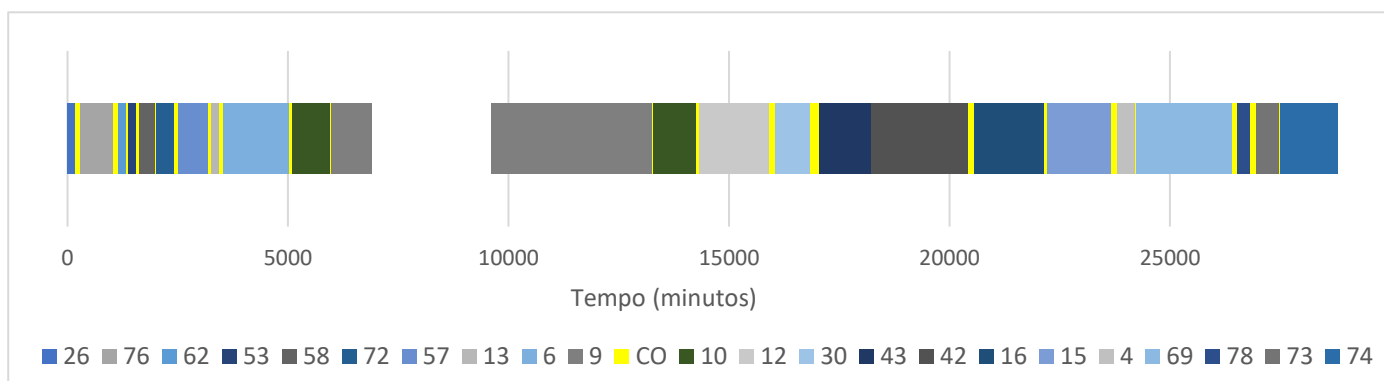


Figura 5.1. Sequenciamento de famílias para a linha doméstica 1

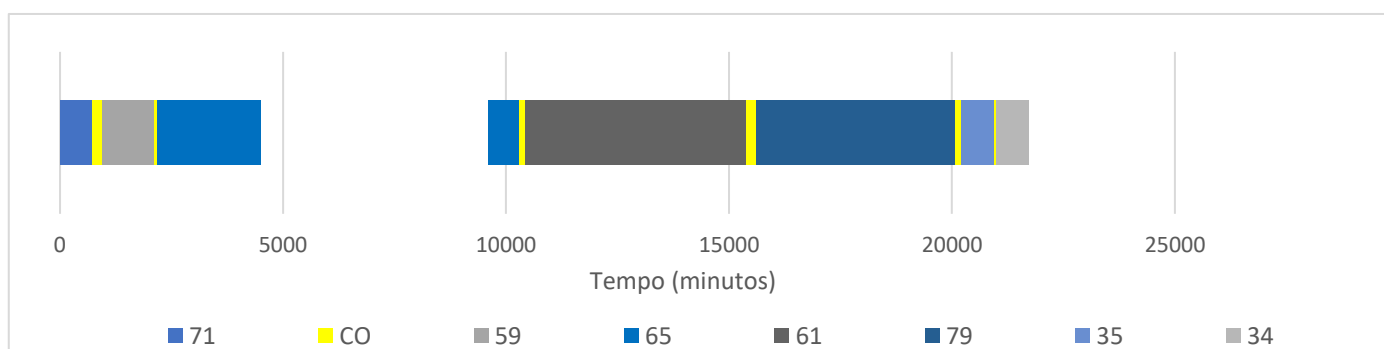


Figura 5.2. Sequenciamento de famílias para a linha doméstica 2

Através da observação dos diagramas acima, é possível observar que a linha de produção 1 tem uma utilização muito superior, uma vez que esta apenas está livre no final da primeira semana de planeamento, enquanto a linha 2 tem bastante tempo livre na primeira e na última semana de planeamento. Isto deve-se às razões já mencionadas de o sistema privilegiar a utilização da linha 1.

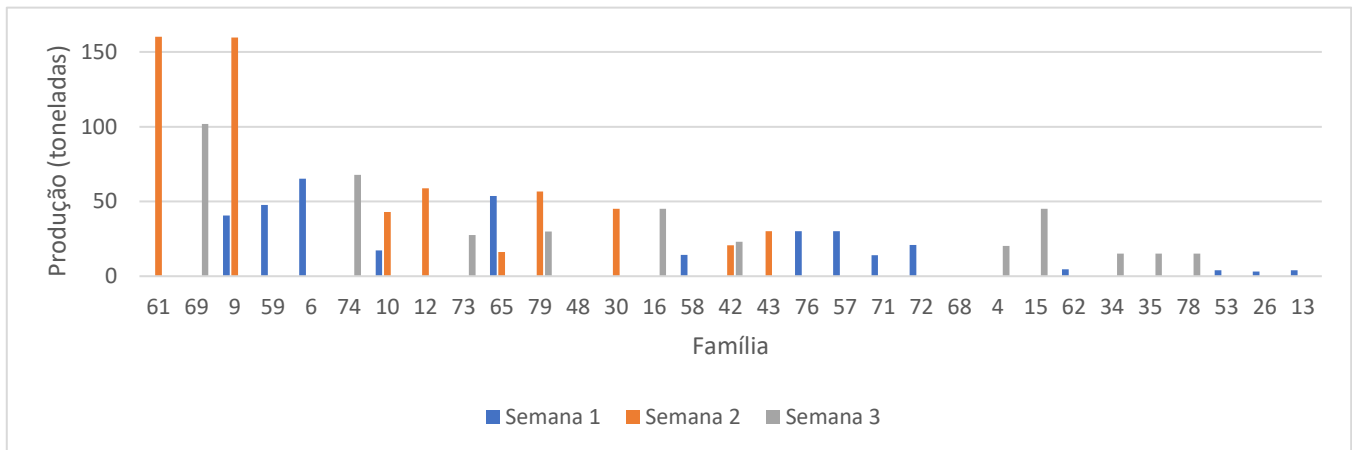


Figura 5.3. Perfis de produção de cada família por período

A partir da observação da figura acima e das anteriores, é possível perceber que grande parte da produção é efetuada no período 2, significando que a maioria da procura deve estar localizada no 2º e 3º períodos, o que pôde ser corroborado pelos dados de entrada. É ainda possível perceber que existem famílias que são produzidas em 2 períodos diferentes, sendo que em alguns dos casos se deve à produção durante a transição de períodos, no entanto, no caso da família 10, deve-se ao facto do modelo não limitar a produção de uma família a uma vez durante todo o horizonte temporal.

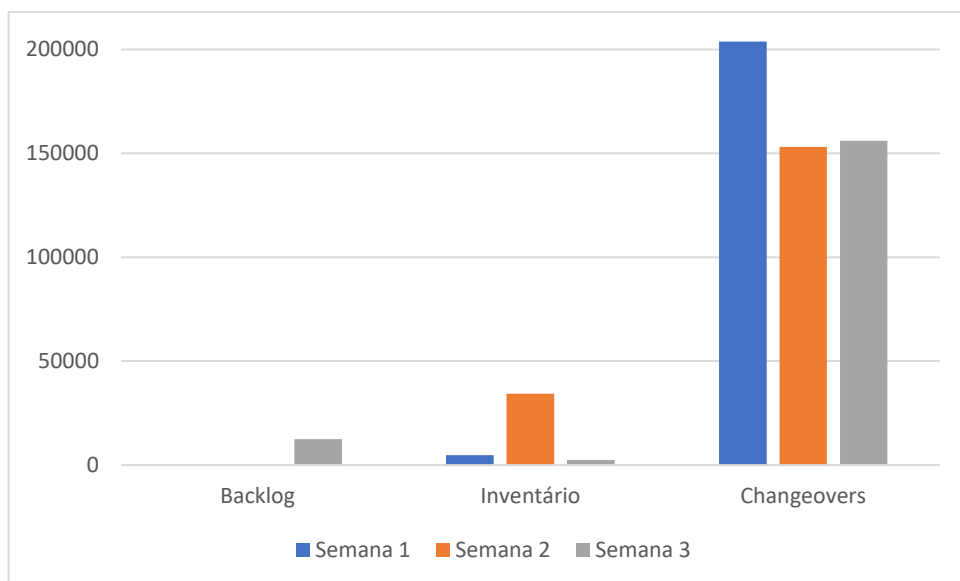


Figura 5.4. Perfil de custos por período



Da análise do gráfico anterior, podemos perceber que os custos de *backlog* apenas ocorrem no período 3, uma vez que o modelo não evita que isto ocorra quando a procura se situa no último período. Relativamente aos custos de inventário, os mesmos aumentam significativamente no período 2, pelo que indo de encontro àquilo que foi dito anteriormente, grande parte da produção é efetuada no 2<sup>a</sup> período de modo a conseguir satisfazer as datas de entrega do período seguinte. Quanto aos custos de *changeover*, são semelhantes no 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> período, contudo, no 1<sup>o</sup> período são significativamente mais elevados, uma vez que apesar da produção neste período ser inferior aos restantes, a variedade de produtos diferentes que se produz é mais elevada.

**Tabela 5.8.** Perfil da função objetivo

<b>Custos de backlog</b>	<b>Custos de inventário</b>	<b>Custos de <i>changeover</i></b>
2.2%	7.4%	90.4%

Pela tabela anterior é possível concluir que a maioria dos custos são resultantes dos *changeovers*, sendo que isto se deve ao facto de que existe capacidade disponível para a produção de toda a procura em todos os períodos. Caso contrário, os custos de *backlog* e de inventário poderiam ser consideravelmente maiores, alterando o perfil destas percentagens.

Por comparação com planeamentos da produção anteriores, onde o número de produtos diferentes produzidos em 3 semanas ronda os 21, e uma quantidade total de aproximadamente 1500 toneladas, podemos concluir que o modelo apresentado consegue fornecer soluções equivalentes ou melhores que o atual sistema utilizado. Isto porque para a instância apresentada:

- a. O número de produtos diferentes produzidos é significativamente superior, 38 para ser mais preciso, o que significa maiores tempos de *changeover*;
- b. Quantidade total produzida é de aproximadamente 1350 toneladas, e a capacidade que ainda fica disponível nas linhas seria suficiente para produzir a quantidade total de 1500 toneladas ou até mais.

Contudo, isto só poderia ser comprovado através da aplicação em sistema real.

### 5.3.1. Limitações da extensão aplicada e possíveis soluções

A restrição implementada para garantir que não há transferência de *backlog* de um período para o outro, não impede que artigos com procura muito pequena no último período continuem sem ser produzidos quando na verdade há capacidade para tal. Isto ocorre, pois, para o horizonte de planeamento em causa, a solução ótima é efetivamente a existência de *backlog* tendo em conta o *trade-off* existente entre custos de inventário, *backlog* e *changeovers*. Para solucionar este problema bastaria que nos dados de entrada, nunca existisse artigos com procura demasiado baixa no último período. Contudo, se isso for impossível, e dependendo da opinião dos planeadores, existem três soluções em vista.

Na primeira, deve ser aceite o resultado tal como ele é, ou seja, a existência de *backlog* desses artigos no último período. Desta forma, esses produtos devem ser colocados em planeamento no próximo horizonte temporal de modo a garantir que são produzidos. Com esta opção, existe o risco de o produto estar em *backlog* durante 3 períodos de tempo, no máximo.

Na segunda, o planeador pode adicionar um período ao horizonte de planeamento sem qualquer tipo de procura. Desta forma, garante que o produto é produzido pois o mesmo não pode estar em *backlog* nesse último período devido às restrições (19) e (20). Contudo, nesse último período adicionado terá de ser produzido um produto adicional em cada linha cuja procura pode nem existir, ou pode corresponder ao produto em *backlog*, dependendo dos resultados da otimização. Isto ocorre uma vez que o modelo em causa tem como limitação de que pelo menos um produto tem de ser produzido em cada linha em cada período, sendo que a adição de uma extensão que evitasse isso poderia resolver o problema. Essa extensão seria essencial uma vez que a produção desse novo produto poderá alterar aquela que era a solução ótima do problema real. Nesta abordagem, a adição de um período adicional irá aumentar o número de variáveis binárias, e consequentemente, poderá aumentar o tempo computacional para obter soluções.

A terceira, passa pela implementação da restrição (21), estudada mais à frente, com um valor de  $L = 0$ . Esta solução apenas pode ser utilizada em casos em que a capacidade disponível seja suficiente para produzir toda a procura do horizonte temporal, sem *backlog* em qualquer um dos períodos. Para além disso, a introdução desta restrição

poderá fazer com que certos artigos que ficariam em *backlog* em determinados períodos na solução ótima, deixem de ficar alterando a solução obtida.

Nenhuma destas soluções é ótima visto que podem ocorrer duas situações:

- a. tempo computacional para obter uma solução pode aumentar;
- b. a solução obtida pode ser diferente daquela que seria a solução ótima.

Contudo, e caso exista poder computacional, a segunda opção, acompanhada de uma extensão ao modelo que permita que existam períodos sem qualquer tipo de produção, pode ser a melhor em termos de obtenção de uma solução viável.

#### **5.4. Testes ao modelo com sistema em sobrecarga**

Como podemos observar, todas as instâncias consideradas a partir dos dados fornecidos pela empresa, têm em comum que a procura é sempre inferior à capacidade disponível. Como tal, o *backlog* que surge nessas soluções não se deve à falta de capacidade de resposta, mas sim ao *trade-off* existente que faz com que deixar produtos em *backlog* seja mais barato do que os produzir. Desta forma, e para conseguir analisar melhor o modelo, foram criadas instâncias nas quais a procura excede ou é muito próxima da capacidade disponível das linhas, obrigando assim a que o *backlog* se deva à falta de capacidade. As instâncias geradas foram as seguintes:

I4: apenas produtos A com 2 períodos de tempo com procura no 1º período a exceder a capacidade das linhas;

I5: produtos A+B com 3 períodos de tempo com procura no 1º e 3º períodos a exceder a capacidade das linhas;

I6: apenas produtos A com 2 períodos de tempo com procura no 2º período a exceder a capacidade das linhas;

I7: produtos A+B com 3 períodos de tempo com procura no 3º período a exceder a capacidade das linhas.

Para estas instâncias foi utilizado o modelo com todas as alterações efetuadas e apresentadas até agora. Não foram considerados o total dos produtos presentes no *forecast* mensal uma vez que também não se considerou o total dos períodos para um mês. Desta forma, foi utilizado um número de produtos condizente com o número de períodos considerados, de acordo com aquilo que é o atual estado do planeamento da empresa. Na

instância I4, o modelo foi incapaz de fornecer soluções razoáveis em tempo computacional aceitável, sendo que o melhor que foi possível obter foi um erro de integridade de aproximadamente 20% em 9 horas. Tendo em conta a dimensão da instância considerada, o tempo de computação é demasiado elevado para dar resposta às necessidades da empresa. Para a instância I5, o erro de integridade também se manteve sensivelmente igual para um tempo de computação de 8 horas, indicando que o modelo tem bastante dificuldade em fornecer boas soluções quando a capacidade das linhas não é suficiente para satisfazer a procura sem *backlog*. Como tal, várias extensões podem ser adicionadas ao modelo para reduzir o espaço de resultados e assim obter soluções em tempo computacional aceitável, contudo, para este tipo de dados é sempre difícil que os modelos forneçam boas soluções de forma rápida devido aos complexos *trade-offs* existentes.

É ainda importante referir que esta limitação pode ser devida à qualidade dos dados utilizados, uma vez que o *trade-off* presente na função objetivo entre custos de inventário, *backlog* e *changeovers* pode não estar representado da forma mais correta, devido às razões já mencionadas no capítulo da metodologia aquando da explicação da função objetivo. De mencionar ainda que o mesmo pode estar a ocorrer para as soluções obtidas nas instâncias com dados de procura reais.

Para a instância I6, foi possível atingir a solução ótima em apenas 35 segundos, e para a instância I7 em aproximadamente 11 minutos. A rapidez com que se consegue obter soluções nestas instâncias, ao contrário das anteriores, deve-se ao facto de que apesar da capacidade das linhas não ser suficiente para satisfazer a procura do período respetivo, existe capacidade suficiente para satisfazer essa procura sem existir *backlog*, uma vez que períodos anteriores têm capacidade disponível para produzir e armazenar em *stock* a procura de períodos seguintes. Como seria de esperar, a quantidade de inventário que transita entre períodos nestas instâncias é muito grande, de modo a conseguir satisfazer a procura de períodos seguintes sem *backlog*.

Podemos assim concluir que, quando a decisão mais significativa é apenas entre os custos de inventário e os custos de *changeover*, uma vez que há possibilidade de não existir *backlog*, o modelo consegue manter a sua resposta em tempo computacional bastante aceitável. Isto ocorre porque na função objetivo os custos de *backlog* têm sempre tendência a ser maiores do que os restantes, devido ao valor utilizado para esses custos em € por

tonelada, e como tal, se houver possibilidade de os mesmos não existirem, a decisão fica entre custos de inventário e *changeovers*. No entanto, quando a decisão mais importante fica entre os custos de *backlog* e *changeovers*, o modelo tem bastante dificuldade em fornecer soluções como é possível perceber pela instância I4 e I5, uma vez que nestas é impossível que não exista artigos em *backlog*.

#### 5.4.1. Aplicação de extensão para responder a casos de sobrecarga do sistema

Uma das extensões mais simples que pode ser adicionada de forma a melhorar o problema encontrado nas instâncias I4 e I5, e que foi testada no modelo, é limitar o número de artigos diferentes em *backlog*, por período. Ou seja, se limitarmos, por exemplo, o número em artigos em *backlog* por período a 1 único artigo, o espaço de soluções diminui drasticamente, permitindo obter assim soluções muito mais rapidamente. Essa restrição foi adicionada ao modelo tal como representado na equação (21).

$$\sum_i Xback_{it} \leq L, t \quad (21)$$

Contudo, esta restrição pode reduzir o espaço de resultados tão drasticamente que faça com que deixe de existir soluções possíveis, ou que as mesmas deixem de fazer sentido para a empresa, pelo que o valor de  $L$  deve ser considerado um parâmetro de ajuste do modelo, podendo assim o planeador relaxar a restrição conforme necessário. Após a introdução desta restrição no modelo, as instâncias I4 e I5 foram novamente testadas de modo a perceber o impacto resultante. Para tal, foi considerado um valor de  $L$  igual a 2.

Quanto à instância I4, foi possível obter a solução ótima em 1.5 horas, sendo que ao final de 1 hora já tinham sido obtidas soluções com 3% de erro de integridade, e ao final de aproximadamente 30 minutos já tinham sido obtidas soluções com um erro de integridade de 5%. Como seria de esperar, temos dois artigos em *backlog* para esta solução no final do 1º período, sendo que no 2º período, uma vez que há capacidade disponível, o sistema consegue recuperar. Relativamente à instância I5, muito devido à sua dimensão, continuou a não ser possível atingir a solução ótima em tempo computacional aceitável, contudo, ao

final de 7 horas foi possível obter soluções com um erro de integridade na ordem dos 5%, e soluções com um erro de integridade de 6% em 3 horas.

Conclui-se que esta restrição pode ter um impacto muito positivo na obtenção de soluções para os casos em que a capacidade disponível não é suficiente para satisfazer a procura sem existência de artigos em *backlog*. No entanto, para casos em que isso não ocorra, esta restrição pode, ou não, ser relaxada, dependendo do caso em particular e dependendo das opções tomadas pela empresa, uma vez que ao não relaxar esta restrição para esses casos, pode-se obter soluções diferentes daquela que é efetivamente a solução ótima para o problema.

### 5.5. Replicação de um planeamento da produção da empresa

Uma vez que os dados apresentados no *forecast* podem não corresponder à realidade futura, foi desenvolvida uma instância a partir de um plano de produção antigo, de modo a tentar replicá-lo em termos de produtos e quantidades produzidas. O valor resultante da função objetivo não é suscetível de comparação, uma vez que não existem dados relativamente aos custos incorridos para esse plano de produção, contudo, existem alguns dados que são possíveis de comparar, nomeadamente, os apresentados na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9.** Comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e o plano existente

		Ocupação média	Tempo total de <i>changeovers</i>
Plano antigo	Linha 1	52%	2235 minutos
	Linha 2	53%	
Modelo	Linha 1	76%	1810 minutos
	Linha 2	77%	

É possível concluir que para a solução obtida, a ocupação média das linhas é significativamente superior à apresentada no plano de produção da empresa. Contudo, esta

diferença deve-se ao facto de que para estes cálculos, a empresa considera uma eficiência fixa da linha de 55%, quando na verdade esta pode variar. Já o modelo, permite que a eficiência varie entre 30% e 65%, que foram os valores considerados para o cálculo de  $\rho_{ij}^{min}$  e  $\rho_{ij}^{max}$ , respetivamente. Assim, é expectável que a ocupação média das linhas possa ser superior nos planos obtidos no modelo. Isto ocorre neste caso pois existe capacidade disponível para a produção de todos os artigos sem necessidade de a linha estar a funcionar na sua eficiência considerada máxima, neste caso, 65%. Desta forma, e uma vez que as quantidades produzidas de cada artigo são iguais, em contexto real de produção a ocupação média das linhas para o plano obtido no modelo deverá ser aproximadamente igual aos valores do plano de produção da empresa.

O que se torna mais interessante nestes resultados é que os tempos de *changeover* foram reduzidos na ordem dos 20% no plano obtido pelo modelo, mantendo a satisfação das datas de entrega sem *backlog*, sendo este um excelente indicador visto que a redução destes tempos é um dos objetivos. Isto foi conseguido através de alteração da sequência pela qual é realizada a produção.

Esta instância considerou 3 períodos, representando cada um deles 1 semana, e um total de 21 artigos diferentes. A solução ótima foi encontrada ao fim de 2 minutos, demonstrando mais uma vez que este modelo tem grande potencial de ser aplicado com sucesso no planeamento da produção da fábrica. O modelo utilizado para a obtenção desta solução contém todas as restrições mencionadas na metodologia, bem como as desenvolvidas e apresentadas neste capítulo, tendo sido considerado um valor de  $L = 0$ , uma vez que através de cálculos simples é possível perceber que o sistema tem capacidade para satisfazer a procura sem a existência de *backlog*.

## 5.6. Sugestões de futuros estudos e aplicação de extensões

Para além das extensões já adicionadas ao modelo de Kopanos et al. (2011), existem várias outras que podem ser adicionadas tendo em conta o problema em causa, de modo a reduzir o espaço de resultados, podendo obter soluções de forma mais rápida, e de modo a representar o sistema real com maior fidelidade.

Uma das extensões que se pode adicionar é, alterar a quantidade mínima de produção de artigos MTO para zero, e implementar a restrição (22), a qual implica que se o produto pertence a uma lista de itens MTO, isto é, se o artigo pertence ao conjunto  $I_{MTO}$ , então aquilo que pode ser armazenado desse produto em cada período é igual a zero. Isto permite reduzir o espaço de resultados uma vez que o valor da variável  $P_{it}$  se torna mais restrito, como é possível perceber por análise das equações (2) e (22), contudo, o mais interessante desta restrição é que faz com que o modelo represente o sistema real de forma mais exata.

$$S_{it} = 0 \quad \forall i \in I_{MTO}, t \quad (22)$$

Contrariamente aos itens MTO, pode ser aplicada uma extensão de modo a que os *stocks* mínimos de cada um dos artigos MTS seja respeitado. Para tal, basta aplicar a restrição (23), onde  $\kappa_i^{min}$  representa a quantidade mínima que deve existir em armazém do artigo  $i$ , e  $I_{MTS}$  representa o conjunto de artigos que são produzidos numa lógica MTS. Para aplicar esta restrição é fundamental ter conhecimento da quantidade existente de cada produto  $i$  em armazém no início do primeiro período de planeamento,  $S_{i(t=0)}$ , e é fundamental que os valores de  $\kappa_i^{min}$  estejam bem definidos. Uma vez que não foi possível adquirir dados de  $S_{i(t=0)}$ , e os valores de  $\kappa_i^{min}$  não estão bem definidos, esta restrição não foi utilizada neste estudo. Como tal, é sugerido como futuro estudo para esta empresa um trabalho na área das quantidades mínimas em armazém.

$$S_{it} \geq \kappa_i^{min} \quad \forall i \in I_{MTS}, t \quad (23)$$

Outra extensão que poderá ser alvo de estudo, é a criação de um conjunto de transições proibidas entre famílias. A aplicação desta extensão dependerá da existência, ou não, dessas mesmas transições proibidas, contudo, a sua aplicação permitiria reduzir consideravelmente o número de variáveis binárias, e consequentemente, o espaço de resultados. Em conjunto com esta extensão, deveria ser efetuada uma análise aprofundada de modo a estudar a possibilidade de mais artigos apenas poderem ser produzidos em uma



das linhas de produção, uma vez que os dados através dos quais foi feita essa análise são pouco explícitos e difíceis de entender, e como tal, os resultados poderão não ter sido os melhores. Semelhante ao efetuado nessa análise, deveria ser também analisada a possibilidade de reduzir o número de famílias, uma vez que pela mesma razão, os resultados poderão não ter sido os melhores.

Do ponto de vista da empresa, para além de reduzir o espaço de resultados, uma extensão que também poderá ser interessante é a criação uma lista de produtos cujo *backlog* não pode existir, caso contrário, os prejuízos a longo prazo podem ser muito maiores do que os prejuízos de ter de incluir o artigo no planeamento da produção a curto prazo. Esta extensão pode ser adicionada através da restrição (24) onde  $I_{BL}$  representa o conjunto de artigos cujo *backlog* não pode existir.

$$B_{it} = 0 \quad \forall i \in I_{BL}, t \quad (24)$$

A não imposição de que uma família apenas pode ser produzida uma vez ao longo do horizonte temporal em causa poderá ser uma limitação mais difícil de resolver, uma vez que a mesma família deve ter a possibilidade de ser produzida em períodos diferentes. Contudo, isso só deve acontecer se ocorrer na transição entre períodos, tal como acontece para a família 42 na Figura 5.1. Não se trata de uma restrição obrigatória, no entanto, em sistemas reais como o que está a ser estudado, existe tendência a que uma família de artigos não seja produzida mais do que uma vez num curto espaço de tempo. Como tal, deveriam ser alvo de estudo restrições do tipo das enunciadas em (25), (26) e (27). De mencionar que estas restrições apenas têm potencial para funcionar se a duração de produção de cada família não exceder 2 períodos, e se não for a única família a ser produzida em cada um dos períodos.

$$\sum_{j \in J_f} \sum_t W_{F_{fjt}} \leq 1 \quad \forall f \quad (25)$$

$$\sum_{j \in J_f} \sum_t W_{L_{fjt}} \leq 1 \quad \forall f \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J_f} \sum_t Y_{fjt}^F \leq \bar{X}_{ffjt} + 1 \quad \forall f \quad (27)$$

Para além de representar o sistema com mais exatidão, estas restrições reduziram consideravelmente a árvore de resultados, uma vez que limitam os valores que as variáveis binárias em causa podem tomar. Contudo, as mesmas apenas deveriam ser ativas consoante aquilo que é pretendido pelos planeadores, pois em casos excecionais pode existir a necessidade de produzir a mesma família mais do que uma vez durante o horizonte temporal considerado.

Outra extensão ao modelo que poderia ser implementada, seria agregar a este modelo, o planeamento da máquina de papel, a qual produz as bobines que vão ser transformadas nas linhas em estudo. Como tal, através das necessidades resultantes das soluções fornecidas pelo modelo atual, poderia integrar-se aqui o planeamento da produção da máquina de papel através da alteração da restrição (2) para a restrição (28), adicionando também todas as restrições necessárias para sequenciamento e dimensionamento de lotes da máquina de papel. Nesta restrição, apenas é considerada procura de produtos finais e apenas estes podem conter um valor de *backlog* diferente de 0.  $D_i$  representa o conjunto de produtos sucessores de  $i$  que consomem alguma quantidade de  $i$  sempre que são produzidos, e  $r_{ii'}$  representa a quantidade do item  $i$  que é necessária para produzir o item  $i'$ .

$$S_{it} + B_{it} = S_{i(t-1)} - B_{i(t-1)} + P_{it} - \zeta_{it} - \sum_{i' \in D_i} r_{ii'} * P_{i't} \quad \forall i, t \quad (28)$$

Contudo, a aplicação desta extensão apenas deverá ser concretizada após colocar o modelo atual a funcionar da forma mais correta e otimizada possível para o sistema em causa. A restrição (28) poderá também ser estudada e aplicada às subsidiárias de modo a conhecer de imediato as suas necessidades de acordo com o planeamento resultante do modelo. Esta extensão pode ser consultada no estudo elaborado por Pochet & Wolsey (2006).

Por último, uma vez que a eficiência do *forecast* nesta empresa é muito baixo, tal como já foi referido no Capítulo 3.2 deste trabalho, é sugerida a realização de um estudo

para desenvolver uma forma de melhorar a eficiência deste. Esta melhoria seria crucial pois o *forecast* funciona como principal dado de entrada para qualquer modelo de planeamento da produção, e se a sua eficiência for baixa, não existe uma grande mais valia em possuir ferramentas avançadas de planeamento pois o mesmo terá sempre de ser feito a curto prazo.



## 6. CONCLUSÃO

Nos atuais sistemas de produção, a flexibilidade e a capacidade de resposta em tempo útil são duas características fundamentais pois permitem às empresas lidar com a variabilidade do mercado e a crescente competitividade. Desta forma, a habilidade de uma fábrica para tomar decisões eficientes e rápidas nos processos de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, quer a curto prazo, quer a médio prazo, pode ser decisiva na capacidade de uma empresa para competir no mercado. Estas decisões tornam-se ainda mais importantes nos casos em que os *changeovers* são dependentes da sequência de produção, uma vez que é desenvolvida uma interdependência entre o dimensionamento e o sequenciamento. Assim, torna-se crucial desenvolver e otimizar metodologias que auxiliem nesta tomada de decisão. Contudo, ao desenvolver este tipo de metodologias, é essencial levar em conta exemplos observados em casos práticos, uma vez que a sua complexidade é substancialmente superior aos casos observados em exemplos ilustrativos.

O objetivo principal deste trabalho foi então desenvolver um modelo para a otimização do dimensionamento e sequenciamento de lotes, levando em conta *trade-offs* importantes que são frequentemente encontrados, o qual seja possível de utilizar no planeamento da produção da fábrica onde foi efetuado o estudo.

Uma das maiores dificuldades encontradas ao longo do trabalho desenvolvido, foi encontrar um modelo que respondesse às características gerais mais importantes do sistema, nomeadamente, máquinas paralelas idênticas, transferência de *changeovers* entre períodos diferentes e *changeovers* dependentes da sequência da produção, possibilidade de existência de artigos em *backlog* e em inventário, e que ao mesmo tempo mantivesse uma resposta em tempo computacional aceitável para a dimensão das instâncias consideradas. O modelo apresentado foi baseado no estudo de Kopanos et al. (2011), tendo sido alvo de algumas alterações de modo a ir de encontro às características do sistema em causa.

Através da implementação deste modelo num *solver* comercial, foi possível testar diversas instâncias de acordo com os dados fornecidos pela empresa, bem como instâncias criadas com base nos mesmos, no entanto, com alterações de modo a conseguir

testar todas as funcionalidades do modelo. Daqui, foi possível retirar conclusões valiosas, percebendo que de acordo com os dados da empresa, quando o sistema funciona com capacidade suficiente para satisfazer a procura sem existência de *backlog*, o modelo tem bastante facilidade em encontrar a solução ótima em tempo aceitável, quer para o planeamento a curto prazo, quer a médio prazo.

Chegou-se também à conclusão de que o modelo em causa tem capacidade para encontrar melhores soluções do que as construídas pelo sistema atual, uma vez que os tempos de *changeover* existentes nas soluções do modelo, têm tendência em ser menores quando comparados com os existentes nos planeamentos da produção da empresa, mantendo a satisfação das datas de entrega.

Como tal, conclui-se que o modelo apresentado tem elevado potencial para ser aplicado na empresa onde foi realizado o estudo, fornecendo soluções viáveis em tempo computacional aceitável, e permitindo facilitar o trabalho dos planeadores da empresa, uma vez que o atual sistema exige uma quantidade de trabalho significativamente maior para obter soluções. Assim, é possível corroborar que o modelo desenvolvido por Kopanos et al. (2011) pode ser aplicado a problemas de grande dimensão, como são os casos encontrados em ambiente real de produção. Contudo, estas soluções carecem de análise aprofundada por parte dos planeadores da empresa, bem como de aplicação prática, daí apenas se concluir que o modelo tem potencial para ser aplicado. Não obstante, a abordagem utilizada deve ser alvo de um estudo mais exaustivo, o qual exigirá trabalho de terreno, de modo a desenvolver os ajustes necessários para representar o sistema com mais fidelidade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allweyer, T., Loos, P., & Scheer, A. W. (1994). An Empirical Study on Scheduling in the Process Industries. *A.-W. Scheer Ed. , Ž. Veröffentlichungen Des Instituts Für Wirtschaftsinformatik*, 109.
- Almada-Lobo, B., Klabjan, D., Carravilla, M. A., & Oliveira, J. F. (2010). Multiple machine continuous setup lotsizing with sequence-dependent setups. *Computational Optimization and Applications*, 47(3), 529–552.
- Almada-Lobo, B., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2008). Production planning and scheduling in the glass container industry: A VNS approach. *International Journal of Production Economics*, 114(1), 363–375.
- Bemelmans, R. (1986). *The capacity aspect of inventories*. Springer-Verlag.
- Björk, K. M., & Carlsson, C. (2007). The effect of flexible lead times on a paper producer. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 139–150.
- Chen, P., Papageorgiou, L. G., & Pinto, J. M. (2008). Medium-term planning of single-stage single-unit multiproduct plants using a hybrid discrete/continuous-time MILP model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(6), 1925–1934.
- Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H., & Tempelmeier, H. (2017). Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. *OR Spectrum*, 39(1), 1–64.
- Drexl, A., & Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling - survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99(2), 221.
- Erdirik-Dogan, M., & Grossmann, I. E. (2006). A decomposition method for the simultaneous planning and scheduling of single-stage continuous multiproduct plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(1), 299–315e.
- Erdirik-Dogan, M., & Grossmann, I. E. (2008). Simultaneous planning and scheduling of single-stage multi-product continuous plants with parallel lines. *Computers and Chemical Engineering*, 32(11), 2664–2683.
- Erdirik-Dogan, M., & Grossmann, I. E. (2007). Planning models for parallel batch reactors with sequence-dependent changeovers. *AIChE Journal*, 53(9), 2284–2300.
- Gelders, L. F., & Van Wassenhove, L. N. (1981). Production planning: a review. *European Journal of Operational Research*, 7(2), 101–110.
- Guimarães, L., Klabjan, D., & Almada-Lobo, B. (2014). Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups. *European Journal of Operational Research*, 239(3), 644–662.
- Günther, H. O. (2014). The block planning approach for continuous time-based dynamic lot sizing and scheduling. *Business Research*, 7(1), 51–76.

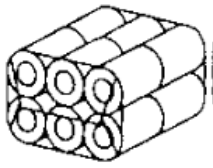
- Kapuscinski, R., Zhang, R. Q., Carbonneau, P., Moore, R., & Reeves, B. (2004). Inventory decisions in Dell's supply chain. *Interfaces*, *34*(3).
- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*, *31*(5), 365–378.
- Karmarkar, U. S., Sham Kekre, Sunder Kekre, & Freeman, S. (1985). Lot-Sizing and Lead-Time Performance in a Manufacturing Cell. *Interfaces*, *15*(2), 1–9.
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L., & Maravelias, C. T. (2011). Production planning and scheduling of parallel continuous processes with product families. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *50*(3), 1369–1378.
- Liu, S., Pinto, J. M., & Papageorgiou, L. G. (2008). A TSP-based MILP model for medium-term planning of single-stage continuous multiproduct plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *47*(20), 7733–7743.
- Liu, S., Pinto, J. M., & Papageorgiou, L. G. (2010). MILP-based approaches for medium-term planning of single-stage continuous multiproduct plants with parallel units. *Computational Management Science*, *7*(4), 407–435.
- Marques, C. M., Moniz, S., de Sousa, J. P., Barbosa-Póvoa, A. P., & Reklaitis, G. (2020). Decision-support challenges in the chemical-pharmaceutical industry: Findings and future research directions. *Computers and Chemical Engineering*, *134*, 106672.
- Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkski, I., & Fahl, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers and Chemical Engineering*, *30*(6–7), 913–946.
- Meyr, H. (2002). Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, *139*(2), 277–292.
- Moniz, S., Barbosa-Póvoa, A. P., & de Sousa, J. P. (2014). Simultaneous regular and non-regular production scheduling of multipurpose batch plants: A real chemical-pharmaceutical case study. *Computers and Chemical Engineering*, *67*, 83–102.
- Moniz, S., Barbosa-Póvoa, A. P., & de Sousa, J. P. (2015). On the complexity of production planning and scheduling in the pharmaceutical industry: The Delivery Trade-offs Matrix. *Computer Aided Chemical Engineering*, *37*(April 2019), 1865–1870.
- Moniz, S., Barbosa-Póvoa, A. P., De Sousa, J. P., & Duarte, P. (2014). Solution methodology for scheduling problems in batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *53*(49), 19265–19281.
- Moniz, S., Barbosa-Póvoa, A. P., & Pinho De Sousa, J. (2013). New general discrete-time scheduling model for multipurpose batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(48), 17206–17220.
- Moniz, S., Paula Barbosa-Póvoa, A., & Pinho De Sousa, J. (2012). *Scheduling With Equipment Redesign in Multipurpose Batch Plants*. March 2015.
- Pochet, Y., & Wolsey, L. A. (2006). *Production planning by mixed integer programming*. Springer Science & Business Media.



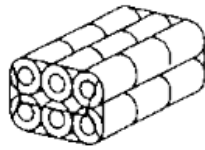
- Simchi-Levi, D., Wu, S. D., & Shen, Z. J. M. (2004). *Handbook of quantitative supply chain analysis: modeling in the e-business era* (74th ed.). Springer Science & Business Media.
- Soman, C. A., Van Donk, D. P., & Gaalman, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system SOM-theme A: Primary processes within firms. *Int. J. Production Economics*, 90, 223–235.
- Vercellis, C. (2009). Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making. In *Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making*.
- Yin, K. K., Liu, H., & Yin, G. G. (2003). Stochastic models and numerical solutions for production planning with applications to the paper industry. *Computers and Chemical Engineering*, 27(11), 1693–1706.



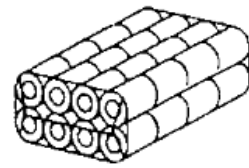
## ANEXO A – EXEMPLOS DE EMBALAMENTO



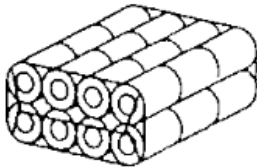
12 rolos de papel higiênico  
com formato 3x2x2



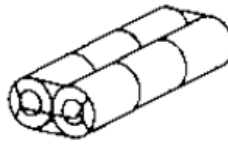
18 rolos de papel higiênico  
com formato 3x3x2



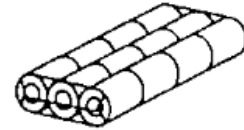
32 rolos de papel higiênico  
com formato 4x4x2



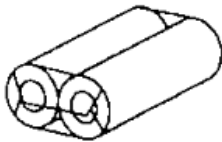
24 rolos de papel higiênico  
com formato 4x3x2



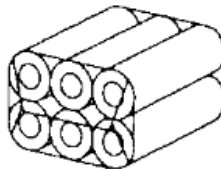
6 rolos de papel higiênico  
com formato 2x3x1



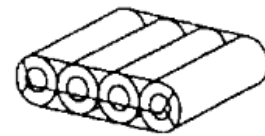
12 rolos de papel higiênico  
com formato 3x4x1



2 rolos de cozinha com  
formato 2x1x1



6 rolos de cozinha com  
formato 3x1x2



4 rolos de cozinha com  
formato 4x1x1



## ANEXO B – EXEMPLOS DE CILINDRO GOFRADOR E DO RESULTADO FINAL



Exemplo de cilindro gofrador



Exemplo de gofragem aplicada em papel higiênico



## ANEXO C – RESTRIÇÕES DE INTEGRALIDADE E NOMENCLATURA DO MODELO

### Restrições de integralidade e não negatividade

$$Y_{ijt} \in \{0,1\} \text{ e } Q_{ijt}, T_{ijt} \geq 0 \forall i, j \in J_i, t$$

$$WF_{fjt}, WL_{fjt}, Y_{fjt}^F \in \{0,1\} \text{ e } T_{fjt}^F, C_{fjt} \geq 0 \forall f, j \in J_f, t$$

$$X_{ff'jt}, \bar{X}_{ff'jt} \in \{0,1\} \forall f, f', j \in (J_f \cap J_{f'}), t$$

$$B_{it}, S_{it}, P_{it} \geq 0 \forall i, t$$

$$U_{jt}, \bar{U}_{jt} \geq 0 \forall j, t$$

### Índices

$i \in I = \text{produtos}$

$f, f' \in F = \text{famílias}$

$j \in J = \text{linhas de produção}$

$t \in T = \text{períodos de tempo}$

### Subconjuntos

$F_j = \text{famílias que podem ser processadas na linha } j$

$I_f = \text{produtos que pertencem à família } f$

$I_j = \text{produtos que podem ser processados na linha } j$

$J_f = \text{linhas que podem produzir a família } f$

$J_i = \text{linhas que podem produzir o produto } i$

### Parâmetros

$\gamma_{ff'j} = \text{tempo de mudança entre família } f \text{ e } f' \text{ na linha } j$

$\delta_{ij} = \text{tempo setup do produto } i \text{ na linha } j$

$\zeta_{it} = \text{procura do produto } i \text{ no período } t$

$\xi_{it} = \text{custo de inventário do produto } i \text{ no período } t$

$\zeta_{it} = \text{procura do produto } i \text{ no período } t$

$\rho_{ij}^{\max} = \text{produtividade máxima do produto } i \text{ na linha } j$

$\rho_{ij}^{\min} = \text{produtividade mínima do produto } i \text{ na linha } j$

$\tau_{ij}^{max}$  = tempo máximo de processamento do produto  $i$  na linha  $j$

$\tau_{ij}^{min}$  = tempo mínimo de processamento do produto  $i$  na linha  $j$

$\psi_{it}$  = custo de backlog do produto  $i$  no período  $t$

$\omega_{jt}$  = tempo disponível de produção da linha  $j$  no período  $t$

$\alpha_i$  = peso por palete do produto  $i$

$\lambda_{fj}$  = tempo de setup praticado dentro da família  $f$  na linha  $j$

$\varepsilon$  = produtividade média dos artigos nas linhas

### **Variáveis contínuas**

$B_{it}$  = backlog do produto  $i$  no período  $t$

$C_{fjt}$  = tempo de conclusão para a família  $f$  na linha  $j$  no período  $t$

$P_{it}$  = quantidade produzida do produto  $i$  no período  $t$

$Q_{ijt}$  = quantidade produzida do produto  $i$  na linha  $j$  no período  $t$

$S_{it}$  = quantidade em inventário do produto  $i$  no período  $t$

$T_{ijt}$  = tempo de processamento do produto  $i$  na linha  $j$  durante o período  $t$

$T_{fjt}^F$  = tempo de processamento da família  $f$  na linha  $j$  durante o período  $t$

$U_{jt}$  = tempo no período  $t$  de changeover finalizado no período seguinte na linha  $j$

$\bar{U}_{jt}$  = tempo no período  $t$  de changeover iniciado no período anterior na linha  $j$

### **Variáveis binárias**

$WF_{fjt} = 1$  se a família  $f$  é a primeira a ser produzida na linha  $j$  no período  $t$

$WL_{fjt} = 1$  se a família  $f$  é a última a ser produzida na linha  $j$  no período  $t$

$X_{ff'jt} = 1$  se a família  $f$  é produzida exatamente antes da  $f'$  na linha  $j$  no período  $t$

$\bar{X}_{ff'jt} = 1$  se a família  $f$  no período  $t$

– 1) é imediatamente seguida da  $f'$  no período  $t$  na linha  $j$

$Y_{ijt} = 1$  se o produto  $i$  é produzido na linha  $j$  no período  $t$

$Y_{fjt}^F = 1$  se a família  $f$  é produzida na linha  $j$  no período  $t$