



**Rui Pedro da Ponte
Figueiredo**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO DE
SEQUENCIAMENTO PARA UMA INDÚSTRIA DE
PRODUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CORTIÇA**



**Rui Pedro da Ponte
Figueiredo**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO DE
SEQUENCIAMENTO PARA UMA INDÚSTRIA DE
PRODUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CORTIÇA**

Relatório de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizado sob a orientação científica da Prof. Doutora Ana Raquel Reis Couto Xambre, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão, avós e namorada pelo apoio incondicional.

o júri

presidente

Prof.^a Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos
Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da
Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Vera Lúcia Miguéis Oliveira e Silva
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

Prof.^a Doutora Ana Raquel Reis Couto Xambre
Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da
Universidade de Aveiro

agradecimentos

Deixo um agradecimento à minha família e namorada, à Universidade de Aveiro e a todos os professores que acompanharam este percurso. Agradeço à Corticeira Amorim por proporcionar esta experiência enriquecedora.

palavras-chave

Controlo de produção, Sequenciamento, *Job-Shop*, Cp Optimizer

resumo

O trabalho aqui retratado consistiu no desenvolvimento de um algoritmo de sequenciamento para uma indústria de produção de pavimentos de cortiça. O aumento da variedade de produtos e a diminuição do tamanho dos lotes de produção aumentou a complexidade intrínseca ao sistema e dificulta o sequenciamento intuitivo, conduzido a uma gestão de produção não ideal.

O objetivo do projeto consistiu no desenvolvimento de um algoritmo adaptado às necessidades da empresa, que permitisse realizar o sequenciamento de forma lógica e formalizada, com base em métricas pré-definidas, e que incluísse as principais condicionantes do sistema real.

Para atingir os objetivos supracitados seguiu-se a seguinte metodologia: começou-se por analisar o sistema produtivo de modo a identificar quais os fatores que deveriam ser considerados no algoritmo. Os principais fatores a considerar nesta análise foram os produtos, gamas operatórias, cadências, tempos de *setup*, turnos de trabalho e avarias. Posteriormente procurou-se desenvolver um procedimento que integrasse os fatores identificados.

Na fase de validação, por não ser possível realizar uma comparação direta de resultados, foram escolhidas duas semanas representativas da produção, na qual se identificaram os produtos e as respetivas quantidades fabricadas, e simulou-se o sequenciamento.

Os objetivos propostos foram alcançados, tendo sido desenvolvido o algoritmo e ficando operacional para a realidade da empresa. Ainda assim, dada a complexidade de um sistema de sequenciamento para este tipo de ambiente, foi possível identificar melhorias a realizar, nomeadamente tornar o algoritmo mais flexível aos *inputs* do utilizador e melhorar a plataforma de interação.

keywords

Production control, Scheduling, Job-Shop, Cp Optimizer

abstract

The work portrayed here consisted of the development of a scheduling algorithm for a cork flooring industry. Increased variety of products and decreased size of production batches has led to a higher complexity of the system and made intuitive scheduling more difficult, leading to non-ideal production management.

The objective of the project consisted in the development of an algorithm, which should allow the scheduling to be carried out in a logical and formalized manner, based on pre-defined metrics and considering the main constraints of the real system.

To achieve the objectives, the following methodology was followed: it started by the analysis of the production system to identify which factors should be considered in the algorithm. The main factors found in this analysis were the products, operating ranges, cadences, setup times, work shifts and breakdowns. Subsequently, an attempt was made to develop a procedure that integrated the aforementioned factors.

In the validation stage, as it was not possible to carry out a direct comparison of results, two representative weeks of production were chosen, in which the products and the respective manufactured quantities were identified, and the scheduling was simulated.

The proposed objectives were achieved, and the algorithm was developed and is operational for the reality of the company. Even so, given the complexity of a scheduling system for this type of environment, improvements that could be made were identified, namely making the algorithm more flexible to user inputs, and improving the interaction platform.

Índice

| | |
|---|----|
| 1 - Introdução | 1 |
| 1.1 - Enquadramento | 1 |
| 1.2 - Objetivos | 2 |
| 1.3 - Estrutura do relatório..... | 3 |
| 2 - Revisão bibliográfica..... | 5 |
| 2.1 - Dimensões do planeamento..... | 5 |
| 2.2 - Sequenciamento | 7 |
| 2.3 - Métodos de Resolução..... | 9 |
| 2.4 - Mudanças de ferramentas / <i>Setups</i> | 11 |
| 2.5 - Métricas e indicadores de desempenho | 12 |
| 2.6 - Sequenciamento preditivo e reativo..... | 13 |
| 2.7 - Representação de soluções | 14 |
| 3 - Caso de estudo..... | 17 |
| 3.1 - Metodologia | 17 |
| 3.2 - Corticeira Amorim..... | 17 |
| 3.2.1 - Amorim Revestimentos | 18 |
| 3.3 - Descrição da situação atual | 19 |
| 3.3.1 - Produtos..... | 20 |
| 3.3.2 - Processo Produtivo | 23 |
| 3.3.3 - Dados Recolhidos | 27 |
| 3.4 - Modelo | 32 |
| 3.5 - Resultados | 36 |
| 3.5.1 - Sequenciamento da semana 42 | 37 |
| 3.5.2 - Sequenciamento da semana 43 | 44 |
| 4 - Conclusão e Trabalhos Futuros | 51 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1- Planeamento da Produção (adaptado de Stevenson, 2007) | 7 |
| Figura 2- Job Shop (adaptado de Tavares, 2015)..... | 8 |
| Figura 3 - Crescimento exponencial de um problema combinatório | 9 |
| Figura 4- Sequenciamento Reativo (adaptado de Raheja & Subramaniam, 2002) | 13 |
| Figura 5- Planta da Amorim Revestimentos em S. Paio de Oleiros | 19 |
| Figura 6- Produto multicamadas | 20 |
| Figura 7- Planta de Acabamentos Finais 1 | 25 |
| Figura 8- Planta de Acabamentos Finais 3 | 26 |
| Figura 9- Percentagem de tempo em avarias no ano de 2019..... | 32 |
| Figura 10- Interrupção de tarefas por paragens..... | 35 |
| Figura 11- Plataforma em Excel..... | 39 |
| Figura 12- Criação das matrizes com tempos de setup | 40 |
| Figura 13- Criação dos turnos de trabalho | 41 |
| Figura 14- Número de soluções encontradas para a semana 42 | 42 |
| Figura 15- Número de soluções encontradas para a semana 43 | 46 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Constituição dos Produtos | 22 |
| Tabela 2- Turnos de trabalho | 23 |
| Tabela 3 - Grupos de produtos | 28 |
| Tabela 4- Gamas Operatórias | 28 |
| Tabela 5- Setups Colagem 6 | 31 |
| Tabela 6- Turnos de trabalho dos equipamentos..... | 31 |
| Tabela 7- Numeração dos equipamentos | 33 |
| Tabela 8- Sequência dos equipamentos e cadencias para os grupos de produtos | 34 |
| Tabela 9- Conversão dos turnos de trabalho na unidade quarto de hora | 35 |
| Tabela 10- Conversão dos turnos semanais em quartos de hora | 37 |
| Tabela 11- Resumo da produção na semana 42..... | 38 |
| Tabela 12- Sequência de processamento dos produtos da semana 42..... | 38 |
| Tabela 13- Tempos de processamento | 39 |
| Tabela 14 - Setups Colagem 6..... | 40 |
| Tabela 15- Turnos de trabalho semana 42..... | 41 |
| Tabela 16- Resultado do sequenciamento da semana 42 | 43 |
| Tabela 17- Instantes de início e fim de processamento das encomendas da semana 42 | 44 |
| Tabela 18- Ocupação dos equipamentos na semana 42..... | 45 |
| Tabela 19- Resumo da produção na semana 43..... | 45 |
| Tabela 20- Turnos de trabalho da semana 43 | 46 |
| Tabela 21- Resultado do sequenciamento da semana 43 | 47 |
| Tabela 22- Instantes de início e fim de processamento das encomendas da semana 43 | 48 |
| Tabela 23- Ocupação dos equipamentos na semana 43..... | 49 |
| Tabela 24- Tempo disponível nos equipamentos..... | 50 |

1 - Introdução

Este capítulo procura enquadrar o projeto desenvolvido na necessidade que as organizações têm de se adaptar constantemente, através de novos produtos ou metodologias que visem a melhoria da produtividade, como é o caso de um algoritmo que auxilie o sequenciamento das linhas de produção.

O presente relatório retrata assim o projeto de desenvolvimento de um algoritmo de sequenciamento, para uma fábrica de produção de pavimentos de cortiça, cujos objetivos serão posteriormente descritos com maior detalhe.

Ainda neste capítulo introdutório, é explicada a estrutura do relatório, para obtenção de um panorama geral sobre os temas abordados e a respetiva sequência, a partir do qual o trabalho foi concebido.

1.1 - Enquadramento

O incremento da concorrência nos mercados globais, obriga as organizações a encontrar soluções diferenciadas nos ramos em que operam, seja em ambientes industriais ou de serviços. Para responder às mudanças impostas pelos mercados, as empresas vêm-se obrigadas a inovar, seja a nível do produto, para conquistar novos nichos de mercado ou estimular o consumo dos atuais, seja a nível organizacional, com vista a melhorar a eficiência e eficácia dos processos da empresa e, conseqüentemente, reduzir despesas através da redução ou eliminação de atividades que não adicionam valor.

A conquista de mercados através do desenvolvimento de novos produtos é, por vezes, inversamente proporcional ao aumento da eficiência e eficácia organizacional. A introdução de novos produtos acrescenta complexidade na gestão das operações, seja no planeamento, sequenciamento, gestão da qualidade, logística, entre outros. Apesar destes fatores, quando a empresa em questão labora em mercados cujo *design* é um fator crucial, muitas vezes é imperatório que o número de produtos seja elevado, procurando assim agradar a um elevado número de potenciais clientes, tal como acontece no caso dos pavimentos.

A cortiça, enquanto material típico português, é usada cada vez mais para diversos fins. Para além da tradicional produção de rolhas, é utilizada em outras situações, como a produção de pavimentos, retirando proveito das suas características únicas.

Em Portugal o mercado corticeiro é constituído por 685 empresas, traduzindo-se em 8310 postos de trabalho diretos. As exportações relacionadas com este material representam 2% das exportações nacionais, das quais 25% são relativas a materiais de construção e decorativos, perfazendo um valor de 246 milhões de euros (APCOR, 2020).

A Corticeira Amorim SGPS, S.A. é líder destacada neste mercado, onde opera nas áreas vinícola, aeronáutica e construção, estando presente em 70 países. A Amorim Revestimento é uma das unidades de negócio na área da construção, dedicada à produção de pavimentos e revestimentos. O desafio desta unidade é a produção de uma solução de revestimento alternativa às tradicionais, com características únicas, com benefícios para o ambiente, criando valor para os clientes, procurando inovar a nível dos produtos, bem como a nível organizacional procurando a melhoria contínua diariamente.

1.2 - Objetivos

O presente relatório incide sobre a área de controlo de produção, nomeadamente no planeamento das operações de curto prazo, procurando desenvolver uma metodologia de sequenciamento que garanta um fluxo contínuo da produção e, conseqüentemente, a melhoria do *output* dos equipamentos através da ferramenta de apoio à decisão a desenvolver.

No passado a empresa produzia lotes maiores o que se traduzia em menor número de *setups*, menor variedade de material em curso de fabrico, e um sequenciamento de operações mais simples, sem necessidade de uma ferramenta de apoio a decisão. Atualmente, e de forma a responder aos mercados, a empresa apresenta um catálogo de produtos considerável o que aumentou a entropia do sistema e a complexidade do sequenciamento das ordens de fabrico.

A empresa em questão procura constantemente a melhoria dos seus processos, através da implementação de sistemas complexos recorrendo a investimentos mais avultados, como *ERP's*, ou com o recurso a ferramentas *lean* mais simples e aplicáveis no dia a dia, como SMED ou 5 S's. A implementação destes sistemas demonstra uma atitude positiva da empresa em relação à mudança.

O projeto a desenvolver procura estabelecer melhorias, nomeadamente na forma como o sequenciamento das operações é executado. Atualmente o sequenciamento é feito com base no conhecimento e intuição do supervisor de produção o que, tendo em conta a complexidade do processo produtivo e a quantidade de produtos, acaba por ser ineficiente e conduz a atrasos nas

datas de entrega das encomendas, assim como outras situações que serão posteriormente descritas com mais detalhe.

O projeto irá consistir no desenvolvimento de um algoritmo de sequenciamento, no qual deverão estar refletidas as individualidades do processo produtivo, nomeadamente a sequência de operações de cada produto, as datas de entrega, os tempos de *setups* entre diferentes produtos e ainda os turnos de trabalho dos diferentes equipamentos. Para demonstração do funcionamento do algoritmo será realizado o sequenciamento de duas semanas consecutivas.

Para além do projeto relacionado com o algoritmo, é também de realçar o conhecimento adquirido no terreno relativo ao funcionamento de uma fábrica de tamanho considerável, como é a Amorim Revestimentos.

1.3 - Estrutura do relatório

Numa fase inicial do relatório, será feita uma revisão da literatura, que servirá para a introdução de conceitos relacionados com o planeamento e sequenciamento de operações. Nesta revisão, serão abordados os elementos fundamentais de um algoritmo de sequenciamento, que tornam estes mais próximos da realidade e conseqüentemente mais viáveis e úteis. Os temas abordados na revisão de bibliografia serão os seguintes:

- Dimensões do planeamento;
- Problemas de sequenciamento e classificação;
- Sequenciamento num ambiente *Job Shop*;
- Métodos de resolução;
- IBM ILOG CP Optimizer;
- Mudanças de ferramentas/ *setups*;
- Indicadores de desempenho;
- Sequenciamento reativo e indústria 4.0.

Posteriormente é feita uma apresentação do grupo Amorim, no qual está inserida a Amorim Revestimentos.

A secção seguinte consiste na apresentação dos dados recolhidos para a realização deste projeto, nomeadamente:

- Produtos existentes;
- Processos produtivos;

- Candências dos equipamentos;
- Turnos de trabalho;
- Mudanças de ferramentas.

Com bases nos dados recolhidos, será feita uma descrição do modelo focada nos dados de entrada do algoritmo e respetivo formato. Posteriormente é feita uma demonstração do algoritmo, concretizando o sequenciamento para duas semanas consecutivas e a respetiva análise dos resultados obtidos. Por último, o capítulo final apresenta as principais conclusões do trabalho assim como algumas perspetivas de desenvolvimento futuro.

2 - Revisão bibliográfica

Na revisão bibliográfica começou por se identificar as diferentes dimensões do planeamento, explicar como deve ser abordada cada uma, o tipo de decisões que implicam, as consequências e limitações que os níveis superiores impõem aos níveis de decisão inferiores.

Atendendo ao foco do trabalho desenvolvido, foi investigado com maior detalhe o tópico das decisões de curto prazo, nas quais se insere o sequenciamento de operações.

No tópico do sequenciamento são abordados alguns dos diferentes ambientes produtivos, e a sua classificação, de acordo com determinadas características destes sistemas.

Dando continuidade ao escopo da pesquisa, é abordado o ambiente de produção *job-shop*, formas de resolução deste tipo de problemas descritas na literatura, e a importância de incluir os tempos de mudanças de ferramentas. Procurou-se igualmente identificar diferentes métricas para avaliar a qualidade das soluções, de modo a encontrar a que melhor se enquadra no problema em questão.

No âmbito do crescimento da indústria 4.0 e das suas tecnologias, é abordado o sequenciamento reativo e a forma como pode ser usado, para tornar os sistemas de sequenciamento mais dinâmicos e próximos dos ambientes produtivos reais.

Para concluir, é feita uma referência à forma como são representadas as soluções e o potencial que uma ferramenta de representação pode apresentar, podendo tornar o sistema de sequenciamento mais flexível para os utilizadores e, conseqüentemente, tornar-se mais útil.

2.1 - Dimensões do planeamento

As decisões relacionadas com o planeamento podem ser divididas em três horizontes temporais distintos, as decisões de longo prazo, as decisões de médio prazo e as decisões de curto prazo (Heizer, Render & Munson, 2019; Stevenson, 2014; Swamidass, 2000)

As decisões de longo prazo relacionam-se com a seleção de produtos, o dimensionamento das localizações, definição de *layouts*, entre outras, atendendo sempre que estas decisões, pelo impacto que podem ter, são também designadas como estratégicas. O planeamento de longo prazo, visa equilibrar as capacidades de fornecimento de organização com as previsões de procura, ambas a longo prazo.

Quando a procura é superior à capacidade de produção, a organização não consegue responder ao mercado refletindo-se numa perda de clientes. Quando a capacidade da organização é superior a procura, os custos operacionais elevam-se, não sendo diluídos num número superior de vendas.

As decisões tomadas neste nível restringem a capacidade do sistema em questão. Desta forma, torna-se fundamental definir a capacidade necessária tendo em conta o tipo de produto, as quantidades para responder à procura e o momento exato para deter determinada capacidade. As técnicas de previsão, têm um papel fundamental neste tipo de decisões, devido à longevidade temporal (Stevenson, 2014).

O planeamento a médio prazo envolve a tomada de decisões relacionada com os níveis de mão de obra, subcontratação, nível de inventários, entre outros.

O planeamento agregado ajuda a definir os planos de médio prazo. A combinação do planeamento agregado com um sequenciamento correto, uma manutenção efetiva e preventiva e eficiência dos operadores, resulta numa elevada taxa de utilização dos equipamentos. O planeamento agregado permite gerir a quantidade e o espaço temporal da produção, num período entre 3 e 18 meses, numa unidade de produção agregada (família de produto), e não por tipo de produto/referência, deixando de parte certas especificações que diferenciam os produtos dentro de uma família, como as cores ou outros acabamentos. O planeamento agregado é seguidamente desagregado, dando origem a um MPS (*Master Production Schedule*) que, por sua vez, servirá de base ao MRP (*Material Requirement Planning*) (Heizer, Render & Munson, 2019).

O MPS é uma representação das necessidades produtivas da empresa, onde estão especificados os modelos a produzir, as quantidades e as datas de entrega. Atende às previsões, às encomendas, aos atrasos das semanas anteriores, às disponibilidades de material e à capacidade da unidade em questão.

O MRP divide o tempo em intervalos discretos (tipicamente semanas) e baseia-se em 3 *inputs* para calcular as necessidades dos materiais, o MPS, a BOM (*Bill of Materials*) e os inventários de materiais (Swamidass, 2000).

Por fim, as decisões de curto prazo prendem-se essencialmente com o sequenciamento e atribuição das tarefas, equipamentos e operadores. Todos os níveis de decisão, estão sujeitos e

limitados às restrições impostas pelos níveis de decisão superiores conforme demonstrado na Figura 1 (Stevenson, 2014).

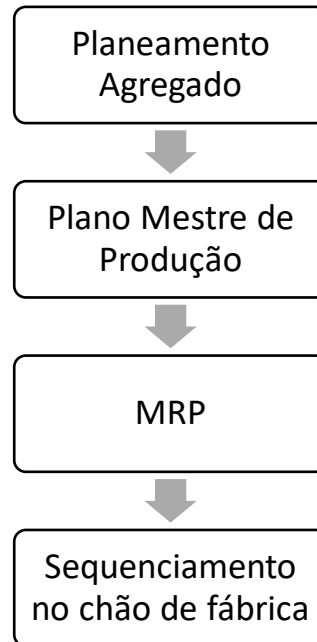


Figura 1 - Planejamento da Produção (adaptado de Stevenson, 2007)

2.2 - Sequenciamento

Os problemas de sequenciamento surgem nos mais diversos contextos, emergindo da necessidade de atribuir atividades a determinadas entidades ou recursos. Este tipo de estudos remontam a 1950, com problemas simples, designados de clássicos e que são facilmente resolvidos nos dias de hoje (De Pablo, 2009). Os problemas de sequenciamento variam de acordo com o ambiente em que a produção está organizada. A forma de organização mais simples refere-se ao processo produtivo que se restringe a uma única máquina. Neste caso, a simplicidade do processo é refletida também na facilidade de resolução dos problemas de sequenciamento deste tipo. Outras formas de organização da produção são o *job-shop*, o *flow-shop*, *job-shop* flexível, entre outros (Pinedo, 2008).

De acordo com a revisão realizada por De Pablo (2009) os problemas de sequenciamento podem ser também classificados sob várias dicotomias nomeadamente, se o problema é determinístico, isto quando os dados de entrada do problema são constantes, ou estocásticos, quando os dados são aleatórios. Os segundos são habitualmente mais complexos na sua resolução. Também podem ser divididos considerando o número de critérios a partir do qual se avalia a

solução, sendo que o caso em que é considerado apenas um critério, é mais simples do que os casos multicritério. Por último, existe a possibilidade de o sequenciamento ser cíclico ou não cíclico. No sequenciamento cíclico o tempo é considerado infinito e os ciclos de produção são repetidos periodicamente a partir da definição do *minimal part set*. Por exemplo, assumindo que o objetivo de uma determinada produção são 200 unidades do produto A, 300 do B e 500 do C, o *minimal part set* consistiria em 2 unidades do produto A, 3 do produto B e 5 do produto C. Este ciclo de produção deveria ser repetido 100 vezes para perfazer as quantidades pretendidas.

A empresa onde foi desenvolvido o projeto aqui retratado, está organizada segundo um ambiente *job-shop*, por este motivo e pela complexidade do ambiente em questão, o estudo será maioritariamente orientado para este tipo de meios industriais.

Segundo Zhang, Ding, Zou, Qin e Fu (2019), o problema de sequenciamento num *job-shop* pode ser descrito como a afetação de um conjunto de n tarefas, processadas em m equipamentos (Figura 2), respeitando determinadas restrições:

- Existe uma sequência pré-definida de equipamentos para cada tarefa;
- Cada equipamento só pode processar uma tarefa de cada vez;
- O desempenho do equipamento é fixo;
- O processamento de uma tarefa não pode ser interrompido.

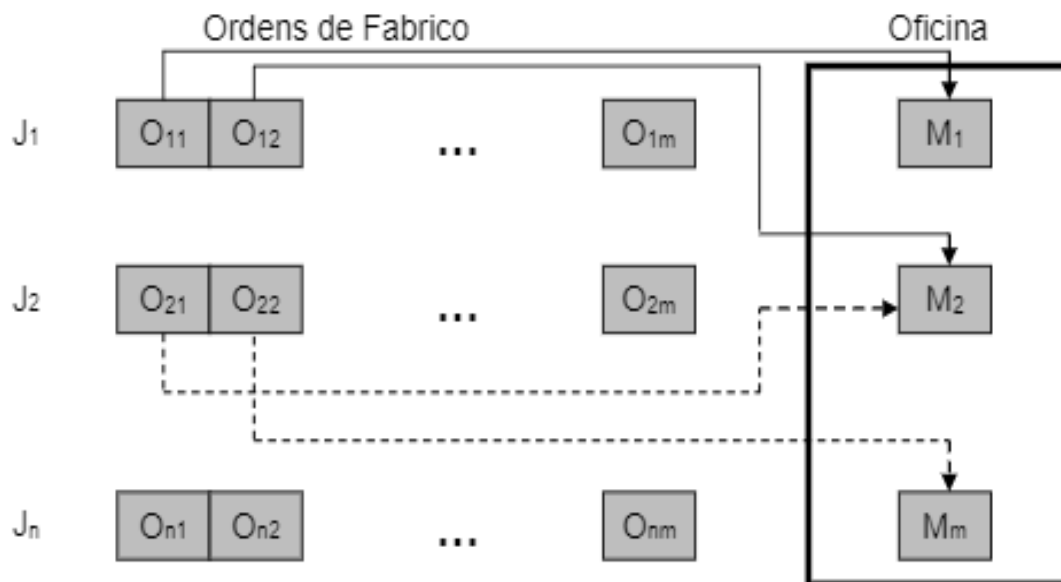


Figura 2 - Job Shop (adaptado de Tavares, 2015)

2.3 - Métodos de Resolução

O sequenciamento em *job-shop*, é reconhecido na literatura como um problema combinatório difícil, devido ao crescimento exponencial do número de soluções possíveis, como é visível na Figura 3, sendo assim alvo de vários estudos (Tian & Wang, 2012). Por este motivo, é possível encontrar várias abordagens a este tipo de problemas, desde programação matemática, simulação, regras de prioridade, heurísticas e algoritmos de pesquisa local (Wang, Tian, Li & Yang, 2012).

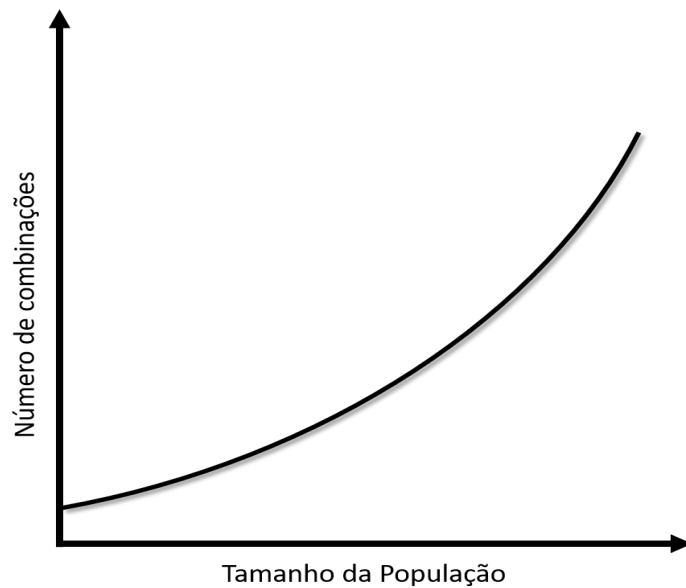


Figura 3 - Crescimento exponencial de um problema combinatório (adaptado de Tian & Wang, 2012)

Dileepan e Ahmadi (2010) combinaram a simulação com critérios de prioridade, para estudar a forma como critérios simples podem ser usados para sequenciar a produção num ambiente *job-shop*. Os critérios usados foram: *Slack per Remaining Operations (SPRO)*, *Priority Ratio (PR)*, *Earliest Due Date (EDD)*, *Total Work Content Remaining (TWKR)*, and *Smallest Processing Time (SPT)*. Os resultados obtidos, permitiram concluir que, na maioria das situações, o critério EDD apresenta melhores soluções quando o objetivo é minimizar o desvio das datas de entrega, e o SPT quando se pretende minimizar o trabalho em curso de fabrico.

Wang, Tian, Li e Yang (2012) desenvolveram um algoritmo genético para diminuir o tempo de resolução do problema de sequenciamento num *job-shop*. Um algoritmo genético gera soluções a partir de soluções obtidas anteriormente. Estas novas soluções são obtidas através da combinação das soluções anteriores e este passo poderá ser repetido tantas vezes quanto as

desejadas (Pinedo, 2008). Atualmente é difícil encontrar estudos que recorram apenas a programação linear matemática exclusivamente, sem utilizar outros algoritmos de pesquisa para diminuir o tempo de resolução.

Apesar das ferramentas supracitadas serem as utilizadas com maior frequência, existem outros métodos que apresentam soluções com qualidade semelhante, e por vezes superior, nomeadamente a programação por restrições. Uma das ferramentas que permite a utilização desta abordagem é o IBM ILOG CP Optimizer (que será usado neste trabalho) pois está incorporado no Cplex e utiliza conceitos matemáticos que permitem absorver a dimensão temporal dos problemas de sequenciamento, nomeadamente variáveis do tipo sequência e intervalo. A combinação destes dois tipos de variáveis permite criar uma ordenação/sequência dos intervalos temporais, obtendo como resultado o sequenciamento. Adicionalmente possui restrições do tipo *no-overlap* que impedem a sobreposição das tarefas no diferentes equipamentos (Laborie, Rogerie, Shaw & Vilím, 2018).

Apesar da reduzida utilização desta ferramenta, é possível encontrar estudos que demonstram a sua eficiência e eficácia, como o trabalho desenvolvido por Laborie (2018) que compara o desempenho desta ferramenta com outras abordagens, para resolver problemas de alocação de recursos e sequenciamento. Neste estudo o CP Optimizer apresentou resultados superiores à programação inteira mista, à programação de restrições, ao *logic based Benders decomposition* e ao *SAT-modulo theories*, atingindo soluções de qualidade superior no tempo limite imposto.

Para a obtenção das soluções, o CP Optimizer recorre a um algoritmo de pesquisa que corre um conjunto de técnicas interligadas, que permitem encontrar soluções ótimas, ou muito próximas disso. Este algoritmo de pesquisa começa com uma propagação das restrições, através de um algoritmo de filtragem designado de *time table*. O objetivo desta primeira fase é uma redução de domínio, através da remoção de possíveis valores das variáveis de decisão, por violarem alguma restrição imposta pelo modelo. Esta redução de domínio é depois comunicada às respetivas restrições.

Após o algoritmo de filtragem, inicia-se um algoritmo designado de *Large Neighborhood Search* (LNS) que encontra soluções boas ou próximas do ótimo. Este algoritmo começa por gerar uma solução aleatória e que respeita as restrições impostas pelo modelo. A partir da solução obtida, são realizadas transformações simples para obtenção de novas soluções. Estas transformações podem consistir na fixação de determinadas variáveis e alteração das restantes. Para casos em que

é necessário otimizar custos temporais ou não temporais irregulares, como é o caso dos atrasos, maximização ou minimização de recursos, alocação de recursos, entre outros, é realizada uma relaxação das restrições em cada iteração do LNS (Laborie, Rogerie, Shaw & Vilím, 2018).

Devido ao facto do LNS não conseguir explorar todo o espaço de soluções, torna-se impossível provar que a solução encontrada por este é ótima, para além de que poderá ficar preso num mínimo local. Desse modo o CP Optimizer combina esta técnica com o *Failure-Directed Search* (FDS), quando o espaço de soluções é reduzido ou quando a solução deixa de apresentar melhorias. Esta técnica assume que o problema atual é inviável, ou que a sua solução é difícil de encontrar. Desta forma não procura identificar uma solução para o problema, mas sim provar que o “caminho” que está a ser seguido está errado (Vilím, Laborie & Shaw, 2015).

Aliado a estas técnicas o algoritmo é corrido várias vezes em paralelo, e as soluções obtidas são partilhadas entre as diferentes execuções, para que todas beneficiem das soluções encontradas seja na fase do LNS para a procura de uma melhor solução, ou para o FDS como valor máximo encontrado (Laborie, Rogerie, Shaw & Vilím, 2018).

2.4 - Mudanças de ferramentas / *Setups*

O desenvolvimento de uma ferramenta de sequenciamento, deve incorporar todos os fatores que influenciam a solução final, como é o caso das mudanças de ferramentas, também designadas de *setups*. Os *setups* referem-se ao tempo necessário, para executar uma determinada alteração num equipamento. Este tempo pode ser consumido na mudança de moldes, realização de ajustes, posicionamento dos operadores, limpeza dos equipamentos, entre outros. Segundo Sharma & Jain (2016) os *setups* podem dividir-se em dependentes ou independentes da sequência de produtos. Um *setup* diz-se dependente da sequência quando, o tempo necessário para a sua execução depende da tarefa anterior e da tarefa a ser realizada. Num *setup* independente, importa apenas a tarefa a realizar, sendo independente da tarefa anterior (Sharma & Jain, 2016).

A diminuição da duração dos *setups* é uma atividade importante para garantir o aumento de desempenho e para implementar uma produção *just in time* (Yang & Deane, 1993). A diminuição do tempo dedicado aos *setups* é um estudo importante, e pode ser conseguido através da padronização dos procedimentos. Ainda assim, apesar da duração poder ser reduzida, estes não podem ser eliminados e são um elemento importante num ambiente produtivo (Kim & Bobrowski, 1994). Na literatura disponível encontram-se vários exemplos de estudos de sequenciamento em que os *setups* são ignorados. Ainda que isto seja válido para determinados problemas, para outros,

ainda que a análise seja simplificada, a qualidade das soluções pode ser reduzida e irrealista (Allahverdi, Gupta & Aldowaisan, 1999).

2.5 - Métricas e indicadores de desempenho

Para qualquer problema de sequenciamento é necessário definir um objetivo, isto é, um critério através do qual é possível medir a qualidade de uma determinada solução. A definição destes critérios é complexa e altamente individual (Oyetunji, 2009). Em suma, o que estes critérios procuram definir é um balanço entre a atribuição do tempo e dos custos, utilizando como *inputs* dados dos inventários, procura, custos e tempo (Meidyani, Sarno & Nurlaili, 2018).

Oyetunji (2009) realizou uma revisão sobre indicadores de desempenho para o sequenciamento, com o objetivo de definir a formulação para os indicadores encontrados. Nesta revisão, foram identificados 29 indicadores divididos posteriormente em diferentes categorias. Dentro das categorias identificadas, cada indicador pode ser calculado através de valores máximos, médios, mínimos ou somatórios, dependendo do indicador em questão. As categorias definidas foram baseadas nas seguintes medidas:

- **Tempo de conclusão:** no caso de um job-shop, o tempo de conclusão de uma determinada encomenda diz respeito ao instante de conclusão da última tarefa da sequência. Nesta categoria está inserido o *makespan*, ou tempo máximo de conclusão, que se refere ao tempo de conclusão da última tarefa de todas as encomendas.
- **Tempo decorrido:** refere-se ao tempo que uma determinada encomenda passa na fábrica durante o processamento.
- **Lateness:** refere-se à diferença entre a data de conclusão e a data de entrega. Este indicador pode assumir valores negativos e valores positivos.
- **Número de trabalhos late/tardy:** uma encomenda encontra-se nesta situação quando, a data de entrega é anterior à data de término da última tarefa da sequência.
- **Tardiness:** esta categoria é equivalente à *lateness*, diferindo no facto de não assumir valores negativos.
- **Earliness:** esta categoria de indicadores é o oposto do *lateness*, o que significa que, quando o indicador *lateness* é positivo, o *earliness* é negativo e vice-versa.
- **Número de trabalhos early:** uma encomenda encontra-se nesta situação, quando é completada antes da data de entrega.

2.6 - Sequenciamento preditivo e reativo

Os indicadores de desempenho supracitados podem também ser combinados com outros medidores de qualidade, nomeadamente a robustez. A robustez divide-se em dois indicadores, a qualidade da robustez e a robustez da solução. O primeiro mede a sensibilidade do modelo de sequenciamento face a acontecimentos inesperados, comparativamente aos valores da função objetivo como o *makespan* ou o atraso total, procurando garantir a qualidade da solução quando comparado o valor real com o valor resultante do modelo, olhando apenas para o valor da função objetivo. O segundo mede a diferença entre o começo e o fim das atividades do modelo e do sistema real, considerando cada atividade individualmente (Xiong, Xing & Chen, 2013).

As incertezas num modelo de sequenciamento podem estar relacionadas com problemas de qualidade e defeitos (Al-Fawzan & Haouari, 2005), variação nas cadências da produção (Xia, Chen & Yue, 2008) e avarias dos equipamentos (Liao & Chen, 2003).

Para combater as situações inesperadas, surge o conceito de sequenciamento reativo, que consiste na combinação de um sequenciamento preditivo robusto, com um sequenciamento totalmente reativo. O primeiro conceito consiste na geração de um modelo completamente estático e offline, pelo facto de não ter ligação ao ambiente produtivo real. O sequenciamento totalmente reativo consiste na geração do sequenciamento em tempo real, por exemplo, quando um equipamento fica desocupado e a tarefa a ser realizada é decidida nesse instante com base numa regra de prioridade. O sequenciamento reativo surge então da combinação destes conceitos (ver Figura 4), e consiste na revisão do sequenciamento já existente com base nos acontecimentos inesperados (Raheja & Subramaniam, 2002).

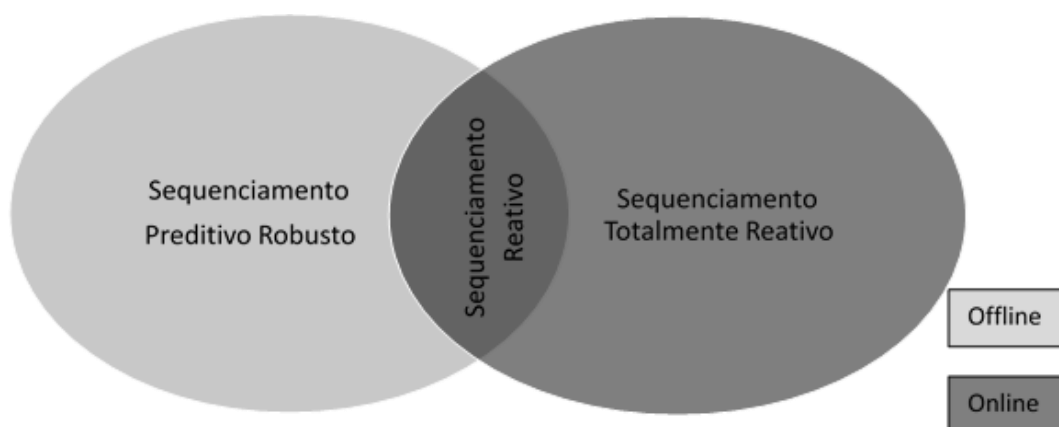


Figura 4 - Sequenciamento Reativo (adaptado de Raheja & Subramaniam, 2002)

A combinação destes conceitos com as tecnologias da indústria 4.0, pode criar soluções interessantes, particularmente em ambientes onde a imprevisibilidade e complexidade dos processos é elevada. O trabalho de Wen e Cao (2017) é um exemplo claro da potencialidade destas técnicas, através do desenvolvimento de um modelo de sequenciamento num ambiente *job-shop*, combinado com a implementação de sensores e tecnologia *RFID*, em que conseguiram uma partilha de dados em tempo real, que permitiu um sequenciamento atualizado e capaz de lidar com imprevistos.

2.7 - Representação de soluções

A *interface* do modelo com o utilizador, tem um papel crucial no sucesso da adoção do modelo pelos seus utilizadores. Estas *interfaces* devem ser flexíveis e permitir uma interação com o utilizador, para que este possa incorporar nas soluções, determinadas alterações que podem ocorrer durante o sequenciamento.

O diagrama de *Gantt* apresenta-se como a forma mais utilizada para mostrar resultados neste tipo de problemas e, ao mesmo tempo, quando programado para tal, permite a realização de alterações ao sequenciamento obtido, de forma intuitiva e simples.

O gráfico de *Gantt* consiste num gráfico de barras, onde no eixo horizontal, está representado o tempo e no eixo vertical, estão representados os diferentes equipamentos produtivos. Para distinguir as diferentes encomendas a processar, são usados esquemas de cores ou outros diferenciadores.

Nos modelos que usam este tipo de gráficos, quando incorporados em sistemas informáticos, é habitual que o utilizador possa arrastar operações consoante as necessidades e automaticamente o modelo ajusta as restantes tarefas, consoante o impacto causado pela alteração. Este impacto causado noutras tarefas, é designado de efeito de cascata ou propagação.

Após as alterações, o sistema corre o modelo de re-sequenciamento para ajustar os resultados ao efeito de cascata, causado pela movimentação de tarefas (Pinedo, 2008).

É possível concluir que, os sistemas de sequenciamento para ambientes *job-shop* são alvo de diversos estudos na literatura. Para enquadrar onde estes sistemas se inserem, foram descritas as diferentes dimensões do planeamento, com maior foco na dimensão de curto prazo por ser aquela na qual se enquadra o sequenciamento. Podemos ainda concluir que, para que estes sistemas se tornem próximos da realidade, e consequentemente mais úteis aos utilizadores, é necessário incluir fatores como os *setups* e avarias. A inclusão destes fatores pode ser feita de forma estática, ou com

recurso a tecnologias da indústria 4.0, para que os sistemas se tornem representações virtuais da realidade, tornando-os assim ainda mais complexos.

No capítulo seguinte é descrito o caso de estudo, começando por descrever a situação atual da empresa, a forma como está organizada a produção, os produtos e os respetivos processos produtivos bem como a explicação de como foi abordado o problema em questão.

3 - Caso de estudo

Neste capítulo é feita uma descrição da organização Corticeira Amorim na qual se insere a Amorim revestimentos. Posteriormente, é descrita a situação atual da Amorim revestimentos, no que se refere à organização dos produtos existentes e os respetivos processos produtivos. Relativamente aos processos produtivos, são também apresentados os dados recolhidos, nomeadamente as cadências, os tempos de *setups*, os turnos de trabalho e tempos de avarias nos equipamentos considerados para o estudo.

Por último, é feita uma explicação do modelo desenvolvido orientado para os dados de entrada e para a forma como estes são estruturados no modelo.

3.1 - Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho irá seguir-se a seguinte metodologia: primeiramente caracterizar o sistema produtivo qualitativamente, identificando os equipamentos, os produtos e as respetivas sequências de produção, também designadas de gamas operatórias, procurando identificar quais os fatores importantes a considerar quando é realizado o sequenciamento da produção.

Feita esta análise qualitativa, avança-se para uma caracterização do sistema a nível quantitativo, nomeadamente a nível de cadências de produção, horas de trabalho, tempos de *setups* e avarias.

Recolhidos estes dados, será possível desenvolver um algoritmo capaz de acomodar a informação e interpretá-la, para gerar o resultado que é o sequenciamento.

Este resultado será posteriormente alvo de uma análise, para caracterizar a qualidade das soluções obtidas. O algoritmo será também analisado na forma como é apresentado ao utilizador, sendo identificadas melhorias a implementar para garantir a aplicabilidade ao problema e contexto reais.

3.2 - Corticeira Amorim

A Corticeira Amorim foi fundada em 1963, mas a sua história iniciara em 1870 com a fundação da fábrica de rolhas de cortiça pelas mãos de António Alves Amorim. Enquanto empresa de origem nacional, a Corticeira Amorim é atualmente uma das maiores multinacionais presentes no país. Lidera o mercado corticeiro a nível mundial, marcando presença em dezenas de empresas nos 5 continentes. O lema do grupo é claro, "nem um só mercado, nem um só cliente, nem uma só

divisa, nem um só produto". O Grupo Amorim, no qual se insere a Corticeira Amorim, apresenta investimentos muito diversificados não só relacionados com a cortiça, mas também nos mercados imobiliários, financeiros, telecomunicações e turismo.

Quanto às unidades de negócio ligadas à cortiça, o grupo está presente desde que a cortiça é retirada das árvores com a Amorim Florestal, S.A. dedicada à compra, armazenamento e preparação da cortiça. Na produção de rolhas com a Amorim & Irmãos, LDA, na produção de compósitos aglomerados de cortiça e cortiça com borracha com a Amorim Cork Composites, na produção de materiais isoladores para construção com a Amorim Isolamentos. Por último, na produção de pavimento e decorativos de parede com a Amorim Revestimentos, na qual foi desenvolvido o projeto aqui apresentado.

3.2.1 - Amorim Revestimentos

A unidade de negócio dedicada a produção de revestimentos inicia a sua atividade no ano de 1978 com a criação da Ipocork. A Amorim Revestimentos (AR) surge mais tarde, em 1996, da fusão entre a Inacor, S.A. e a Ipocork, S.A.

No ano de 1989 foi também adquirido o grupo sueco Wicanders, presente no mercado há mais de 100 anos, visando assim a internacionalização do grupo.

A AR combina métodos tradicionais com a tecnologia mais recente, para a produção de pavimentos distintos, resistentes, elegantes e confortáveis, recorrendo sempre a um material com características únicas e inconfundíveis como a cortiça.

Um dos grandes compromissos do grupo, e da Amorim Revestimentos, é a preservação do montado de sobro e do ambiente. Desta forma, a procura pela otimização de consumos de todos os materiais é uma constante. Todos os subprodutos resultantes dos processos produtivos são reutilizados, quando possível, ou reciclados sendo que a principal fonte de energia das instalações advém do pó de cortiça e outras biomassas.

A AR é constituída por duas fábricas em localizações distintas, uma em Lourosa e outra em S. Paio de Oleiros. A primeira, está em fase de transformação num centro logístico e de momento, apenas se dedica à produção de blocos e laminados de cortiça, para fornecer às instalações da Oleiros.

O estudo aqui apresentado foi realizado na fábrica de S. Paio de Oleiros.

3.3 - Descrição da situação atual

O planeamento é o departamento responsável por agrupar as encomendas dos clientes e definir a semana em que estas devem ser produzidas, tendo em conta o *lead time* e as datas de entrega acordadas com o cliente.

Quando estão definidas as semanas de produção, são criadas ordens de fabrico com as quantidades e as datas a cumprir. Os supervisores de produção são responsáveis por realizar o sequenciamento da produção procurando cumprir as datas. O sequenciamento é realizado com base no conhecimento do processo e no objetivo definido, considerando ainda os acontecimentos desencadeados ao longo da produção como avarias, falta de matéria prima, falta de paletes para realizar os transportes, qualidade, entre outros.

Ao longo da semana os supervisores de produção mantêm o planeamento atualizado sobre o *status* da produção, para que as ordens de fabrico que ficam sujeitas a atrasos, sejam replaneadas para as semanas seguintes.

Para que se perceba melhor a complexidade do problema de sequenciamento, é necessário descrever a forma como a empresa se encontra organizada e como se processa a sua produção.

A empresa encontra-se dividida em diferentes áreas, sendo que as áreas existentes na produção são: componentes e acabamentos finais 1, 2 e 3 (AF1, AF2 e AF3), visíveis na Figura 5.

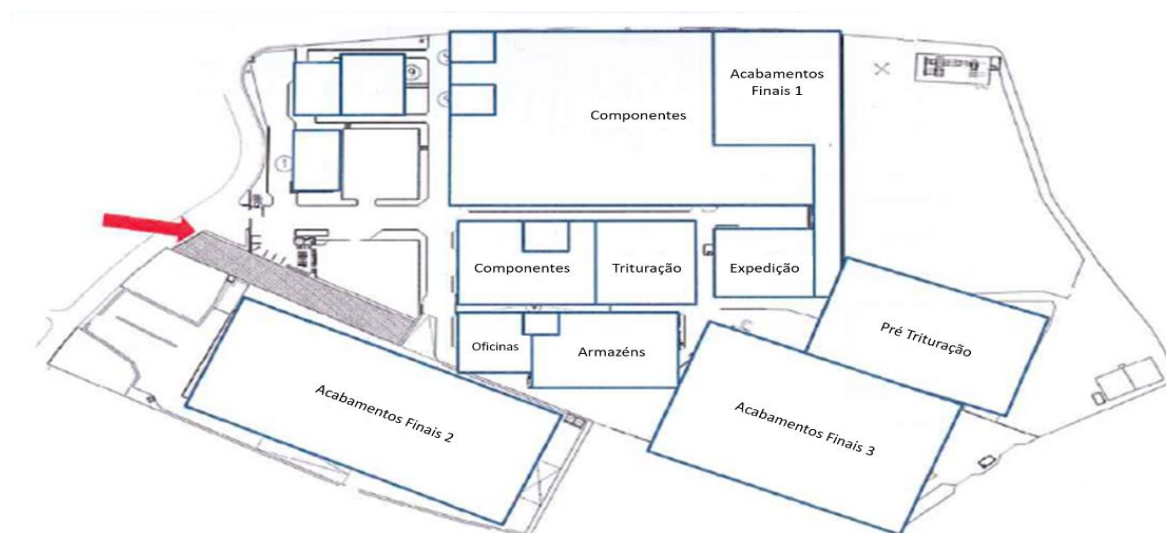


Figura 5 - Planta da Amorim Revestimentos em S. Paio de Oleiros

Na área de componentes são realizadas operações de colagem e prensagem de placas de cortiça e lixagem das mesmas.

Estas placas são depois transportadas para AF1, AF2 ou AF3. Nestas áreas realizam-se tarefas semelhantes, designadamente colagem, pintura, envernizamento, corte e embalagem. Dependendo do tipo de produto, estes são processados seguindo uma sequência de equipamentos específica, de acordo com uma gama operatória.

3.3.1 - Produtos

Este trabalho foi realizado com foco nos setores AF1 e AF3. Nestes espaços são produzidos pavimentos do tipo flutuante, enquanto que em AF2 são produzidos pavimentos do tipo fixo. Atualmente a procura por pavimentos do tipo flutuante é superior, o que justifica a escolha destas áreas para a realização deste projeto.

Nestas áreas são produzidas 11 famílias de produtos. Essas famílias designam-se por *LVT*, *HydroCork*, *Artcomfort*, *Authentica*, *Cork Neuro Boards*, *Wise Cork*, *Wise Pet*, *Wise DP*, *Cork Floor*, *Cork Style* e *Resist +*. Dentro de cada família existem diferentes referências de produto, de acordo com as diferentes dimensões e acabamentos/visuais. Os produtos existentes na empresa variam anualmente de acordo com as coleções, apresentadas no início do ano, concebidas pela equipa de desenvolvimento.

Os pavimentos produzidos na Amorim Revestimentos, são produtos multicamadas como se apresenta na Figura 6.



Figura 6 - Produto multicamadas

As camadas que constituem um determinado produto variam de acordo com a respetiva família do produto.

O produto da família LVT é constituído por 4 camadas designadas por *Top Layer*, IN, HDF e BL. A *Top Layer* é uma camada de material PVC que, no lado superior, contém um vinil com um

visual a imitar madeira ou outro material desejado, sendo que este constituinte é comprado a uma empresa externa.

As camadas seguintes são formadas por IN 1.3 e HDF. O IN 1.3 é uma camada laminada de um bloco de cortiça aglomerado, produzido na unidade de Lourosa. O HDF é um aglomerado de madeira também ele adquirido a uma empresa externa.

A última camada de BL é uma camada de cortiça, que difere do IN por ser constituída por aglomerados de qualidade inferior, e por ser comprado a uma empresa externa à AR, a Amorim Cork Composites (ACC).

O HydroCork é constituído por *Top Layer*, NRT e *Bottom Layer*. A *Top Layer* é idêntica ao do produto LVT e o *core* deste produto é formado por uma camada de NRT, um aglomerado de cortiça com PVC que, no passado, era comprado à ACC, mas atualmente é produzido *indoors*. Na camada inferior detém uma *Bottom Layer*, que é em tudo igual à *Top Layer* exceto no facto de não ter visual por ser a camada que assenta no pavimento.

O Wise Cork é constituído por decorativo de cortiça, IN 1.3, Subertech e *Backing ACC*. O decorativo de cortiça consiste numa folha de cortiça que concede ao material o visual habitual da cortiça, sendo produzido na unidade de Lourosa. O IN 1.3 é idêntico as outras situações e o *core* Subertech é idêntico ao NRT, mas é constituído por aglomerado de cortiça e HDPE, este componente é também produzido na fábrica de revestimentos. O *Backing* é uma camada de cortiça produzida na Amorim Cork Composites.

O Wise Pet na sua constituição contém uma película de Pet que confere o visual ao produto. É também constituído por duas camadas de IN, entre as quais é colocada uma camada de Subertech. Já o Wise DP é constituído por uma camada de impressão que confere o visual, uma camada designada de DP ARL semelhante ao IN, e que confere a aderência da pintura. Esta camada é produzida em Lourosa. Possui ainda uma camada de Subertech e uma camada de *Backing de ACC*.

O produto Artcomfort é constituído por uma camada de impressão, uma camada de XDP idêntica ao IN e ao DP ARL que permite a aderência da tinta. É também constituído por uma camada de HDF, e uma camada de IN.

O produto Authentica é formado por um semiacabado, constituído por um filme com um visual, uma película de PVC, e uma camada de XDP. No *core* leva uma camada de HDF, e na parte inferior uma camada de BL.

Os produtos CNB e Cork Style apresentam a mesma estrutura de materiais, sendo constituídos por um semiacabado, formado por um decorativo de cortiça e uma camada de IN. Contêm ainda uma placa de HDF e uma camada de BL.

Os produtos da gama Cork Floor são constituídos por uma camada superior de semiacabado, constituída por um decorativo de cortiça e uma camada de IN, por um *core* de HDF, e por uma camada de BL. O produto Resist + possui um core igual ao produto LVT, no entanto a camada superior é uma folha de Pet ou Pp.

Na Tabela 1 apresenta-se um resumo dos diferentes constituintes dos produtos.

Tabela 1 - Constituição dos produtos

| | |
|------------|--|
| LVT | <i>Top Layer</i> |
| | IN 1.3 |
| | HDF |
| | BL |
| HydroCork | <i>Top Layer</i> |
| | NRT |
| | <i>Bottom Layer</i> |
| Wise Cork | Decorativo Cortiça |
| | IN 1.3 |
| | Subertech |
| | <i>Backing ACC</i> |
| Wise Pet | Pet |
| | IN 1.3 |
| | <i>Subertech</i> |
| Wise DP | IN 1.3 |
| | DP |
| | DP ARL |
| | <i>Subertech</i> |
| Artcomfort | <i>Backing ACC</i> |
| | DP |
| | XPD |
| | HDF |
| Authentica | IN 1.3 |
| | Semiabado (Filme+PVC+3.2 XDP) |
| | HDF |
| CNB | BL |
| | Semiabado (Decorativa cortiça+3.5 IN) |
| | HDF |
| COF | BL |
| | Semiabado (PVC+3.5 IN+ Decorativo Cortiça) |
| | HDF |
| Cork Style | BL |
| | Semiabado (Decorativa cortiça+3.5 IN) |
| | HDF |
| Resist + | Pet/PP |
| | IN 1.3 |
| | HDF |
| | BL |

3.3.2 - Processo Produtivo

O processo produtivo na Amorim Revestimento, está organizado num ambiente semelhante ao *job shop* com algumas pequenas diferenças e pode dividir-se em duas fases e áreas distintas, componentes e acabamentos finais.

No sector dos componentes, são produzidas as bases de cortiça, que são usadas nas fases seguintes do processo.

Nos setores dos acabamentos finais, são realizadas operações de acabamentos, nomeadamente colagem, pintura, corte e embalagem.

A fábrica labora em 3 turnos de 8 horas, 5 dias por semana, sendo que o primeiro turno da semana se inicia às 5:00 horas de segunda feira e o último turno da semana termina às 5:00 horas de sábado, como demonstra a Tabela 2. Os equipamentos não trabalham todos em regime completo, sendo os turnos de trabalho rotativos de semana a semana, o que significa que se um equipamento trabalha no primeiro turno de uma determinada semana, na semana seguinte trabalhará no segundo turno.

Tabela 2 - Turnos de trabalho

| | Turno 1 | Turno 2 | Turno 3 |
|---------|---------|---------|---------|
| Segunda | 05:00 | 13:00 | 21:00 |
| Terça | 05:00 | 13:00 | 21:00 |
| Quarta | 05:00 | 13:00 | 21:00 |
| Quinta | 05:00 | 13:00 | 21:00 |
| Sexta | 05:00 | 13:00 | 21:00 |

No ponto seguinte será descrito o processo produtivo em maior detalhe.

3.3.2.1 - Componentes

A primeiro passo da produção de qualquer pavimento de cortiça é a aglomeração das placas de cortiça para formação do *core*. A base do *core* pode ser IN, HDF, XDP, NRT e *Subertech*. Dentro destes apenas o 3.5 IN, o XDP, o NRT e o *Subertech* são produzidos nas instalações da AR de Oleiros.

O 3.5 IN e o XDP são placas constituídas unicamente por aglomerados de cortiça, e um material aglutinante. Estas bases são produzidas num equipamento designado de SICO. A SICO é uma prensa descontínua, isto significa que os aglomerados de cortiça e o aglutinante são dispersos num tapete rolante, que posteriormente é prensado por uma secção fixa, que se move apenas na

vertical. Após um tempo pré-determinado de prensagem, a prensa abre-se, e o tapete desloca-se com a placa de cortiça prensada, prosseguindo para um processo de corte, em apenas uma direção, por forma a obter a dimensão desejada.

No caso do NRT e do *Subertech* a produção é feita num equipamento diferente das restantes bases, pelo facto de conterem polímeros na sua composição. Estas bases são produzidas num equipamento designado de Subertech, sendo que a designação de uma das bases produzidas neste equipamento, é igual ao nome do equipamento onde é produzida, tendo assumido essa designação por tratar-se de um material novo na empresa. Isto deve-se ao facto da base NRT (*Noise Reduction Technology*), no passado, ser comprada ao exterior, sendo que, quando passou a ser produzida *indoors*, manteve a designação. A tecnologia usada na Subertech é diferente da prensa SICO, pois na primeira a prensagem é realizada de forma contínua por dois cilindros. Isto significa que no fim da prensagem as placas precisam ser cortadas em duas direções, comprimento e largura.

As bases produzidas nos equipamentos SICO e Subertech passam, posteriormente, por um processo de lixagem, também este realizado no setor produtivo dos componentes. Após a colagem das bases no setor dos acabamentos finais, alguns produtos voltam a passar pelo processo de lixagem para eliminar relevos indesejados.

Ainda na área de componentes, existe outra prensa designada de Hymmen, na qual, após a colagem das bases em acabamentos finais, são colados os visuais de cortiça às bases. Esta prensa é dividida em dois processos de prensagem, um a frio e um a quente, que garante uma melhor aderência dos visuais às bases. Este processo ocorre para os produtos *Wise Cork*, *CNB* e *Authentica*.

No caso do *Authentica* este é ainda sujeito a outra operação num equipamento designado de *Diffen*, onde é colada uma película de PVC transparente, terminando aqui o processo de produção do semiacabado.

Na área de componentes são também realizadas outras operações, no entanto não são relevantes para este estudo, pois são produtos que durante o processo produtivo, são processados em AF2, área produtiva que não será objeto de estudo neste projeto.

3.3.2.2 - *Acabamentos Finais*

Nas áreas de acabamentos finais são realizadas as operações que finalizam o processo produtivo. Ainda que os equipamentos existentes nas diferentes naves realizem operações semelhantes, estes estão alocados ao processamento de determinados produtos.

É de notar que o processamento completo de um determinado produto pode não acontecer todo na mesma área, podendo este começar o processamento numa das secções dos acabamentos finais, e ser transportado para outra nave para realizar as operações seguintes.

O transporte entre AF1 e AF3 é feito através de um camião ou através de uma empilhadora, dependendo das quantidades a transportar. Quando a deslocação é no interior da unidade, esta pode ocorrer via transportadores automáticos, quando possível, ou por empilhadores. Quando o equipamento está indisponível o material é colocado noutra localização, enquanto espera para ser processado.

Estas duas áreas (AF1 e AF3) são o foco do estudo e, assim, o processo produtivo nestas secções será descrito com maior detalhe. A clara compreensão destes processos é fundamental para um correto desenvolvimento do algoritmo de sequenciamento.

No interior destas unidades existem equipamentos com funções semelhantes, sendo a distinção entre eles feita com recurso a numeração.

No edifício de AF1 existem 6 equipamentos produtivos: colagem 9, corona, envernizamento 1, corte final 1, corte final 2 e embalagem 1. A distribuição destes equipamentos no espaço fabril está representado na Figura 7.

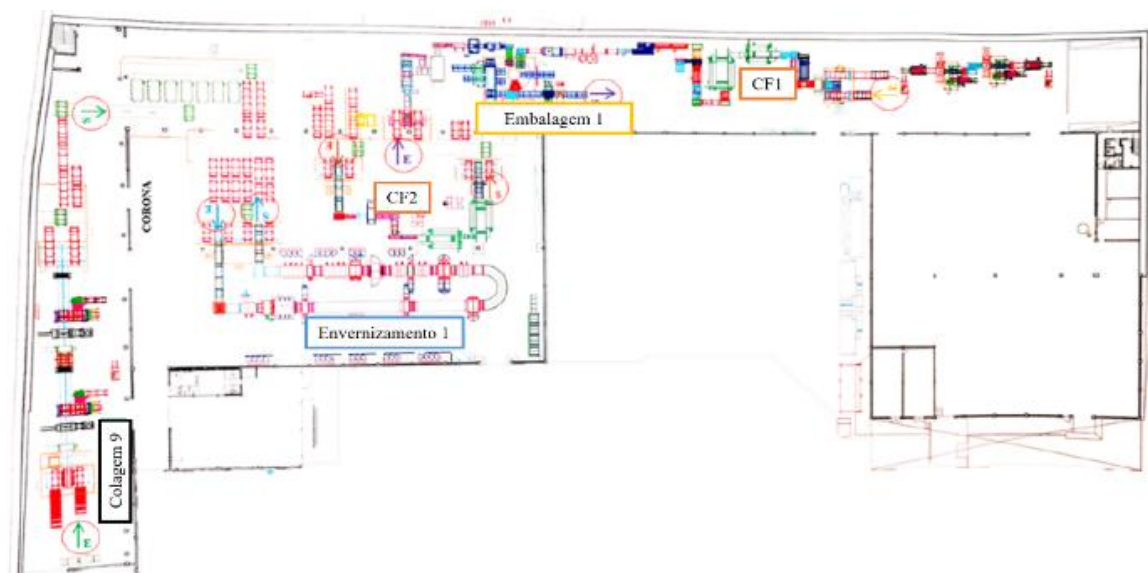


Figura 7 - Planta de Acabamentos Finais 1

No edifício de AF3 existem 7 equipamentos: colagem 6, colagem 7, colagem 8, pintura 1, pintura 3, envernizamento 4, corte final 5, embalagem 5. A distribuição destes equipamentos no espaço fabril está representada na Figura 8.

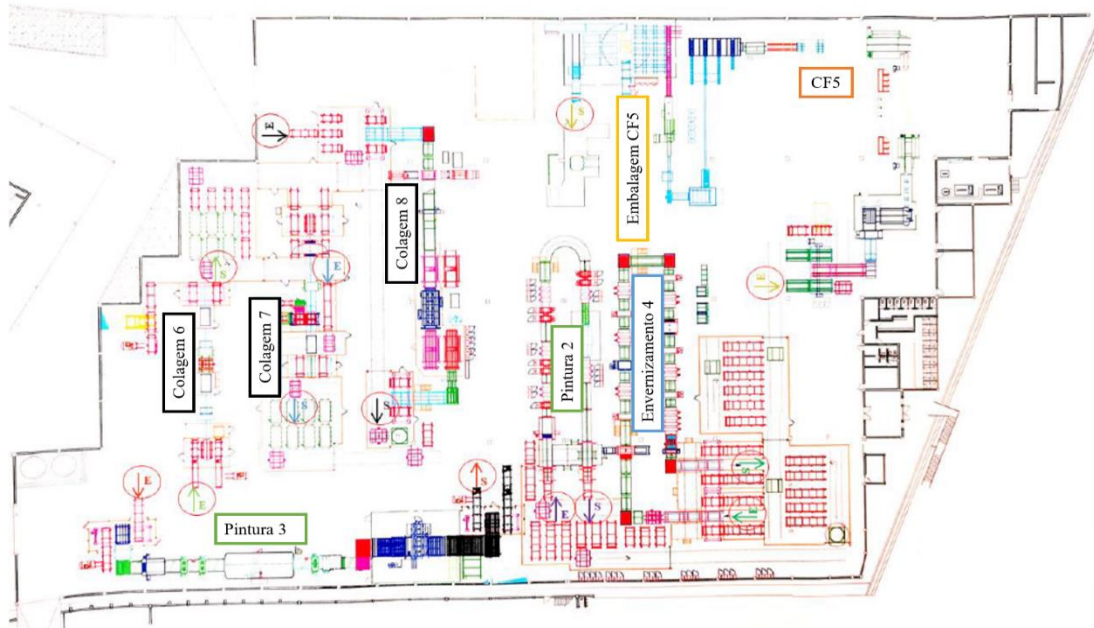


Figura 8 - Planta de Acabamentos Finais 3

Os equipamentos de colagem 6, 7, 8 e 9 realizam operações semelhantes, estando cada um dos equipamentos ajustados às especificidades de algum tipo de produto. Os equipamentos de colagem começam por retirar o *core* dos produtos de uma paleta onde estão empilhados. De seguida o *core* passa por um rolo de cola e um braço mecânico coloca a parte inferior do pavimento sobre o *core*. Os componentes, depois de colados, passam por um virador e o processo é repetido para a parte superior dos pavimentos.

Os equipamentos de pintura 2 e 3, começam por imprimir uma camada branca na base do produto, que funciona como uma folha branca para posteriormente imprimir o padrão desejado. O equipamento de pintura 3 possui uma definição de impressão superior, no entanto a velocidade de impressão é mais reduzida. Os produtos que, na sua gama operatória, passam por este equipamento, realizam primeiro a operação de corte e só depois a pintura e ou verniz.

Os equipamentos de verniz 1 e 4 realizam o acabamento em produtos que foram pintados ou que possuem visuais de cortiça. O verniz é colocado no produto através de um rolo, passando depois por uma radiação para promover a cura.

Os equipamentos de corte 1, 2 e 5 começam por realizar um pré corte às placas que foram previamente coladas para, de seguida, serem realizados os encaixes tanto em comprimento como em largura.

Após as operações anteriores serem terminadas, de acordo com a gama operatória de cada produto, este é embalado. Os equipamentos de embalagem 1 e 5 começam por colocar os produtos

em montes, de acordo com o número de ladrilhos que leva cada caixa. O produto é colocado na caixa e posteriormente, as caixas são colocadas numa palete. Após a palete estar completa, também de acordo com uma especificação, é plastificada e cintada. Existe ainda outro equipamento de embalagem acoplado ao equipamento de corte 1, e que funciona em conjunto com este.

Depois de descrito o processo, para conhecer melhor o que se passa no sistema, foi necessário recolher um conjunto de dados que serão apresentados no ponto seguinte, e que posteriormente servirão de dados de entrada para o algoritmo.

3.3.3 - Dados Recolhidos

Finalizada a identificação dos produtos processados nas áreas a estudar, os mesmos foram subdivididos em grupos dentro de cada gama de produto. Esta separação por características, permitirá agrupar os produtos de acordo com as cadências dos equipamentos e com as mudanças de ferramentas necessárias, para cada grupo analisado.

Para realizar a classificação dos diferentes tipos de produtos foram consideradas 6 características que os distinguem: a família de produto, a dimensão do produto final, o acabamento superficial, a existência e dimensão de biselado, o encaixe e a espessura. Atendendo a estas características, foram identificados 22 grupos diferentes, que se apresentam na Tabela 3.

Dentro de cada um dos grupos existem diferentes referências de produtos. No entanto, o processo produtivo é igual na sequência de equipamentos necessária, nas cadências de produção, e nas ferramentas necessárias, querendo com isto dizer que não são necessários *setups*, ou outras alterações, para referências que pertençam ao mesmo grupo.

Sendo válida a criação destes grupos de produtos, para além da simplificação do problema para o utilizador, o número de variáveis a considerar no algoritmo de sequenciamento é notavelmente menor. A resolução do problema irá tornar-se mais rápida, devido ao facto deste tipo de problemas apresentar um crescimento exponencial, como explicado no ponto 2.3 do presente relatório.

Tabela 3 - Grupos de produtos

| | Família | Dimensão | Acabamento | Biselado | Encaixe | Espessura | Gama Operatória |
|----|------------|----------|---------------|----------------|-----------|-----------|-----------------|
| 1 | LVT | 1220*185 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 1 |
| 2 | LVT | 1220*185 | PVC 0,5 | sem | LOC | 10,5 | 1 |
| 3 | LVT | 1220*185 | PVC 0,2 | sem | LOC | 10,5 | 1 |
| 4 | LVT | 1220*185 | PVC 0,3 | sem | LOC | 10,5 | 1 |
| 5 | HYDRO CORK | 1225*145 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 2 |
| 6 | HYDRO CORK | 1225*145 | PVC 0,3 | sem | PRESS FIT | 6,0 | 2 |
| 7 | HYDRO CORK | 1225*195 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 3 |
| 8 | HYDRO CORK | 615*295 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 9 |
| 9 | WISE CORK | 1225*190 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 4 |
| 10 | WISE PET | 1225*190 | PET 0,25 | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 6 |
| 11 | WISE DP | 1225*190 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 5 |
| 12 | WISE DP | 1225*190 | PUR V2 LINEAR | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 5 |
| 13 | ARTCOMFORT | 1220*185 | PUR V2 LINEAR | sem | LOC | 10,5 | 8 |
| 14 | ARTCOMFORT | 1830*185 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 1 mm | LOC | 11,5 | 7 |
| 15 | ARTCOMFORT | 1830*185 | PUR V2 LINEAR | 4 LADOS 1 mm | LOC | 11,5 | 7 |
| 16 | AUTHENTICA | 1220*185 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 9 |
| 17 | CNB | 905*140 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | CURTO | 10,5 | 11 |
| 18 | CORK STYLE | 1220*185 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | CURTO | 10,5 | 12 |
| 19 | CORK STYLE | 1220*140 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | LOC DR | 10,5 | 13 |
| 20 | COF | 1220*140 | PVC 0,5+HPS | 4 LADOS 0,7 mm | LOC DR | 10,5 | 14 |
| 21 | COF | 905*295 | PVC 0,5+HPS | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 15 |
| 22 | Resist + | 1225*185 | PP 0,25 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 16 |

Após a identificação dos grupos de produtos, foi recolhida a informação relativa às gamas operatórias e às respetivas cadências de produção, apresentada na Tabela 4. As cadências de produção foram obtidas junto do departamento de engenharia de processo, que frequentemente realiza medições das mesmas, de forma a que esta informação seja usada para custeio e para planeamento das operações.

Tabela 4 - Gamas Operatórias

| Gama Operatória | Tarefa | Máquina | Cadência (m ² /h) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | Encolar bases madeira | Colagem 6 | 772 |
| | Colar folhas decorativo | Colagem 7 | 772 |
| | Estabilizar | Estabilização semi-acabados | - |
| | Pré-cortar; cortar | Corte Final 5 | 718 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 5 | 252 |
| 2 | Encolar bases cortiça | Colagem 9 | 682 |
| | Estabilizar | Estabilização semi-acabados | - |
| | Pré-cortar; cortar/biselar; Embalar | Corte Final 1 | 671 |
| 3 | Encolar bases cortiça | Colagem 9 | 688 |
| | Estabilizar | Estabilização semi-acabados | - |
| | Pré-cortar; cortar/biselar; Embalar | Corte Final 1 | 582 |

| Gama Operatória | Tarefa | Máquina | Cadência (m ² /h) |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 4 | Encolar bases cortiça | Colagem 6 | 772 |
| | Prensar | Prensa Hymmen | 351 |
| | Lixar | Lixagem 3 | 1461 |
| | Pré-cortar; cortar/bisela | Corte final 2 | 461 |
| | Pintar/Envernizar | Envernizamento 1 | 734 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 567 |
| 5 | Encolar bases cortiça | Colagem 6 | 772 |
| | Lixar | Lixagem 3 | 1 461 |
| | Pré-cortar; cortar/bisela | Corte final 2 | 461 |
| | Pintar p/jato tinta | Pintura 3 | 215 |
| | Envernizar c/ <i>embossing</i> | Envernizamento 4 | 362 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 567 |
| 6 | Encolar bases cortiça | Colagem 6 | 772 |
| | Lixar | Lixagem 3 | 1 461 |
| | Encolar visual | Colagem 9 | 670 |
| | Pré-cortar; cortar/bisela | Corte final 2 | 545 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 567 |
| 7 | Encolar bases madeira | Colagem 8 | 410 |
| | Estabilizar | Estabilização semi-acabados | - |
| | Pré-cortar; cortar/biselar; escolher | Corte Final 5 | 1 056 |
| | Pintar p/jato tinta | Pintura 3 | 304 |
| | Envernizar | Envernizamento 4 | 514 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 5 | 267 |
| 8 | Encolar bases madeira | Colagem 6 | 772 |
| | Pintar p/jato tinta | Pintura 3 | 203 |
| | Envernizar | Envernizamento 4 | 343 |
| | Corta | Corte Final 5 | 279 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 5 | 252 |
| 9 | Encolar bases madeira | Colagem 6 | 772 |
| | Envernizar | Envernizamento 4 | 343 |
| | Pré-cortar; cortar/bis. | Corte Final 5 | 718 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 5 | 252 |
| 10 | Encolar bases cortiça | Colagem 9 | 522 |
| | Estabilizar | Estabilização semi-acabados | - |
| | Pré-cortar; cortar/biselar | Corte Final 1 | 138 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 214 |
| 11 | Encolar bases madeira | Cola MDF | 699 |
| | Pré-cortar; cortar/bisela | Corte final 2 | 312 |
| | Envernizar | Envernizamento 1 | 400 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 309 |
| 12 | Encolar bases madeira | Cola MDF | 943 |
| | Pré-cortar; cortar/bisela | Corte final 2 | 718 |
| | Envernizar | Envernizamento 1 | 718 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 252 |
| 13 | Encolar bases madeira | Cola MDF | 934 |
| | Envernizar | Verniz AF2 | 938 |
| | Corta e Embala | Corte final 4 | 675 |
| 14 | Encolar bases madeira | Colagem 6 | 779 |
| | Envernizar | Envernizamento 1 | 938 |
| | Cortar | Corte Final 2 | 420 |
| | Escolher; embalar | Embalagem 1 | 416 |
| 15 | Encolar bases madeira | Cola MDF | 737 |
| | Envernizar | Verniz AF2 | 874 |
| | Corta e Embala | Corte final 4 | 897 |
| 16 | Encolar bases madeira | Colagem 9 | 335 |
| | Pré-cortar; cortar/biselar; escolher | Corte Final 5 | 718 |
| | Embala | Embalagem 5 | 252 |

Como referido na revisão bibliográfica, a não contabilização do tempo de *setups* pode tornar a solução de um problema de sequenciamento irrealista. Desse modo foi realizada uma recolha da duração destes tempos. Os *setups* que acontecem são dependentes da sequência de produtos, variando de acordo com o produto processado antes e depois da mudança de ferramentas, podendo assim ser representado sob a forma de matriz.

Os *setups* nas máquinas de colagem, ocorrem quando existe uma mudança de dimensões, ou quando o material que está a ser colado se altera. Nos equipamentos de envernizamento, os *setups* ocorrem, quando muda a dimensão e/ou o verniz, ou quando o material a envernizar se encontra em ladrilhos e passa para um material em placas ainda por cortar e vice-versa. Nos equipamentos de corte, as mudanças de ferramentas ocorrem quando existe uma mudança de dimensão, quando o biselado é alterado, ou quando a família de produto é alterada de wise pet ou wise cork para wise dp. Nos equipamentos de embalagem, o *setup* ocorre quando existe uma mudança de dimensões.

Dessa forma, foram recolhidos os tempos de *setups* dos equipamentos, tendo em consideração as diferentes sequências possíveis de produtos que podem passar numa determinada máquina. A duração dos tempos de *setup*, foi obtida através dos supervisores de produção e dos operadores, dado que nem sempre era possível assistir as mudanças de ferramentas por ocorrerem no turno da noite. Para o funcionamento do algoritmo é necessário considerar um tempo de transição entre todas as tarefas e, dessa forma, estabeleceu-se um tempo de transição de zero quando a mudança de ferramentas não é necessária ou caso o produto não seja processado no equipamento em questão. A recolha realizada é apresentada sob a forma de matriz como exemplificado na Tabela 5, para o equipamento de colagem 6. Os produtos que são processados no equipamento apresentam-se a sombreado, e a unidade temporal na qual são apresentados os dados recolhidos é a hora. Os restantes tempos de mudança de ferramentas encontram-se no Anexo A.

Tabela 5 - Setups Colagem 6

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 |
| 10 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 |
| 11 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 |
| 12 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Como referido anteriormente, nem todos os equipamentos trabalham em regime completo, dessa forma foi também recolhida a informação relativa aos diferentes regimes de trabalho. Os equipamentos pintura 2 e 3, verniz 1, verniz 4, corte final 1 e embalagem 1, encontram-se nesta situação, pois não trabalham os três turnos. Os dados relativos ao número de turnos de trabalho desses equipamentos, são apresentados na Tabela 6. Os equipamentos que não estão apresentados na mesma tabela, trabalham três turnos.

Tabela 6 - Turnos de trabalho dos equipamentos

| Máquina | Nº de turnos de trabalho |
|---------------|--------------------------|
| Pintura 2 | 2 |
| Pintura 3 | 2 |
| Verniz AF2 | 1 |
| Verniz 1 | 1 |
| Verniz 4 | 2 |
| Corte final 1 | 2 |
| Embalagem 1 | 2 |

As avarias de equipamentos são frequentes na fábrica em questão. Assim sendo, de forma a contornar esta situação, foi feita uma análise para contabilização do tempo consumido com avarias nos diferentes equipamentos. A empresa utiliza o indicador *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*, calculado a partir da disponibilidade, rendimento e qualidade. Para o cálculo da disponibilidade dos equipamentos, são necessários os dados relativos às avarias. Desta forma, foram consultados e recolhidos os dados relativos às percentagens temporais, perdidas em avarias dos diferentes equipamentos, ao longo do ano de 2019. Esta percentagem será posteriormente adicionada ao tempo de processamento, criando uma folga nos tempos de processamento para precaver este tipo de acontecimentos, e evitar que o plano de sequenciamento se torne inutilizável e inflexível. Os valores resultantes da análise estão apresentados no gráfico da Figura 9.

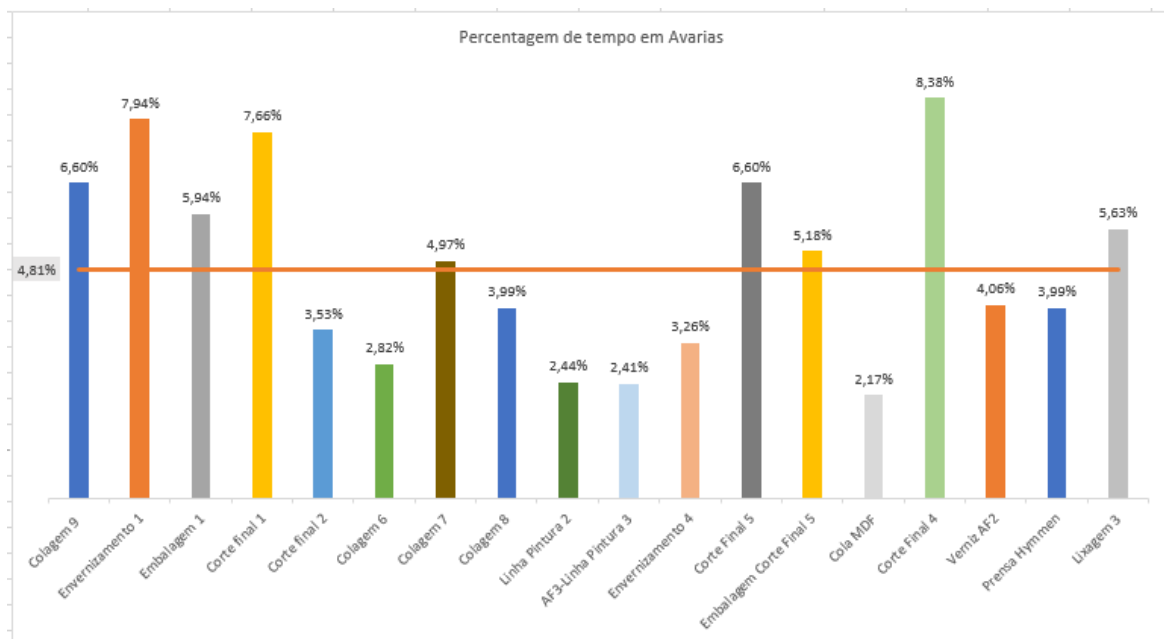


Figura 9 - Percentagem de tempo em avarias no ano de 2019

Os dados referentes aos OEE, foram consultados no sistema informático da organização. Por análise das folhas de produção, nas quais é possível consultar as ocorrências durante os turnos de laboração, concluiu-se que os registos são efetuados em múltiplos de quartos de hora. Significa isto que, a unidade temporal mais pequena, presente nos registos de produção são 15 minutos. Desta forma, para efeitos do algoritmo, será utilizado como unidade temporal o quarto de hora.

3.4 - Modelo

Para o desenvolvimento do algoritmo de sequenciamento foi utilizado o CP Optimizer, integrado no Cplex. Devido à dimensão e tipologia do problema em causa, o tempo de resolução

do mesmo pode atingir valores temporais consideráveis. Dessa forma o algoritmo será interrompido ao fim de 60 segundos de execução, ou caso obtenha a solução ótima. O intervalo de tempo escolhido para a execução prende-se com o facto de o algoritmo obter as soluções admissíveis para problemas desta dimensão em aproximadamente sete segundos, como demonstrado mais a frente. O tempo restante é consumido a tentar melhorar as soluções admissíveis obtidas. Após a realização de diversos testes, com diferentes tempos de execução, concluiu-se que o algoritmo não melhora a solução com o aumento do tempo de execução, para os casos aqui apresentados.

Para construir um modelo que respondesse às necessidades da organização, começou-se por modelar um algoritmo capaz de sequenciar um ambiente produtivo *job-shop* e, posteriormente, adicionaram-se restrições que aumentam a complexidade do modelo, mas que permitem representar melhor o problema e o sistema, nomeadamente os turnos de trabalho e os tempos de *setups* entre os diferentes produtos.

Para além do algoritmo de sequenciamento, foi também compilado um ficheiro *Excel* onde foram introduzidos os dados de entrada do modelo e para onde serão exportados os resultados obtidos. Os resultados obtidos pelo algoritmo, são assim, convertidos num formato de leitura perceptível para utilizador do mesmo. O ficheiro de *Excel* funcionará como base de dados e como plataforma de interação com o utilizador.

A cada um dos equipamentos fabris considerados neste estudo, foi atribuído um número, que servirá de identificador quando introduzido no algoritmo, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Numeração dos equipamentos

| Equipamentos | Referência | Equipamentos | Referência |
|------------------|------------|-----------------------------|------------|
| Colagem 6 | 1 | Lixagem 3 | 11 |
| Colagem 7 | 2 | Prensa Hymmen | 12 |
| Colagem 8 | 3 | Corte Final 1 | 13 |
| Colagem 9 | 4 | Corte Final 2 | 14 |
| Cola MDF | 5 | Corte Final 4 | 15 |
| Pintura 2 | 6 | Corte Final 5 | 16 |
| Pintura 3 | 7 | Embalagem 1 | 17 |
| Verniz AF2 | 8 | Embalagem 5 | 18 |
| Envernizamento 1 | 9 | Embalagem Manual | 19 |
| Envernizamento 4 | 10 | Estabilização semi-acabados | 20 |

Atendendo à gama operatória de cada grupo de produtos, representadas na Tabela 3, foi discriminada a sequência de equipamentos com a respetiva referência do equipamento, visível na Tabela 8. No seguimento da operação é também visível, na mesma tabela, a cadência em metros quadrados por hora para cada equipamento e produto. Esta informação será posteriormente utilizada, para o cálculo dos tempos de processamento que irão alimentar o algoritmo. No caso da estabilização dos produtos (equipamento 20), os valores apresentados dizem respeito ao tempo de estabilização necessário e não à cadência.

Tabela 8 - Sequência dos equipamentos e cadências para os grupos de produtos

| Grupo | Operação 1 | Operação 2 | Operação 3 | Operação 4 | Operação 5 | Operação 6 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1 / 772 | 2 / 772 | 20/20 | 16 / 718 | 18 / 252 | |
| 2 | 1 / 772 | 2 / 772 | 20/20 | 16 / 718 | 18 / 252 | |
| 3 | 1 / 772 | 2 / 772 | 20/20 | 16 / 718 | 18 / 252 | |
| 4 | 1 / 772 | 2 / 772 | 20/20 | 16 / 718 | 18 / 252 | |
| 5 | 4 / 682 | 20/80 | 13 / 671 | 17 / 433 | | |
| 6 | 4 / 682 | 20/80 | 13 / 671 | 17 / 433 | | |
| 7 | 4 / 688 | 20/80 | 13 / 582 | 17 / 552 | | |
| 8 | 4 / 522 | 20/80 | 13 / 138 | 17 / 214 | | |
| 9 | 1 / 772 | 12 / 351 | 11 / 1461 | 14 / 461 | 9 / 734 | 17 / 567 |
| 10 | 1 / 772 | 11 / 1461 | 4 / 670 | 14 / 545 | 17 / 567 | |
| 11 | 1 / 772 | 11 / 1461 | 14 / 461 | 7 / 215 | 10 / 362 | 17 / 567 |
| 12 | 1 / 772 | 11 / 1461 | 14 / 461 | 7 / 215 | 10 / 362 | 17 / 567 |
| 13 | 1 / 772 | 7 / 203 | 10 / 343 | 16 / 279 | 18 / 252 | |
| 14 | 3 / 410 | 20/20 | 16 / 1056 | 7 / 304 | 10 / 514 | 18 / 267 |
| 15 | 3 / 410 | 20/20 | 16 / 1056 | 7 / 304 | 10 / 514 | 18 / 267 |
| 16 | 1 / 772 | 10 / 343 | 16 / 718 | 18 / 252 | | |
| 17 | 5 / 699 | 14 / 312 | 9 / 400 | 17 / 309 | | |
| 18 | 5 / 943 | 14 / 718 | 9 / 718 | 17 / 252 | | |
| 19 | 5 / 943 | 14 / 718 | 9 / 718 | 17 / 252 | | |
| 20 | 1 / 779 | 9 / 938 | 14 / 420 | 17 / 416 | | |
| 21 | 5 / 737 | 8 / 874 | 15 / 897 | | | |
| 22 | 5 / 934 | 8 / 938 | 15 / 675 | | | |

Tendo em conta que os produtos não utilizam todos os equipamentos presentes na fábrica, considera-se, nesses casos, a duração desse mesmo processo como zero, não influenciando assim o resultado do algoritmo. Apesar disto um produto é considerado como terminado, quando a última tarefa com duração superior a zero instantes é terminada, sendo este o valor considerado para o cálculo da função objetivo.

No caso do processo de estabilização, em que não é utilizado qualquer equipamento, é admitida a sobreposição desta operação, dado que não existe qualquer impedimento a que dois ou mais produtos diferentes estabilizem ao mesmo tempo, considerando-se um recurso com capacidade infinita.

A conversão da unidade temporal dos turnos de trabalho para quarto de hora, está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Conversão dos turnos de trabalho na unidade quarto de hora

| Dia | Turno 1 | Turno 2 | Turno 3 |
|---------|---------|---------|---------|
| Segunda | 0 | 32 | 64 |
| Terça | 96 | 128 | 160 |
| Quarta | 192 | 224 | 256 |
| Quinta | 288 | 320 | 352 |
| Sexta | 384 | 416 | 448 |

De forma equivalente, os tempos necessários para realizar as mudanças de ferramentas, são convertidos na mesma unidade temporal.

O algoritmo permite ainda que, quando ocorre um intervalo, se estenda a duração da tarefa, interrompendo a tarefa no início do intervalo, e retomando a execução no fim (Figura 10).

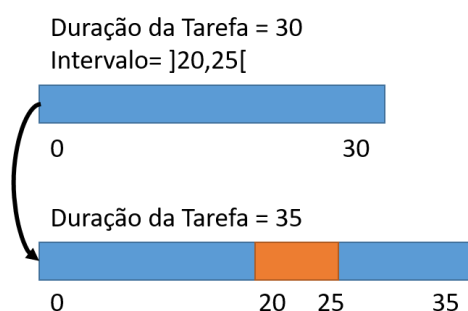


Figura 10 - Interrupção de tarefas por paragens

Como foi dito anteriormente, o ficheiro de Excel irá compilar todos estes dados e o utilizador apenas terá de inserir os grupos de produtos a produzir e as respetivas quantidades. O Excel fará a estruturação dos dados no formato requerido pelo algoritmo e também o tratamento dos resultados. Este tratamento de resultados inclui, a conversão das unidades temporais do algoritmo

em horas, minutos e dias da semana, e a criação de um diagrama de *Gantt* para facilitar a visualização do resultado como um todo.

Para avaliação da qualidade das soluções, é possível utilizar a minimização do *makespan* ou a minimização do atraso total, atendendo que, no caso da empresa os principais objetivos eram o aumento da taxa de ocupação dos equipamentos para aumentar a sua rentabilidade, e a minimização dos atrasos. Idealmente deveria ser desenvolvida uma função multicritério, para garantir um equilíbrio entre estes dois fatores. No entanto, o CP Optimizer ainda não é capaz de suportar problemas multicritério. Como tal, o algoritmo desenvolvido permite minimizar as duas situações separadamente. Apesar de o algoritmo poder minimizar os dois objetivos, ainda que separadamente, neste relatório só está apresentada a situação em que se procura minimizar o *makespan*, dado que a empresa não poderia fornecer as datas de entregas das encomendas, por se tratar de informação confidencial.

3.5 -Resultados

A comparação direta de resultados, para avaliar a forma como o sequenciamento é feito atualmente, é complexa por diversos motivos:

- Os registos de produção são feitos manualmente o que dificulta o rastreamento dos produtos;
- Os produtos não são agrupados de acordo com as suas características, o que iria traduzir-se num aumento de tarefas a sequenciar e, conseqüentemente, em maior tempo de processamento;
- Numa determinada semana N, é normal estarem a ser terminadas encomendas da semana N-1 e a serem iniciadas encomendas da semana N+1.

Desta forma, para demonstrar o funcionamento do algoritmo desenvolvido será, em primeiro lugar, realizado o sequenciamento de uma semana de produção individualmente. Posteriormente, serão recolhidos os dados relativos aos momentos em que cada equipamento fica livre. Estes instantes serão depois utilizados, como restrições de disponibilidade para o sequenciamento da semana seguinte. Para avaliar a solução final, serão considerados os instantes em que as encomendas terminam o processamento e o tempo que ficou livre nos equipamentos, para processamento de encomendas das semanas seguintes.

A explicação dos passos necessários, será feita em maior detalhe para a primeira semana a considerar, dado que o procedimento para a semana seguinte será similar.

Começou-se por recolher a informação relativa às referências produzidas na semana a estudar. Estas foram seguidamente agrupadas de acordo com as suas características, encaixando-se nos grupos detalhados na Tabela 3.

As semanas 42 e 43 do ano de 2019 foram as selecionadas para a realização da demonstração e análise, por serem representativas de uma semana normal em que são produzidos vários grupos de produtos, que exigem mudanças de ferramentas nos diferentes equipamentos, tornando-se assim mais ineficiente o sequenciamento com base na intuição. Para facilitar a interpretação dos resultados, é possível observar na Tabela 10 - Conversão dos turnos semanais em quartos de hora a conversão dos turnos de trabalho em quartos de hora, para que se perceba em que instante terminam o processamento dos diferentes produtos no decorrer das semanas.

Tabela 10 - Conversão dos turnos semanais em quartos de hora

| | | | | | |
|-----------|---------|------|------|------|------|
| Semana 42 | Segunda | 0 | 32 | 64 | 96 |
| | Terça | 96 | 128 | 160 | 192 |
| | Quarta | 192 | 224 | 256 | 288 |
| | Quinta | 288 | 320 | 352 | 384 |
| | Sexta | 384 | 416 | 448 | 480 |
| Semana 43 | Segunda | 480 | 512 | 544 | 576 |
| | Terça | 576 | 608 | 640 | 672 |
| | Quarta | 672 | 704 | 736 | 768 |
| | Quinta | 768 | 800 | 832 | 864 |
| | Sexta | 864 | 896 | 928 | 960 |
| Semana 44 | Segunda | 960 | 992 | 1024 | 1056 |
| | Terça | 1056 | 1088 | 1120 | 1152 |
| | Quarta | 1152 | 1184 | 1216 | 1248 |
| | Quinta | 1248 | 1280 | 1312 | 1344 |
| | Sexta | 1344 | 1376 | 1408 | 1440 |

3.5.1 - Sequenciamento da semana 42

O código do algoritmo relativo ao sequenciamento da semana 42, está apresentado no Anexo B. Relativamente à semana 42, foram produzidas 154 referências diferentes, perfazendo um total de 42085 metros quadrados, podendo estas ser vistas no Anexo C.

As referências apresentadas encaixam-se em 11 grupos diferentes, estando as quantidades referentes a cada grupo e o número de referências em cada grupo resumidas na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo da produção na semana 42

| Grupo | Quantidades | Referências |
|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 1647,072 | 2 |
| 3 | 3899,154 | 5 |
| 5 | 9694,737 | 9 |
| 7 | 6049,296 | 3 |
| 8 | 1144,733 | 3 |
| 12 | 2342,396 | 2 |
| 13 | 4377,744 | 6 |
| 15 | 3060,717 | 7 |
| 16 | 9353,274 | 11 |
| 20 | 404,336 | 2 |
| 21 | 112,012 | 1 |
| Total | 42085 | 154 |

Atendendo aos grupos presentes (Tabela 11), e às cadências dos equipamentos (Tabela 8), é calculada a duração do processamento em cada equipamento e é adicionado o fator de compensação pelas avarias, valores estes apresentados no gráfico da Figura 9.

Feitos estes cálculos, os valores obtidos são convertidos na unidade de tempo “quarto de hora”, como descrito no ponto anterior. Para efeitos de cálculo das cadências, o arredondamento das casas decimais é feito por excesso. A sequência de equipamentos necessários para os produtos a considerar, está representada na Tabela 12. Os resultados dos cálculos relativos às cadências supra descritos são apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 - Sequência de processamento dos produtos da semana 42

| Grupo | Operação | Operação | Operação | Operação | Operação | Operação |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 2 | 20 | 16 | 18 | 3 |
| 3 | 1 | 2 | 20 | 16 | 18 | 3 |
| 5 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 |
| 7 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 |
| 8 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 |
| 12 | 1 | 11 | 14 | 7 | 10 | 17 |
| 13 | 1 | 7 | 10 | 16 | 18 | 2 |
| 15 | 3 | 20 | 16 | 7 | 10 | 18 |
| 16 | 1 | 10 | 16 | 18 | 2 | 3 |
| 20 | 1 | 9 | 14 | 17 | 2 | 3 |
| 21 | 5 | 8 | 15 | 1 | 2 | 3 |

Tabela 13 - Tempos de processamento

| Grupo | Quantidade | Operação 1 | Operação 2 | Operação 3 | Operação 4 | Operação 5 | Operação 6 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1647,072 | 10 | 10 | 80 | 10 | 27 | 0 |
| 3 | 3899,154 | 21 | 21 | 80 | 23 | 63 | 0 |
| 5 | 9694,737 | 58 | 80 | 59 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 6049,296 | 36 | 80 | 43 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1144,733 | 10 | 80 | 34 | 22 | 0 | 0 |
| 12 | 2342,396 | 13 | 7 | 21 | 45 | 27 | 18 |
| 13 | 4377,744 | 24 | 87 | 52 | 64 | 70 | 0 |
| 15 | 3060,717 | 31 | 0 | 13 | 41 | 25 | 47 |
| 16 | 9353,274 | 49 | 110 | 53 | 149 | 0 | 0 |
| 20 | 404,336 | 3 | 3 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| 21 | 112,012 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Para facilitar este processo, foi desenvolvida uma plataforma em Excel com recurso a *Visual Basic* (Figura 11). O utilizador apenas deverá introduzir um número do grupo que pretende sequenciar, quais são os grupos e as quantidades.

| Grupo | Família | Dimensão | Acabamento | Biselado | Encaixe | Espessura | Gama Operat | Operação 1 | Operação 2 | Operação 3 | Operação 4 |
|-------|------------|----------|---------------|----------------|-----------|-----------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | LVT | 1220*185 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 6D404 | 1 | 2 | 20 | 16 |
| 2 | LVT | 1220*185 | PVC 0,5 | sem | LOC | 10,5 | 6D404 | 1 | 2 | 20 | 16 |
| 3 | LVT | 1220*185 | PVC 0,2 | sem | LOC | 10,5 | 6D404 | 1 | 2 | 20 | 16 |
| 4 | LVT | 1220*185 | PVC 0,3 | sem | LOC | 10,5 | 6D404 | 1 | 2 | 20 | 16 |
| 5 | HYDRO CORK | 1225*145 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 6F201 | 4 | 20 | 13 | 17 |
| 6 | HYDRO CORK | 1225*145 | PVC 0,3 | sem | PRESS FIT | 6,0 | 6F202 | 4 | 20 | 13 | 17 |
| 7 | HYDRO CORK | 1225*195 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 6F206 | 4 | 20 | 13 | 17 |
| 8 | HYDRO CORK | 615*395 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | PRESS FIT | 6,0 | 6F205 | 4 | 20 | 13 | 17 |
| 9 | WISE CORK | 1225*190 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 6F300 | 1 | 11 | 14 | 7 |
| 10 | WISE PET | 1225*190 | PET 0,25 | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 6F302 | 1 | 11 | 14 | 7 |
| 11 | WISE DP | 1225*190 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 6F304 | 1 | 11 | 14 | 7 |
| 12 | WISE DP | 1225*190 | PUR V2 LINEAR | 4 LADOS 1 mm | LOC | 7,0 | 6F301 | 1 | 11 | 14 | 7 |
| 13 | ARTCOMFORT | 1220*185 | PUR V2 LINEAR | sem | LOC | 10,5 | 6G061 | 1 | 7 | 10 | 16 |
| 14 | ARTCOMFORT | 1830*185 | PUR V2 LISO | 4 LADOS 4 mm | LOC | 11,5 | 6G060 | 3 | 20 | 16 | 7 |
| 15 | ARTCOMFORT | 1830*185 | PUR V2 LINEAR | 4 LADOS 1 mm | LOC | 11,5 | 6G060 | 3 | 20 | 16 | 7 |
| 16 | AUTHENTICA | 1220*185 | PVC 0,5 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 6H401 | 1 | 10 | 16 | 18 |
| 17 | CNB | 305*140 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | LOC DR | 10,5 | 6PA (cnb) | 5 | 14 | 3 | 17 |
| 18 | Cork style | 1220*185 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | LOC | 10,5 | 6PA (cnb) | 5 | 16 | 3 | 18 |
| 19 | Cork style | 1220*140 | EXTRA MATE | 4 LADOS 1 mm | LOC DR | 10,5 | 6PA (cnb) | 5 | 14 | 3 | 17 |
| 20 | COF | 1220*140 | PVC 0,5+HPS | 4 LADOS 0,7 mm | LOC DR | 10,5 | 6H310 | 1 | 3 | 14 | 17 |
| 21 | COF | 305*235 | PVC 0,5+HPS | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 6H310 | 5 | 8 | 15 | 1 |
| 22 | Resist+ | 1225*185 | PP0,25 | 4 LADOS 0,7 mm | LOC | 10,5 | 6PA (cr) | 4 | 16 | 18 | 1 |

| | | | | | |
|------------------|----|---------------------------|----------------------------|-----------|-------------------|
| Número de Grupos | 11 | Sequência das máquinas(1) | Tempos de processamento(2) | Recomeçar | Ver Resultados(3) |
|------------------|----|---------------------------|----------------------------|-----------|-------------------|

| Grupo | Operação 1 | Operação 2 | Operação 3 | Operação 4 | Operação 5 | Operação 6 | Operação 7 | Operação 8 | Operação 9 | Operação 10 | Operação 11 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1 | 1 | 2 | 20 | 16 | 18 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 3 | 1 | 2 | 20 | 16 | 18 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 5 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 7 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 8 | 4 | 20 | 13 | 17 | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 12 | 1 | 11 | 14 | 7 | 10 | 17 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| 13 | 1 | 7 | 10 | 16 | 18 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| 15 | 3 | 20 | 16 | 7 | 10 | 18 | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 |
| 16 | 1 | 10 | 16 | 18 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 20 | 1 | 3 | 14 | 17 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 21 | 5 | 8 | 15 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 10 |

| Quantidade | Operação 1 | Operação 2 | Operação 3 | Operação 4 | Operação 5 | Operação 6 | Operação 7 | Operação 8 | Operação 9 | Operação 10 | Operação 11 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1647,072 | 8,534051813 | 8,534051813 | 80 | 3,175888579 | 26,144 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3899,154 | 20,20287047 | 20,20287047 | 80 | 21,72230641 | 61,8913333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9694,737 | 56,86062757 | 80 | 57,792769 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6049,296 | 35,17032558 | 80 | 41,57591753 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1144,733 | 8,71900383 | 80 | 33,18066667 | 21,3968785 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2342,396 | 12,13676684 | 6,413130732 | 20,32447722 | 43,57346047 | 25,8828287 | 16,52483351 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4377,744 | 22,6826114 | 86,26096552 | 51,05240816 | 62,76335484 | 63,488 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 11 - Plataforma em Excel

Considerando os tempos de mudança de ferramenta recolhidos e os grupos a produzir, é criada uma matriz, onde constam os tempos de transição entre os diferentes produtos. Como descrito anteriormente, é atribuído um tempo de transição nulo, aos produtos que não são processados no equipamento. Os produtos que são processados no equipamento em questão, estão assinalados a sombreado. Para todos os equipamentos presentes na fábrica é criada uma matriz deste tipo (Tabela 14)

Tabela 14 - Setups Colagem 6

| Cola 6 | | | | | | | | | | | |
|--------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 3 | 5 | 7 | 8 | 12 | 13 | 15 | 16 | 20 | 21 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Também para a criação destas matrizes foi criada uma ferramenta no Excel, onde o utilizador coloca os diferentes grupos de produtos, e automaticamente obtém os tempos de *setup* dos produtos a fabricar (Figura 12).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with multiple worksheets. The visible worksheets are COLA 6, PINTURA 3, Verniz 1, COLA 7, PINTURA 2, and Verniz 4. Each worksheet contains a grid of data. The first row of each grid typically has a header with product IDs (1, 3, 5, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 20, 21). The first column has headers for the same product IDs. The cells contain numerical values representing setup times. For example, in the COLA 6 worksheet, the value '2' appears in cells corresponding to transitions between products 1, 3, 12, 13, 16, and 20. Green checkmarks are present in many cells, likely indicating that the setup time is zero or a default value. At the bottom of the spreadsheet, there is a navigation bar with tabs for 'Menu do programa', 'Resultados', 'Diagrama Gant', 'Turnos', and 'Setup' (which is currently selected).

Figura 12 - Criação das matrizes com tempos de setup

Ainda relativamente à semana de trabalho analisada, foram também recolhidos os dados relativos aos turnos de trabalho, apresentados na Tabela 15. Na segunda coluna estão especificados os turnos em que os equipamentos estiveram a trabalhar, e na terceira coluna estão representadas as paragens correspondentes aos turnos em que não houve produção (estes tempos estão representados na unidade quarto de hora).

Tabela 15 - Turnos de trabalho semana 42

| Máquina | Turno de trabalho | Paragens |
|---------------------|-------------------|---|
| 6 Pintura 2 | 1,2 | {<64,96>,<160,192>,<256,288>,<352,384>,<448,480>} |
| 7 Pintura 3 | 1,2 | {<64,96>,<160,192>,<256,288>,<352,384>,<448,480>} |
| 8 Verniz AF2 | 1 | {<0,32>,<64,128>,<160,224>,<256,320>,<352,416>,<448,480>} |
| 9 Envernizamento 1 | 1 | {<0,32>,<64,128>,<160,224>,<256,320>,<352,416>,<448,480>} |
| 10 Envernizamento 4 | 1 2 | {<64,96>,<160,192>,<256,288>,<352,384>,<448,480>} |
| 13 Corte Final 1 | 1,3 | {<32,64>,<128,160>,<224,256>,<320,352>,<416,448>} |
| 17 Embalagem 1 | 1,3 | {<32,64>,<128,160>,<224,256>,<320,352>,<416,448>} |

Para auxiliar na criação dos intervalos de trabalho recorreu-se novamente ao Excel, onde é possível selecionar os turnos de trabalho de cada equipamento (Figura 13).

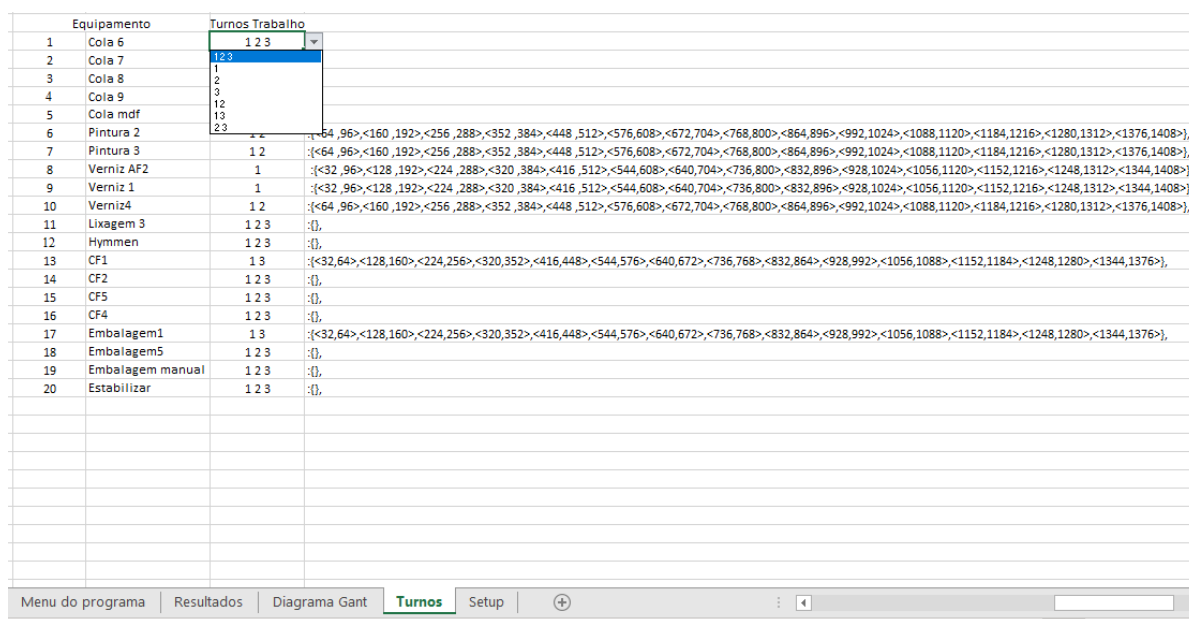


Figura 13 - Criação dos turnos de trabalho

Depois de recolhidos os dados da primeira semana de sequenciamento, procedeu-se à execução do algoritmo. Quando agrupados, os dados perfazem um total de 220 intervalos (11 produtos multiplicados por 20 equipamentos), e 19 seqüências de produtos a serem processados,

em cada um dos equipamentos, ainda que alguns produtos tenham tempo de processamento nulo em determinados equipamentos por não ser necessário serem processados nos mesmos. No caso da estabilização, pelo facto de existir a sobreposição de tarefas neste “equipamento”, não existe uma sequência de produtos. Estes dados, quando concretizados em restrições, perfazem um total de 648 restrições. Como descrito previamente, a pesquisa de soluções pelo algoritmo será limitada à duração máxima de um minuto, podendo terminar mais cedo caso um ótimo seja encontrado.

Para a semana em questão, o algoritmo encontrou a solução ótima em 12,59 segundos. Durante este tempo encontrou sete soluções admissíveis em aproximadamente seis segundos, (Figura 14), sendo o resto do tempo consumido na importação de dados e exportação de resultados.

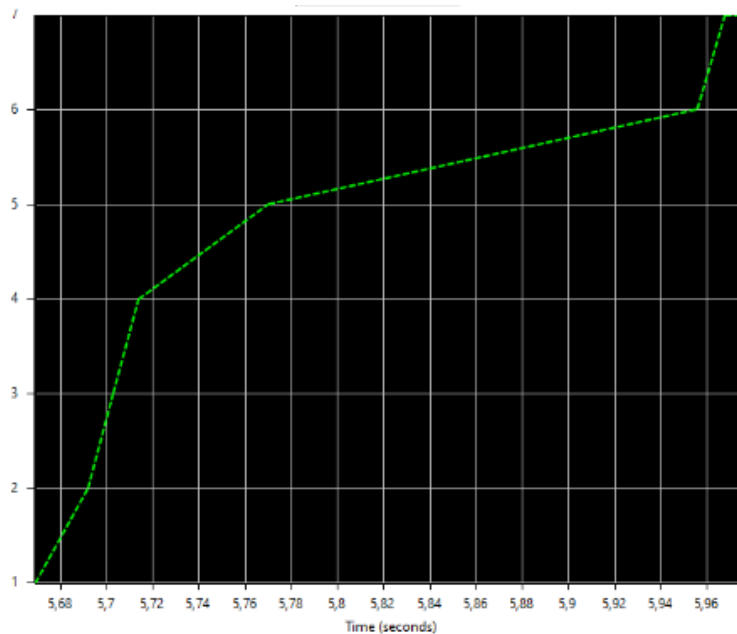


Figura 14 - Número de soluções encontradas para a semana 42

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16 e, com base nos dados obtidos, é ainda criado um diagrama de *Gantt* para facilitar a leitura das precedências, encontrando-se este no Anexo D. Os valores a sombreado na Tabela 16 representam produtos que terminam o seu processamento na semana de laboração seguinte.

Tabela 16 - Resultado do sequenciamento da semana 42

| Encomenda | Máquina | Início do processamento | Fim processamento |
|-----------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | Colagem 6 | 57 | 67 |
| 1 | Colagem 7 | 67 | 78 |
| 1 | Estabilização semiacabados | 78 | 158 |
| 1 | Corte Final 5 | 158 | 170 |
| 1 | Embalagem 5 | 170 | 201 |
| 3 | Colagem 6 | 69 | 92 |
| 3 | Colagem 7 | 92 | 117 |
| 3 | Estabilização semiacabados | 117 | 197 |
| 3 | Corte Final 5 | 197 | 225 |
| 3 | Embalagem 5 | 225 | 298 |
| 5 | Colagem 9 | 0 | 71 |
| 5 | Estabilização semiacabados | 71 | 151 |
| 5 | Corte Final 1 | 160 | 265 |
| 7 | Colagem 9 | 73 | 117 |
| 7 | Estabilização semiacabados | 117 | 197 |
| 7 | Corte Final 1 | 267 | 319 |
| 8 | Colagem 9 | 125 | 136 |
| 8 | Estabilização semiacabados | 136 | 216 |
| 8 | Corte Final 1 | 352 | 394 |
| 8 | Embalagem 1 | 394 | 452 |
| 12 | Colagem 6 | 94 | 108 |
| 12 | Lixagem 3 | 108 | 116 |
| 12 | Corte Final 2 | 128 | 154 |
| 12 | Pintura 3 | 326 | 416 |
| 12 | Envernizamento 4 | 428 | 525 |
| 12 | Embalagem 1 | 525 | 577 |
| 13 | Colagem 6 | 115 | 141 |
| 13 | Pintura 3 | 141 | 319 |
| 13 | Envernizamento 4 | 324 | 421 |
| 13 | Corte Final 5 | 421 | 502 |
| 13 | Embalagem 5 | 551 | 633 |
| 15 | Colagem 8 | 0 | 34 |
| 15 | Corte Final 5 | 34 | 49 |
| 15 | Pintura 3 | 49 | 135 |
| 15 | Envernizamento 4 | 288 | 319 |
| 15 | Embalagem 5 | 319 | 373 |
| 16 | Colagem 6 | 0 | 54 |
| 16 | Envernizamento 4 | 54 | 256 |
| 16 | Corte Final 5 | 256 | 323 |
| 16 | Embalagem 5 | 375 | 549 |
| 20 | Colagem 6 | 54 | 57 |
| 20 | Envernizamento 1 | 96 | 99 |
| 20 | Corte Final 2 | 99 | 104 |
| 20 | Embalagem 1 | 104 | 109 |
| 21 | Cola MDF | 0 | 1 |
| 21 | Verniz AF2 | 1 | 2 |
| 21 | Corte Final 4 | 2 | 3 |

O valor da função objetivo é de 633 quartos de hora, que corresponde ao segundo turno de terça feira da semana 43. O instante de início e fim de processamento de cada encomenda estão representados na Tabela 17.

Tabela 17 - Instantes de início e fim de processamento das encomendas da semana 42

| Encomenda | Início | Fim | Throughput time | Tempo em processamento | Tempo Ocioso |
|-----------|--------------|-----|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 57 | 201 | 144 | 144 | 0 |
| 3 | 69 | 298 | 229 | 229 | 0 |
| 5 | 0 | 265 | 265 | 256 | 9 |
| 7 | 73 | 319 | 246 | 176 | 70 |
| 8 | 125 | 452 | 327 | 191 | 136 |
| 12 | 94 | 577 | 483 | 287 | 196 |
| 13 | 115 | 633 | 518 | 464 | 54 |
| 15 | 0 | 373 | 373 | 220 | 153 |
| 16 | 0 | 549 | 549 | 497 | 52 |
| 20 | 54 | 109 | 55 | 16 | 39 |
| 21 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 |
| | Total | | 3192 | 2483(78%) | 709(22%) |

Segundo os resultados obtidos para o sequenciamento da semana 42, existem 5 tarefas que ficam por realizar e só terminam na semana 43. Este acontecimento seria expectável, dado que as primeiras operações dos produtos só começaram a ser realizadas no início da semana, enquanto que, numa situação real, algumas destas operações já teriam sido executadas na semana anterior. Assim sendo, ficam atrasadas as encomendas do grupo 12, nos equipamentos de verniz 4 e embalagem 1, as encomendas do grupo 13 nos equipamentos de corte final 5 e embalagem 5, e ainda as encomendas do grupo 16 no equipamento de embalagem 5. O tempo total das encomendas no sistema de produção foi de 3192 quartos de hora, dos quais 2483 quartos de hora, correspondentes a 78% do tempo, foram consumidos de forma útil em processamento de produtos, e 709 quartos de hora, correspondente a 22%, foram consumidos em atividades que não acrescentam valor, como mudanças de ferramentas e tempo de espera para utilizar os equipamentos.

3.5.2 - Sequenciamento da semana 43

Os instantes em que cada equipamento inicia o processamento do primeiro produto, e o instante em que termina o processamento do último produto da semana 42, estão apresentados na Tabela 18. O instante em que termina o processamento do último produto em cada equipamento, irá limitar o início do processamento da semana 43.

Tabela 18 - Ocupação dos equipamentos na semana 42

| Máquina | Início processamento | Fim do processamento |
|------------------|----------------------|----------------------|
| Cola 6 | 0 | 141 |
| Cola 7 | 67 | 117 |
| Cola 8 | 0 | 34 |
| Cola 9 | 0 | 136 |
| Cola MDF | 0 | 1 |
| Pintura 2 | 0 | 0 |
| Pintura 3 | 49 | 416 |
| Verniz AF2 | 1 | 2 |
| Verniz 1 | 96 | 99 |
| Verniz4 | 54 | 525 |
| Lixagem 3 | 108 | 116 |
| Hymmen | 0 | 0 |
| CF1 | 160 | 394 |
| CF2 | 99 | 154 |
| CF4 | 2 | 3 |
| CF5 | 34 | 502 |
| Embalagem1 | 104 | 577 |
| Embalagem5 | 170 | 633 |
| Embalagem manual | 0 | 0 |

Analogamente ao que foi feito para a semana de trabalho anterior, as referências foram agrupadas de acordo com as características apresentadas na Tabela 3. O código do algoritmo para processamento dos dados relativos a semana 43 é apresentado no Anexo E. Na semana 43 foram produzidos 12 grupos diferentes e um total de 45 referências que perfazem 56295,747 metros quadrados (Tabela 19), sendo que as referências produzidas encontram-se no Anexo F.

Tabela 19 - Resumo da produção na semana 43

| Grupo | Quantidades | Referências |
|--------------|------------------|-------------|
| 1 | 8161,314 | 3 |
| 3 | 8060,178 | 4 |
| 5 | 8201,047 | 3 |
| 7 | 7828,304 | 5 |
| 10 | 5677,238 | 4 |
| 12 | 1686,972 | 2 |
| 13 | 2448,936 | 3 |
| 15 | 3326,778 | 6 |
| 16 | 4874,394 | 4 |
| 17 | 1215,786 | 5 |
| 18 | 1618,18 | 3 |
| 22 | 3196,62 | 3 |
| Total | 56295,747 | 45 |

Durante o sequenciamento da semana 43 foi tido em conta a rotatividade dos turnos como demonstrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Turnos de trabalho da semana 43

| Máquina | Turnos trabalho semana 42 | Turnos trabalho semana 43 | |
|---------|---------------------------|---------------------------|-----|
| 6 | Pintura 2 | 1,2 | 2,3 |
| 7 | Pintura 3 | 1,2 | 2,3 |
| 8 | Verniz AF2 | 1 | 2 |
| 9 | Envernizamento 1 | 1 | 2 |
| 10 | Envernizamento 4 | 1,2 | 2,3 |
| 13 | Corte Final 1 | 1,3 | 2,3 |
| 17 | Embalagem 1 | 1,3 | 2,3 |

Ao executar o algoritmo com os dados relativos à semana 43, o número de intervalos aumentou para 240 pelo facto de existir mais um grupo para sequenciar. Devido a este aumento, e às restrições adicionais relativas aos instantes em que os equipamentos estão livres, o número de restrições aumenta de 648 na semana 42, para 946 na semana 43.

Atendendo aos factos supracitados é expectável que o tempo de resolução aumente. Nesta execução do algoritmo a paragem ocorre por imposição do tempo, não tendo conseguido encontrar a solução ótima para o sequenciamento. Para tentar contornar este acontecimento aumentou-se o tempo de processamento para o máximo de 4 horas, ainda assim o algoritmo apresentou a mesma solução final. Para intervalos de tempo muito superiores o sistema bloqueia por limitação da memória. O algoritmo encontrou seis soluções admissíveis em aproximadamente sete segundos, consumindo o restante tempo a tentar melhorar as soluções encontradas (Figura 15).

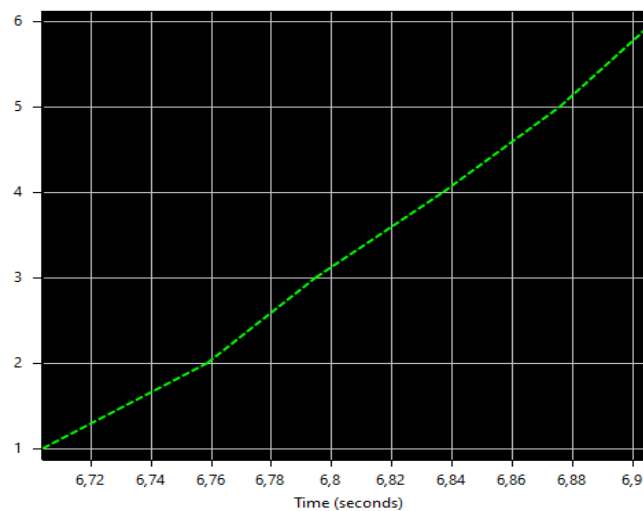


Figura 15 - Número de soluções encontradas para a semana 43

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 21. Os valores apresentados a sombreado indicam que a encomenda foi terminada na semana 44.

Tabela 21 - Resultado do sequenciamento da semana 43

| Encomenda | Máquina | Início do processamento | Fim processamento |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | Colagem 6 | 229 | 277 |
| 1 | Colagem 7 | 277 | 328 |
| 1 | Estabilização semi-acabados | 328 | 408 |
| 1 | Corte Final 5 | 562 | 621 |
| 1 | Embalagem 5 | 874 | 1026 |
| 3 | Colagem 6 | 153 | 200 |
| 3 | Colagem 7 | 200 | 251 |
| 3 | Estabilização semi-acabados | 251 | 331 |
| 3 | Corte Final 5 | 502 | 560 |
| 3 | Embalagem 5 | 633 | 783 |
| 5 | Colagem 9 | 136 | 196 |
| 5 | Estabilização semi-acabados | 196 | 276 |
| 5 | Corte Final 1 | 394 | 488 |
| 7 | Colagem 9 | 198 | 255 |
| 7 | Estabilização semi-acabados | 255 | 335 |
| 7 | Corte Final 1 | 490 | 590 |
| 10 | Colagem 6 | 279 | 312 |
| 10 | Lixagem 3 | 312 | 331 |
| 10 | Colagem 9 | 331 | 374 |
| 10 | Corte Final 2 | 374 | 427 |
| 10 | Embalagem 1 | 600 | 681 |
| 12 | Colagem 6 | 141 | 151 |
| 12 | Lixagem 3 | 151 | 157 |
| 12 | Corte Final 2 | 206 | 225 |
| 12 | Pintura 3 | 416 | 522 |
| 12 | Envernizamento 4 | 525 | 549 |
| 12 | Embalagem 1 | 577 | 592 |
| 13 | Colagem 6 | 314 | 329 |
| 13 | Pintura 3 | 529 | 625 |
| 13 | Envernizamento 4 | 657 | 726 |
| 13 | Corte Final 5 | 726 | 771 |
| 13 | Embalagem 5 | 1119 | 1165 |
| 15 | Colagem 8 | 34 | 71 |
| 15 | Corte Final 5 | 694 | 711 |
| 15 | Pintura 3 | 711 | 801 |
| 15 | Envernizamento 4 | 801 | 834 |
| 15 | Embalagem 5 | 1170 | 1229 |
| 16 | Colagem 6 | 200 | 229 |
| 16 | Envernizamento 4 | 551 | 655 |
| 16 | Corte Final 5 | 657 | 692 |
| 16 | Embalagem 5 | 783 | 874 |
| 17 | Cola mdf | 1 | 10 |
| 17 | Corte Final 2 | 154 | 174 |
| 17 | Envernizamento 1 | 192 | 211 |
| 17 | Embalagem 1 | 713 | 732 |
| 18 | Cola mdf | 11 | 19 |
| 18 | Corte Final 5 | 621 | 633 |
| 18 | Envernizamento 1 | 633 | 711 |
| 18 | Embalagem 5 | 1026 | 1057 |
| 22 | Colagem 9 | 259 | 307 |
| 22 | Corte Final 5 | 633 | 656 |
| 22 | Embalagem 5 | 1057 | 1117 |

O valor da função objetivo para esta situação é de 1229 quartos de hora, correspondente ao terceiro turno de quarta feira da semana 44. O instante de início e fim de processamento de cada encomenda são representados na Tabela 22.

Tabela 22 - Instantes de início e fim de processamento das encomendas da semana 43

| Encomenda | Início | Fim | Throughput time | Tempo em processamento | Tempo Ocioso |
|-----------|--------------|------|-----------------|------------------------|------------------|
| 1 | 229 | 1026 | 797 | 390 | 407 |
| 3 | 153 | 783 | 630 | 386 | 244 |
| 5 | 136 | 488 | 352 | 234 | 118 |
| 7 | 198 | 590 | 392 | 237 | 155 |
| 10 | 279 | 681 | 402 | 229 | 173 |
| 12 | 141 | 592 | 451 | 180 | 271 |
| 13 | 314 | 1165 | 851 | 271 | 580 |
| 15 | 34 | 1229 | 1195 | 236 | 959 |
| 16 | 200 | 874 | 674 | 259 | 415 |
| 17 | 1 | 732 | 731 | 67 | 664 |
| 18 | 11 | 1057 | 1046 | 129 | 917 |
| 22 | 259 | 1117 | 858 | 131 | 727 |
| | Total | | 8379 | 2749(33%) | 5630(67%) |

Para esta situação o tempo total no sistema é de 8379 quartos de hora. O tempo de processamento é de 2749 quartos de hora, correspondente a 33%, o que significa que o tempo ocioso é de 5630 quartos de hora, equivalente a 67%. Para esta semana é claramente notório que a qualidade da solução é inferior à da primeira semana, o que seria expectável pelo facto de não ter sido possível encontrar uma solução ótima. Pode-se dever este facto à adição de uma encomenda ao problema, passando de 11 encomendas para 12, podendo aqui ver-se claramente como o crescimento exponencial do problema se traduz num tempo de resolução superior, e também às restrições da utilização dos equipamentos já ocupados pelas encomendas da semana 42.

O instante em que é iniciado o processamento das primeiras encomendas da semana 43, em cada equipamento, e o instante de término do processamento do último produto em cada equipamento, estão apresentados na Tabela 23.

De acordo com os resultados obtidos, podemos concluir que seria possível sequenciar as tarefas nos diferentes equipamentos de modo a concluir a sua execução até ao final da semana 43, com exceção do equipamento de embalagem 5, para os grupos de produtos 1, 13, 15, 18 e 22.

Tabela 23 - Ocupação dos equipamentos na semana 43

| Máquina | Início processamento | Fim do processamento |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Cola 6 | 141 | 329 |
| Cola 7 | 200 | 328 |
| Cola 8 | 34 | 71 |
| Cola 9 | 136 | 374 |
| Cola MDF | 1 | 19 |
| Pintura 2 | 0 | 0 |
| Pintura 3 | 416 | 801 |
| Verniz AF2 | 0 | 0 |
| Verniz 1 | 192 | 711 |
| Verniz4 | 525 | 834 |
| Lixagem 3 | 151 | 331 |
| Hymmen | 0 | 0 |
| CF1 | 394 | 590 |
| CF2 | 154 | 427 |
| CF4 | 0 | 0 |
| CF5 | 502 | 771 |
| Embalagem1 | 577 | 732 |
| Embalagem5 | 633 | 1229 |
| Embalagem manual | 0 | 0 |

Concluído o sequenciamento das semanas 42 e 43, será realizada uma análise do tempo que ficou livre em cada um dos equipamentos, para processamento de encomendas de semanas anteriores e posteriores. No cálculo destes tempos foram subtraídos os tempos de não funcionamento dos equipamentos, devido aos turnos de trabalho. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 24.

Através da análise da Tabela 24 podemos concluir que, apenas o equipamento de embalagem 5 necessitaria de mais tempo para completar as tarefas das semanas 42 e 43. Este problema poderia ser solucionado antecipando as tarefas da semana 42 para a semana 41. Em ambiente real esta antecipação de tarefas é conseguida através da realização de algumas tarefas das encomendas da semana seguinte, na semana anterior, algo que nesta demonstração só foi considerado para a semana 43. Desta forma, caso se continuasse a realizar o sequenciamento de diferentes semanas, num certo ponto iríamos chegar ao equilíbrio entre a realização de tarefas das semanas anteriores e posteriores.

Tabela 24 - Tempo disponível nos equipamentos

| Máquina | Início processamento | Fim processamento | Tempo livre antes | Tempo livre depois | Taxa de ocupação |
|------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Cola 6 | 0 | 329 | 0 | 631 | 34,27% |
| Cola 7 | 67 | 328 | 67 | 632 | 27,19% |
| Cola 8 | 0 | 71 | 0 | 889 | 7,40% |
| Cola 9 | 0 | 374 | 0 | 586 | 38,96% |
| Cola MDF | 0 | 19 | 0 | 941 | 1,98% |
| Pintura 2 | 0 | 0 | 0 | 960 | 0,00% |
| Pintura 3 | 49 | 801 | 32,66 | 159 | 78,33% |
| Verniz AF2 | 0 | 2 | 0 | 958 | 0,21% |
| Verniz 1 | 96 | 711 | 32 | 249 | 64,06% |
| Verniz4 | 54 | 834 | 36 | 126 | 81,25% |
| Lixagem 3 | 108 | 331 | 108 | 629 | 23,23% |
| Hymmen | 0 | 0 | 0 | 960 | 0,00% |
| CF1 | 160 | 590 | 106,66 | 370 | 44,79% |
| CF2 | 99 | 427 | 99 | 533 | 34,17% |
| CF5 | 4 | 3 | 4 | 957 | 0,31% |
| CF4 | 34 | 771 | 34 | 189 | 76,77% |
| Embalagem1 | 104 | 732 | 69,33 | 228 | 65,42% |
| Embalagem5 | 170 | 1229 | 170 | -269 | 110,31% |
| Embalagem manual | 0 | 0 | 0 | 960 | 0,00% |

Os resultados obtidos seriam passíveis de aplicação na realidade, no entanto é difícil prever o impacto que as situações inesperadas poderiam ter na qualidade da solução final. A contabilização dos tempos médios de avarias nos equipamentos permite criar uma folga para este tipo de situações mas, pelo facto dos valores utilizados se tratarem de médias, podem ocorrer situações em que os tempos de avarias são muito superiores, o que ira impactar não só o sequenciamento da máquina em questão, mas de todos os equipamentos por se tratar de um *job-shop*. A situação inversa também poderá ocorrer, significa isto que pode não acontecer nenhuma situação inesperada, e a solução foi pessimista, o que levaria a um resultado do sequenciamento diferente.

4 - Conclusão e Trabalhos Futuros

O projeto descrito consistiu no desenvolvimento de um algoritmo de sequenciamento para a Amorim Revestimentos. O desenvolvimento do mesmo exigiu uma recolha intensiva de informação para posteriormente alimentar o algoritmo.

Na construção deste procurou-se integrar todas as variáveis que podem influenciar o ambiente produtivo diretamente, como é o caso dos turnos de trabalho, dos *setups* e das avarias.

As avarias e outras ocorrências inesperadas que acontecem na produção, podem representar um entrave à implementação deste sistema, dada a frequência destes acontecimentos no ambiente em questão.

Para manter o algoritmo atualizado com os acontecimentos no chão de fábrica, seria necessária uma pessoa a tempo inteiro que recolhesse o estado do processamento das tarefas, e equipamentos, para que, quando ocorresse uma situação inesperada, o algoritmo fosse corrido novamente, garantindo assim um sequenciamento de tarefas ótimo ou próximo do ótimo.

Apesar da situação ideal ser a supracitada, também pode ser utilizado o sequenciamento estipulado pelo algoritmo, e tentar minimizar a ocorrência de situações inesperadas, através da implementação de projetos de melhoria dos equipamentos, que reduzam as avarias dos mesmos, partindo do pressuposto que, quando estas situações inesperadas acontecem, a qualidade da solução obtida irá degradar-se.

O algoritmo desenvolvido é funcional e obtém soluções de boa qualidade. No entanto, podem ocorrer falhas pela falta de flexibilidade, pois qualquer alteração que seja pretendida pelo responsável do sequenciamento obriga a correr novamente o algoritmo, o que pode conduzir a alterações não desejadas no sequenciamento dos equipamentos. A resolução deste problema poderia ser conseguida através do desenvolvimento de um gráfico de *Gantt*, que permitisse a movimentação de tarefas e o ajuste automático, consoante o posicionamento escolhido pelo utilizador.

A implementação de um sistema de sequenciamento reativo com recurso a tecnologias de indústria 4.0 é também uma solução que resolveria os problemas acima citados. No entanto, o investimento num sistema deste tipo é considerável e, para além disto, o problema das avarias recorrentes não seria solucionado, devendo este ser um dos alvos de melhoria para o futuro.

Analisadas as diferentes hipóteses de implementação do modelo desenvolvido, a que melhor se enquadra na situação da empresa atual, é a aceitação da degradação da qualidade da solução do sequenciamento, sendo que, para esta situação, o algoritmo está apto para funcionar. Ao implementar esta situação, seria possível perceber as debilidades do algoritmo e perceber o nível de degradação que pode ocorrer. No caso de poder ocorrer uma degradação muito elevada, seria necessário dedicar um profissional à recolha de dados constante e reajuste do sequenciamento. Numa fase posterior, em que a empresa estivesse disponível financeiramente, para realizar o investimento num sistema de sequenciamento reativo, poderiam avançar para essa situação.

Relativamente a alternativas ao sistema desenvolvido, é de referir os módulos de *scheduling* dos ERP's, que recorrem habitualmente a regras de prioridade para chegar as soluções finais, tornando-se mais rápidos a chegar aos resultados. Apresentam plataformas de interação mais *user-friendly* e com maior flexibilidade nas soluções finais, apresentando diagramas de *Gantt* mais ilustrativos e dinâmicos que permitem ao utilizador arrastar tarefas consoante ache necessário. Devido a todas estas características estes sistemas são muito complexos, por esse motivo tornam-se muitas das vezes os módulos mais caros destes tipos de *softwares*, o que leva as empresas a não os adquirir.

A solução desenvolvida poderia servir de protótipo a um sistema mais avançado como um módulo de sequenciamento de um ERP, assim seria possível detetar as fragilidades do algoritmo e perceber as necessidades reais da empresa no que toca ao sequenciamento, e posteriormente seria mais fácil a integração do módulo mais complexo.

Caso a empresa pretenda adotar o algoritmo desenvolvido, uma proposta de trabalho para o futuro seria a melhoria da plataforma de demonstração de resultados. Nesta deveria ser melhorado o diagrama de *Gantt* para que se tornasse mais flexível e permitisse ao utilizador moldar a solução final. Para esta melhoria, a plataforma desenvolvida no Excel, deveria ser passada para uma linguagem de programação de nível mais alto, como por exemplo *Python*.

Para concluir, o objetivo principal do projeto que consistia no desenvolvimento do algoritmo de sequenciamento, foi concretizado. É de salientar também o contacto com uma indústria de tamanho grande, e com os problemas diários e a forma como são resolvidos para garantir que os produtos são entregues aos clientes com a qualidade necessária e cumprindo os prazos acordados.

Referências

- Al-Fawzan, M. A., & Haouari, M. (2005). A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Economics*, 96(2), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.04.002>
- Allahverdi, A., Gupta, J. N. D., & Aldowaisan, T. (1999). A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, 27(2), 219–239. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(98)00042-5)
- APCOR. (n.d.). Retrieved from <https://www.apcor.pt/media-center/estatisticas/>
- De Pablo, D. A. L. (2009). On scheduling models: An overview. *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*, (1972), 153–158. <https://doi.org/10.1109/iccie.2009.5223704>
- Dileepan, P. & Ahmadi, M. (2010). Scheduling rules for a small dynamic job shop: A simulation Approach. *Int j Simul Model*, 9, 173–183. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM09\(4\)1.165](https://doi.org/10.2507/IJSIMM09(4)1.165)
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2019). *Operations management : sustainability and supply chain management* (13th ed.). Pearson.
- Kim, S. C., & Bobrowski, P. M. (1994). Impact of sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance. *International Journal of Production Research*, 32(7), 1503–1520. <https://doi.org/10.1080/00207549408957019>
- Laborie, P. (2018). An update on the comparison of MIP, CP and hybrid approaches for mixed resource allocation and scheduling. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10848 LNCS, 403–411. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93031-2_29
- Laborie, P., Rogerie, J., Shaw, P., & Vilím, P. (2018). IBM ILOG CP optimizer for scheduling: 20+ years of scheduling with constraints at IBM/ILOG. *Constraints*, 23(2), 210–250. <https://doi.org/10.1007/s10601-018-9281-x>
- Liao, C. J., & Chen, W. J. (2003). Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs. *Computers and Operations Research*, 30(9), 1335–1347. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00074-6)
- Meidyani, B., Sarno, R., & Nurlaili, A. L. (2018). Time and cost optimization using scheduling job shop and linear goal programming model. *2018 International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2018, 2018-January*, 555–560. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350720>
- Oyetunji, E. O. (2009). Some common performance measures in scheduling problems: Review article. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 1(2), 6–9.
- Pinedo, M.L. (2008). *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78935-4>
- Raheja, A. S., & Subramaniam, V. (2002). Reactive recovery of job shop schedules - A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(10), 756–763. <https://doi.org/10.1007/s001700200087>
- Sharma, P., & Jain, A. (2016). A review on job shop scheduling with setup times. *Proceedings of*

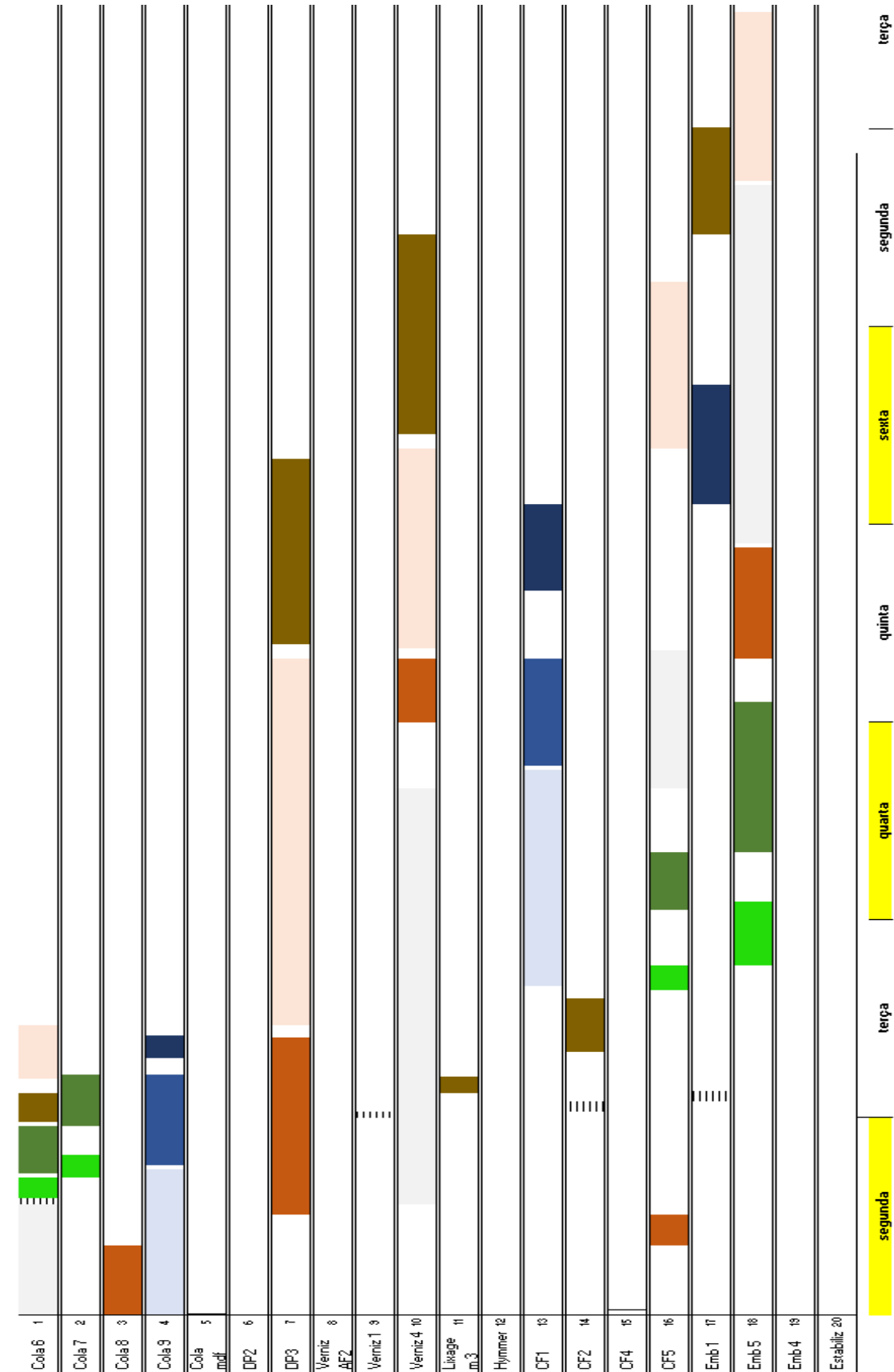
the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 230(3), 517–533. <https://doi.org/10.1177/0954405414560617>

- Stevenson, W. J. (2014). *Operations management* (12th ed.). McGraw-Hill Education.
- Swamidass, P. M. (2000). *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*.
- Tian, X. K., & Wang, J. (2012). The Simulation Optimization for Job-Shop Scheduling Based on Plant Simulation Using Genetic Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 217–219, 1444–1448. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.1444>
- Vilím, P., Laborie, P., & Shaw, P. (2015). Failure-directed search for constraint-based scheduling. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9075, 437–453. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18008-3_30
- Wang, G. C., Tian, X. J., Li, C. P., & Yang, N. N. (2012). Genetic Algorithm Design and Simulation for Job-Shop Scheduling Problem. *Applied Mechanics and Materials*, 157–158, 1436–1440. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.157-158.1436>
- Wen, P., & Cao, W. (2017). Real-time job-shop scheduling model based on RFID. *2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications, ICCIA 2017, 2017-Janua*, 204–208. <https://doi.org/10.1109/CIAPP.2017.8167208>
- Xia, Y., Chen, B., & Yue, J. (2008). Job sequencing and due date assignment in a single machine shop with uncertain processing times. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.058>
- Xiong, J., Xing, L. N., & Chen, Y. W. (2013). Robust scheduling for multi-objective flexible job-shop problems with random machine breakdowns. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.04.015>
- Yang, J., & Deane, R. H. (1993). Setup time reduction and competitive advantage in a closed manufacturing cell. *European Journal of Operational Research*, 69(3), 413–423. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90025-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90025-I)
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., & Fu, J. (2019). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 1809–1830. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1350-2>

Anexo C- Artigos produzidos na semana 42

| ARTIGO | GRUPO | QUANTIDADE |
|----------|-------|------------|
| B0R4001 | 1 | 1647,072 |
| B0VC001 | 3 | 500,262 |
| L5S3001 | 3 | 1154,034 |
| LJS3005 | 3 | 666,414 |
| B0VB001 | 3 | 1331,022 |
| Z306001 | 3 | 247,422 |
| 9S17A014 | 5 | 3188,406 |
| B5Q0001 | 5 | 2358,525 |
| B5P3001 | 5 | 1023,360 |
| B5P4001 | 5 | 207,870 |
| B5R0001 | 5 | 502,086 |
| B5P0001 | 5 | 542,061 |
| B5T0001 | 5 | 522,873 |
| B5T7001 | 5 | 271,830 |
| Z318001 | 5 | 1077,726 |
| B5WT001 | 7 | 1479,720 |
| B5P3002 | 7 | 1123,584 |
| Z318002 | 7 | 3445,992 |
| B5XV001 | 8 | 89,815 |
| B5V5001 | 8 | 960,204 |
| B5XW001 | 8 | 94,714 |
| ADF4001 | 12 | 1174,922 |
| ADF8001 | 12 | 1167,474 |
| D885001 | 13 | 1405,068 |
| D887001 | 13 | 872,298 |
| D886001 | 13 | 525,546 |
| D884002 | 13 | 527,352 |
| BAD7001 | 13 | 518,322 |
| BAI2001 | 13 | 529,158 |
| D8F7001 | 15 | 562,587 |
| D8F4001 | 15 | 290,433 |
| BAH2001 | 15 | 404,169 |
| BAG7001 | 15 | 698,664 |
| D885003 | 15 | 410,262 |
| D886003 | 15 | 416,355 |
| BAG5001 | 15 | 278,247 |
| E1N9002 | 16 | 1950,480 |
| E1XK001 | 16 | 1735,566 |
| KVXE001 | 16 | 500,262 |
| BGN9001 | 16 | 390,096 |
| BGQ0001 | 16 | 892,164 |
| E1XH001 | 16 | 780,192 |
| E1W0001 | 16 | 357,588 |
| E1N9001 | 16 | 379,260 |
| BGQ0003 | 16 | 464,142 |
| E1L7001 | 16 | 126,420 |
| Z320001 | 16 | 1777,104 |
| C14N001 | 20 | 336,036 |
| Z308002 | 20 | 68,300 |
| C14A001 | 21 | 112,012 |

Anexo D- Diagrama de Gantt semana 42



Anexo E- Código semana 43

```
using CP;

int nbMaq = ...;
range Maq = 1..nbMaq;
int nbEncomendas = ...;
range Encomendas = 1..nbEncomendas;
int livre [m in Maq]=...;
int operacao[j in Encomendas] = ...;
int Maquinas[j in Encomendas][m in Maq] = ...;
int Duracao[j in Encomendas][m in Maq] = ...;
int Setup[Maq][Encomendas][Encomendas]=...;
int mm[j in Encomendas][m in Maq]=...;
tuple Break {
int s;
int e;
};
{Break} Breaks[Maq] = ...;
tuple Step {int v; key int x;};
sorted {Step} Steps[w in Maq] = { <100, b.s> | b in Breaks[w] } union { <0, b.e> | b in Breaks[w] };
stepFunction Calendar[x in Maq] = stepwise (s in Steps[x]) { s.v -> s.x; 100 };
dvar interval itvs[j in Encomendas][o in Maq] size Duracao[j][o] intensity Calendar [Maquinas[j][o]];
dvar sequence mchs[m in Maq] in all(j in Encomendas, o in Maq : Maquinas[j][o] == m && Duracao[j][o]!=0
) itvs[j][o]
types all(j in Encomendas, o in Maq : Maquinas[j][o] == m && Duracao[j][o]!=0 ) j ;
tuple triplet { int t1; int t2; int v; }
{triplet} tt[m in Maq] = { <t1,t2,Setup[m][t1][t2]> | t1,t2 in Encomendas, m in Maq };
execute {
cp.param.timelimit= 60;}
minimize (max(j in Encomendas) endOf(itvs[j][operacao[j]+1]));
subject to {
forall (m in Maq: m!=20){
noOverlap(mchs[m],tt[m],1);
}
forall (j in Encomendas, o in 1..nbMaq-1){
endBeforeStart(itvs[j][o], itvs[j][o+1]);
forbidStart(itvs[j][o], Calendar[Maquinas[j][o]]);
forbidEnd (itvs[j][o], Calendar[Maquinas[j][o]]);
}
forall (j in Encomendas, o in Maq){
startOf(itvs[j][mm[j][o]])>=livre[o];
}
}
tuple resType { int trabalho; int maquina; int st; int end; }
{resType} res={ <j,o,startOf(itvs[j][o]), endOf(itvs[j][o]) > | j in Encomendas, o in Maq};

SheetConnection my_sheet("sequenciamento 43.xlsm");
nbEncomendas = 12;
nbMaq = 20;
Maquinas from SheetRead (my_sheet,"Ordem" ) ;
Duracao from SheetRead (my_sheet,"Tempo");
mm from SheetRead (my_sheet,"indice");
operacao from SheetRead (my_sheet,"operacao");
livre= [141,117,34,136,1,0,416,2,99,525,116,0,394,154,3,502,577,633,0,0];

Setup=
//Cola 6 //Cola 7 //Cola 8 //Cola 9
[[[0,0,0,0,2,2,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,2,2,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,1,4,0,0,0,0,0,0,4],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,1,0,4,0,0,0,0,0,0,4],
[2,2,0,0,0,0,2,0,2,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,4,4,0,0,0,0,0,0,0,0],
[2,2,0,0,0,0,2,0,2,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,2,2,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,2,2,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], [0,0,0,4,4,0,0,0,0,0,0,0]]]
```



```
19: {},  
20: {}, ]#;  
res to SheetWrite(my_sheet, "export");
```

Anexo F- Referências produzidas na semana 43

| ARTIGO | GRUPO | QUANTIDADE |
|---------|-------|------------|
| B5T5001 | 5 | 1357,551 |
| B5P1002 | 5 | 3604,832 |
| B5P3002 | 5 | 3238,664 |
| B5Q0002 | 7 | 4307,072 |
| B5WS001 | 7 | 1063,392 |
| JSQ0004 | 7 | 822,624 |
| JSX0002 | 7 | 259,16 |
| KLQ0002 | 7 | 1376,056 |
| ADF5001 | 12 | 495,292 |
| ADG2001 | 12 | 1191,68 |
| AEUA001 | 10 | 3420,494 |
| AEUC001 | 10 | 1122,786 |
| AEUM001 | 10 | 446,88 |
| AEYG001 | 10 | 687,078 |
| BOR4001 | 1 | 554,442 |
| BOT7001 | 1 | 5381,88 |
| BOWR001 | 1 | 2224,992 |
| L5W6001 | 3 | 670,026 |
| LJVC002 | 3 | 805,476 |
| LJVM001 | 3 | 1327,41 |
| LJVZ001 | 3 | 5257,266 |
| BA64002 | 13 | 671,832 |
| D886001 | 13 | 989,688 |
| KA66001 | 13 | 787,416 |
| BA62002 | 15 | 280,278 |
| D8F2001 | 15 | 359,487 |
| D8F4001 | 15 | 548,37 |
| D8F6001 | 15 | 1056,12 |
| D8F8001 | 15 | 684,447 |
| D8G1001 | 15 | 398,076 |
| E1N9001 | 16 | 243,81 |
| E1R1001 | 16 | 828,954 |
| E1XE001 | 16 | 3512,67 |
| E1XK001 | 16 | 288,96 |
| KSYA001 | 22 | 1069,152 |
| KSYB001 | 22 | 1121,526 |
| KSYM001 | 22 | 1005,942 |
| C81X001 | 18 | 751,3 |
| C84A004 | 18 | 431,634 |
| C81X004 | 18 | 435,246 |
| BJ21079 | 17 | 265,668 |
| BLD8001 | 17 | 214,968 |
| BL78008 | 17 | 310,284 |
| BL19010 | 17 | 209,898 |
| BJ49028 | 17 | 214,968 |

