

MESTRADO EM
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
RELATÓRIO DE PROJETO

OTIMIZAÇÃO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO

DIANA MARIA FRANCO SALVADOR

ORIENTAÇÃO:

PROF^a DOUTORA LEONOR ALMEIDA LEITE SANTIAGO PINTO (ISEG)
ENGENHEIRA LEONOR ALVES GODINHO CRISTÓVÃO
(NESTLÉ PORTUGAL, UNIPESSOAL, LDA)

OUTUBRO - 2023

RESUMO

Este estudo aborda a otimização da linha de produção, *healthy snacks*, da *Nestlé*. O objetivo do trabalho é estabelecer um plano anual de produção destes *snacks*, dadas as quantidades procuradas, os seus tempos de produção e a capacidade da linha. No plano anual devem ainda ser considerados outros aspetos como as operações necessárias para mudanças de fabrico de produto, os períodos de limpeza diários e o lote mínimo de fabrico dos produtos.

A metodologia está dividida em duas fases. Na primeira fase, a procura anual é dividida em ciclos, enquanto a segunda fase se concentra no planeamento detalhado de cada ciclo de produção. Quanto à duração dos ciclos opta-se por três semanas, por ser a cadência praticada pela empresa. O estabelecimento da procura anual é adaptado a partir de uma previsão para um ano e meio fornecida pela *Nestlé*. Para a repartição da procura anual em ciclos desenha-se um algoritmo. Conhecido o conjunto de produtos e respetivas quantidades a fabricar num ciclo, procede-se ao escalonamento em cada ciclo, na segunda fase. Para o escalonamento detalhado num ciclo, desenvolve-se um modelo de programação linear inteira. A comparação com dois planos de produção usados pela *Nestlé* revelam que esta metodologia permite definir melhores escalonamentos.

Palavras-chave: escalonamento da produção, planeamento de produção, programação linear inteira

ABSTRACT

This work deals with the optimization of *Nestlé's* healthy snacks production line. The aim of this work is to establish an annual production plan for these snacks, given the quantities demanded, their production times and the line's capacity. The plan should also take into account other aspects such as the operations required for product manufacturing changes, daily cleaning periods and the minimum batch for manufacturing the products.

The methodology is divided into two phases. In the first phase, annual demand is divided into cycles, while the second phase focuses on the detailed planning of each production cycle. The duration of the cycles is set at three weeks, as this is *Nestlé's* practice. The establishment of annual demand is adapted from a forecast for a year and a half provided by *Nestlé*. An algorithm was designed to split annual demand into cycles. Once the set of products and their respective quantities to be manufactured in a cycle are known, the scheduling for each cycle is carried out, in the second phase. For the detailed scheduling in a cycle, an integer linear programming model is applied. A comparison with two production plans used by *Nestlé* shows that this tool allows better scheduling to be defined.

Keywords: production scheduling, production planning, integer linear programming

AGRADECIMENTOS

Quero começar por agradecer à minha orientadora, professora Leonor, foi um apoio enorme neste processo e sem a qual isto não seria possível. Obrigada por toda a ajuda, paciência e imensa dedicação neste projeto. Foi muito importante para mim ter do meu lado a professora ao longo destes meses de trabalho, acreditou em mim e neste projeto, foi sempre muito positiva e puxou-me sempre para cima. Sem a professora isto não seria possível. Obrigada pela disponibilidade, pelas reuniões fora de horas, e por me conseguir acalmar em todas as situações em que estava mais nervosa. Foi uma honra para mim ter trabalhado com a professora, e só tenho a agradecer por me ter passado tanto do seu conhecimento, aprendi muito, obrigada por isso. Fico eternamente grata por me ter ajudado a concluir esta etapa da minha vida. Obrigada.

Quero agradecer também, da parte da *Nestlé*, à Leonor Cristóvão, pela oportunidade de poder desenvolver este projeto. Por toda a ajuda, disponibilidade, reuniões e “muitas” perguntas respondidas. Obrigada por acreditares em mim, por me tentares sempre motivar, e pelo apoio e flexibilidade que existiu sempre. Fico muito agradecida. Agradecer também à Leonor Filipe, por todas as informações sobre o projeto e pela disponibilidade em ajudar sempre que precisei. Uma palavra de agradecimento também à Ana Fróis, pela imediata vontade de me ajudar a escolher um tema com o qual me identificasse. Muito grata por isso. Obrigada.

Não posso também deixar de agradecer à minha família e aos meus amigos, por estarem sempre lá, por me ouvirem a falar sobre este projeto vezes sem conta, e por festejarem comigo as mais pequenas conquistas ao longo do desenvolvimento deste projeto. Pai, Mãe, Manos, obrigada por acreditarem sempre em mim, e por me motivarem e incentivarem a nunca desistir, por me darem força e apoio em todos os processos, e por se orgulharem das minhas conquistas. Filipe, obrigada por estares do meu lado, pela paciência, e por me apoiares em tudo.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Índice	iv
Lista de Tabelas	v
Lista de Figuras	v
1. Introdução	1
2. Referências da literatura relacionadas	3
2.1. Problema do Caixeiro-Viajante	3
2.2. Escalonamento de produção	6
3.1. Breve apresentação da empresa.....	8
4. Metodologia.....	12
4.1. Fase 1: Divisão da produção anual em ciclos.....	12
4.2. Fase 2: Planeamento de um ciclo de produção.....	17
5. Resultados.....	21
5.1. Resultados da Fase 1.....	22
5.2. Resultados da Fase 2.....	24
5.3. Avaliação da proposta desenvolvida	28
5.4. Comparação com uma situação atual	30
6. Conclusão e Trabalhos Futuros	32
7. Referências	33
Anexos	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de Produtos	9
Tabela 2: Dados do Exemplo.....	14
Tabela 3: Exemplo Iteração 1	15
Tabela 4: Exemplo Iteração 2.....	15
Tabela 5: Dados de produção	21
Tabela 6: Produção por ciclo	22
Tabela 7: Produtos e afetação das opções	23
Tabela 8: Proposta de escalonamento.....	27
Tabela 9: Tempo útil utilizado e restante	28
Tabela 10: Comparação com cenário 1 da Empresa.....	30
Tabela 11: Comparação com cenário 2 da Empresa.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição das opções ao longo do ano.....	24
Figura 2: Escalonamento da Opção 1 do ciclo	26
Figura 3: Distribuição das opções ao longo do ano e tempo de inatividade	29

1. INTRODUÇÃO

Este projeto tem como objetivo a otimização da linha de produção de *healthy snacks* da empresa *Nestlé Portugal*. Este documento constitui o Trabalho Final de Mestrado, para a obtenção do grau de mestre em Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial.

O crescimento, desenvolvimento e alargamento das empresas é fundamental na saúde competitiva destas no mercado. Otimizar e aprimorar os processos simples que fazem parte do quotidiano das empresas torna-se necessário ao crescimento e desenvolvimento, tanto a nível de volume de negócio como a nível de portefólio de qualquer empresa. Em empresas com processos de produção, a correta organização dos produtos ao longo de uma linha de produção é fundamental no sucesso desta. Assim, torna-se constante a busca pelo melhoramento dos processos de produção para a redução de tempos e custos de fabricação.

No âmbito do projeto com a *Nestlé Portugal*, foi possível identificar uma linha de produção recente que não estava a ser rentabilizada da melhor forma. A identificação de alguns sinais de falta de otimização na linha, como o tempo gasto na mudança de produções, motivou o desenvolvimento deste projeto.

No trabalho realizado foram aplicados conhecimentos adquiridos ao longo do Mestrado em Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial, para a promoção da eficiência e otimização na gestão dos processos produtivos. Ao desenvolver um modelo em programação Linear inteira mista, este projeto procura melhorar as atuais práticas de produção na empresa, oferecendo ganhos substanciais em eficiência e desempenho na linha de produção dos *healthy snacks*.

A estrutura do trabalho será detalhada de seguida.

Primeiramente, faz-se um enquadramento dos conceitos usados no trabalho, através de referências da literatura. Inclui-se, uma explicação mais detalhada dos conceitos que serão abordados, e problemas que serão utilizados neste projeto. Em seguida, enquadra-se e descreve-se o problema. Adicionalmente, apresenta-se uma contextualização da *Nestlé* Portugal e da questão a ser tratada. Aqui é percorrida a informação relativa à divisão das procuras anuais dos produtos, o processo produtivo associado a esta categoria, e as informações que devem ser tidas em conta.

Seguidamente, no capítulo da metodologia, apresentam-se as duas fases em que está dividida. A Fase 1, que consiste na repartição da produção anual em ciclos, e a Fase 2 que apresenta o modelo para efetuar o planeamento da produção num ciclo. Com a metodologia proposta foi possível sugerir um plano de produção anual para a linha de *healthy snacks*. Ainda neste capítulo, é feita a comparação entre dois cenários partilhados pela empresa e as respetivas soluções propostas pelo modelo a estes cenários. Por fim, relatar-se-ão as conclusões obtidas, a identificação das dificuldades observadas e possíveis aplicações futuras.

2. REFERÊNCIAS DA LITERATURA RELACIONADAS

Neste capítulo serão referenciadas fontes relacionadas com o problema que será estudado ao longo deste TFM. O problema do caixeiro-viajante aplica-se ao desafio de determinar a ordem mais eficiente de um conjunto de produtos. O escalonamento da produção é um tema central neste projeto.

2.1. PROBLEMA DO CAIXEIRO-VIAJANTE

O problema do caixeiro-viajante (*Traveling Salesman Problem – TSP*) consiste na determinação do percurso de comprimento mínimo que um caixeiro-viajante deve usar para visitar um conjunto de cidades, passando por cada uma delas uma e uma só vez e voltando à cidade de partida (Gutin & Punnen, 2007).

Um marco no estudo deste problema é o artigo de (Dantzig, Fulkerson, & Johnson, 1954) com um método de resolução e ilustração do problema, conseguindo resolver uma instância com 49 cidades, uma dimensão impressionante à época.

Usando uma terminologia mais adequada, o *TSP* pode ser definido como a determinação de um ciclo Hamiltoniano num grafo, G em que a soma dos custos das arestas é a menor possível. O grafo, G , tem n vértices, a representar as cidades, e um conjunto de arestas a representar as ligações diretas entre pares de cidades. Associa-se também uma matriz de custos que podem representar (distâncias, tempos), C , de elemento genérico c_{ij} que corresponde ao custo da aresta (i, j) do grafo G , (Gutin & Punnen, 2007).

Quando a matriz C , é simétrica, o grafo é não orientado, e estamos perante um problema do caixeiro-viajante simétrico. Caso contrário, a matriz de custos é assimétrica, o grafo é orientado e estamos perante um problema de caixeiro-viajante assimétrico. Neste caso temos em G um conjunto de arcos, em vez de arestas, e procura-se um circuito Hamiltoniano em G , de custo total mínimo, (Gutin & Punnen, 2007).

Na literatura encontram-se múltiplas variantes do problema do caixeiro-viajante, e, na maioria dos casos, a motivação para o seu estudo decorre de aplicações.

No *TSP with multiple visits - TSPM*, o objetivo é encontrar uma sequência de vértices a visitar de custo mínimo. Na sequência, o primeiro e o último vértice coincidem e cada vértice deve ocorrer pelo menos uma vez, isto é, todo o vértice tem de constar na

sequência, mas o número de vezes que consta não é limitado. O *TSPM* pode ser transformado num problema de caixeiro-viajante, substituindo o custo da aresta $\{i, j\}$ pelo custo do caminho de menor custo em G entre i e j . Na ausência de ciclos negativos, o comprimento do caminho mínimo entre qualquer par de nodos do grafo, pode ser calculado utilizando algoritmos eficientes. Se o grafo G contiver um ciclo negativo, então o *TSPM* é ilimitado, (Gutin & Punnen, 2007).

O *TSPM* tem aplicação por exemplo, no escalonamento de tarefas de vários tipos diferentes que devem ser executadas apenas por uma máquina, (Bérczi, Mních, & Vincze, 2022).

Assumindo que realizar uma tarefa do tipo j tem um custo $p(j)$, e que mudar de uma tarefa do tipo i para uma do tipo j custa $c(ij)$, o objetivo é encontrar uma sequência de trabalhos com um custo total mínimo. Resolver este problema como um *TSP* com múltiplas visitas, faz-se definindo os tipos de trabalho como sendo as cidades, que serão repetidas o número de vezes que forem visitadas, com distância zero na passagem entre uma cidade e as suas réplicas, (Bérczi, Mních, & Vincze, 2022).

A variante do *TSP* que acaba de se descrever tem semelhanças evidentes com o problema tratado neste trabalho.

Outra variante do *TSP* é o *Messenger Problem*, ou também conhecido como o problema do vendedor ambulante. Neste são dados dois nodos especificados (u e v), no grafo G , em que o objetivo é encontrar um caminho Hamiltoniano de custo mínimo em G de u a v . Este caso pode ser resolvido como um problema de caixeiro-viajante afetando um valor muito grande ao custo da aresta (v, u) , e passando por todas as outras cidades, (Gutin & Punnen, 2007).

O *Messenger Problem* é frequentemente utilizado na resolução de situações de gestão logística, já que as empresas costumam utilizar vários intermediários para transportar encomendas, (Fábry & Kobzareva, 2012). O objetivo, tal como no problema do mensageiro é determinar o percurso de comprimento mínimo passando por todos os pontos, para, por exemplo, deixar uma encomenda. Para aplicar esta variante, devem fixar-se os nodos u e v , vértices terminais do caminho Hamiltoniano.

No problema do *Clustered TSP - CTSP*, o conjunto de nodos do grafo G é particionado em *clusters* V_1, V_2, \dots, V_K . O objetivo é encontrar a rota de menor custo no grafo G , obrigando a que as cidades dentro do mesmo *cluster* sejam visitadas consecutivamente. Este problema pode ser transformado num *TSP*, adicionando um valor muito grande ao custo de cada aresta entre nodos de *clusters* distintos, (Gutin & Punnen, 2007).

Uma aplicação do *CTSP* surge no âmbito da triagem de amostras citológicas. A citologia envolve a visualização de material apresentado em lâminas de vidro usando microscópios, que posteriormente são digitalizadas em pixéis. O problema consiste em, primeiro determinar um conjunto de blocos constituído por todos os pixéis, a examinar apenas numa visualização. Em seguida, calcular uma sequência de visualizações através de todos os blocos. Como a amostra citológica contém frequentemente manchas, isto é, aglomerados de blocos contíguos, a preferência é por uma leitura consecutiva, dando origem a um *CTSP*, (Laporte & Palekar, 2002).

O *Generalized TSP - GTSP*, é um caso particular do *CSTP*. Neste problema, o objetivo é encontrar o ciclo de menor custo em G que passe por exatamente um nodo de cada *cluster*. Se todos os grupos tiverem apenas um vértice será o *TSP*, (Gutin & Punnen, 2007).

Algumas aplicações do *GTSP*, relacionam-se com a recolha de encomendas em armazéns onde o mesmo produto está localizado em vários locais, (Bérczi, Mnich, & Vincze, 2022). Garante-se que, pelo menos, um local de armazenamento de cada produto é visitado, de forma a satisfazer a encomenda.

O *m-salesmen TSP (MTSP)*, assume que m viajantes começam e terminam o seu percurso no nodo 1, e garante-se que cada nodo do grafo G é visitado por um e um só viajante. (Gutin & Punnen, 2007). O *MTSP* é muitas vezes usado no cálculo das melhores rotas em problemas de transportes, e também em problemas de agendamento de tarefas, armazenamento de produtos e posicionamento de objetos, (Oliveira, 2015).

Neste projeto, a questão de determinar a ordem mais eficiente pode ser modelada como um problema do caixeiro-viajante. Cada produto a produzir é associado a um nodo, e o tempo de mudança entre duas produções é o custo do arco de ligação entre os respetivos produtos. Neste caso, estamos perante um *TSP* assimétrico uma vez que os tempos de mudança diferem consoante a ordem do par de produtos.

2.2. ESCALONAMENTO DE PRODUÇÃO

Escalonamento não será um termo muito familiar, no entanto, o cumprimento de um horário faz parte do cotidiano de qualquer pessoa. Na verdade, um horário, usado diariamente, não é nada mais nada menos que um escalonamento. Trata-se simplesmente de ordenar da melhor forma possível todas as tarefas diárias tendo em linha de conta a informação que se dispõe, nomeadamente: a duração das tarefas, a janela temporal em que podem ser desempenhadas e as disponibilidades, (Kenneth & Trietsch, 1974).

Para muitas pessoas, dentro e fora do trabalho, torna-se bastante útil, pois traduz-se em dias mais organizados e eficientes. Assim, pode dizer-se que o escalonamento assenta na resolução de duas questões fundamentais: sequenciar e planear, (Kenneth & Trietsch, 1974).

Deste modo, escalonar é meramente ordenar e gerir determinadas tarefas da melhor forma. Esta questão é também transversal à indústria, pois é necessário perceber os tempos de duração das tarefas a executar e, ao mesmo tempo, a capacidade que existe, como analogia ao intervalo de tempo que existe no horário dos cidadãos, (Kenneth & Trietsch, 1974).

O escalonamento de produção é uma das principais atividades de qualquer empresa a nível operacional, (Fuchigami & Rangel, 2017).

Esta atividade foca-se na otimização de diversas medidas de desempenho, que se relacionam com a criação de um melhor desenvolvimento do sistema organizacional, levando à satisfação do cliente. Algumas dessas medidas referem-se ao uso eficiente de recursos, à entrega de produtos no prazo determinado, à redução dos custos de produção, entre outras, (Fuchigami & Rangel, 2017).

Assim, o escalonamento é um tema de bastante relevância, não só para a fabricação, mas também para a parte organizacional, onde se inserem, muitas vezes, as equipas de operações. O escalonamento da produção está em constante debate por parte destes profissionais, pois é essencial para incrementar o desempenho de qualquer organização, (Fuchigami & Rangel, 2017).

A programação linear inteira (PLI) é muitas vezes aplicada a problemas de escalonamento, sendo em muitos casos a abordagem escolhida, inicialmente, para este tipo de estudos, (Ku & Beck, 2016).

Em (Ku & Beck, 2016) podem encontrar-se três formulações em PLI usadas em problemas de escalonamento: a formulação indexada ao tempo, a formulação baseada em classificação e a formulação disjuntiva.

A formulação indexada ao tempo é utilizada em problemas de escalonamento onde as variáveis representam a alocação de tarefas em diferentes máquinas ao longo do tempo. Tem a desvantagem de, geralmente, ter um número muito elevado de variáveis e restrições, (Gomes, 2008). Já na formulação baseada em classificação, as variáveis representam a ordem das tarefas em relação às máquinas. Isto é, as variáveis representam a sequência de processamento de tarefas. Por fim, a formulação disjuntiva, envolve a criação de variáveis binárias, com o intuito de garantir que as tarefas sejam programadas, para que estas não sejam sobrepostas nas máquinas, (Pinedo, 2012).

Wen-Yang Ku e J. Christopher Beck, (Ku & Beck, 2016), realizaram um estudo computacional dos modelos de programação linear inteira. Os resultados com os *softwares CPLEX e GUROBI*, mostraram que o modelo indexado ao tempo pode ter um resultado melhor que o modelo baseado em classificação para problemas pequenos, no entanto, não consegue acompanhar no caso de problemas maiores. Nos dois *softwares* o modelo disjuntivo supera os modelos baseados em classificação e indexados ao tempo, (Ku & Beck, 2016).

Wen-Yang Ku e J. Christopher Beck, (Ku & Beck, 2016), avaliaram a utilização do *multithreading* que permite que a pesquisa seja executada em paralelo, e, portanto, pode melhorar significativamente o desempenho. Além disso, foram também ativados os parâmetros.

Os resultados mostram que a execução de oito processos em paralelo melhora o desempenho do *software*. Com o *multithreading* ativado e a ferramenta de ajuste de parâmetros, o *CPLEX* pode melhorar o desempenho na procura da solução ótima, sendo também mais rápido que a procura padrão de processo único. Para problemas em que não é possível encontrar a solução ótima no espaço de uma hora, a qualidade da solução ao longo do tempo é melhorada em cerca de 30%, (Ku & Beck, 2016).

3. ENQUADRAMENTO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1. BREVE APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

Este projeto foi realizado em conjunto com a *Nestlé Portugal* e teve início em fevereiro de 2023.

A *Nestlé* está em Portugal desde 1923, fazendo parte da vida dos portugueses há um século. Tem mais de 90 marcas, e o seu propósito é “desenvolver o poder da alimentação para melhorar a qualidade de vida de todos, hoje e para as gerações futuras” (Conheça a Nestlé, 2023).

A *Nestlé Portugal* insere-se no setor da alimentação, incluindo várias áreas de negócio, fazendo parte do Grupo Suíço *Nestlé*, o maior produtor mundial de alimentos e bebidas (Conheça a Nestlé, 2023).

Os cereais e o café são as principais matérias-primas dos artigos produzidos em Portugal. No nosso país existem nove estruturas da *Nestlé*, entre o *campus*, as fábricas, os centros de distribuição e as delegações.

Na fábrica de Avanca, em Aveiro, são produzidos produtos à base de cereais, como *Nestum*, *Cerelac*, *Mokambo*, *Pensal*, entre outros. Por sua vez, a fábrica do Porto dedica-se aos cafés, onde se podem encontrar diversas marcas como *Boundi*, *Sical*, *Tofa*, *Christina*.

Ao lado da fábrica de Avanca localiza-se o principal centro de distribuição da *Nestlé Portugal*, de onde saem 80% dos produtos que incorporam o portefólio desta empresa. A Madeira, Funchal, dispõe também um centro de distribuição. Além destas estruturas, há o *Campus Nestlé*, situado em Linda-a-Velha, em Lisboa. Por fim, espalhados pelo território nacional, existem várias delegações (Presença Local, 2023).

O *campus* acolhe todas as entidades *Nestlé* que estão presentes em Portugal, como a *Nestlé Portugal* (*Nestlé PT*), a *Nestlé Business Services Lisbon* (*NBS Lisbon*) e a *Nespresso Global Supply Chain Hub*, (Inauguração do Campus Nestlé, 2021).

A *Nestlé PT* divide-se em negócios, nomeadamente: *Nescafé*, *Nestlé Professional*, *Infant Nutrition*, *CPW*, *Dairy*, *Confectionary*, *Food*, *Nestlé Health Science* e *Purina*.

O presente projeto insere-se no negócio de *Infant Nutrition* da *Nestlé Portugal*. Em particular, no planeamento da linha de *healthy snacks* que faz parte da fábrica de Avanca.

3.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A linha de produção de *healthy snacks* (ou *Pop-ups*) iniciou o seu funcionamento em 2018. No começo, apenas com dois formatos, os *Puffs* e os *Chips*, e, pouco tempo depois, com três formatos, com a novidade dos *PopCorns*. Estes *Pop-ups* eram produzidos em poucos sabores. No entanto, em 2023, surgiu um quarto formato, o formato *Corn Stick*, e também novos sabores. Todas estas alterações têm vindo a ser integradas na produção sem que se tenha feito uma reanálise ao tipo de planeamento da produção de acordo com as novas necessidades. O planeamento anual da linha de *healthy snacks* é o objeto deste trabalho.

De seguida caracteriza-se mais pormenorizadamente a situação prática e fixam-se alguns termos. Designaremos por **produto** ou *sku* (*stock keeping unit*) uma combinação formato/sabor. Na linha em estudo existem nove produtos, listados na Tabela 1.

Produtos	
1	<i>Puff</i> Banana
2	<i>Puff</i> Framboesa
3	<i>Chips</i> Cenoura
4	<i>Chips</i> Tomate
5	<i>Popcorn</i> Manga
6	<i>Popcorn</i> Amendoim
7	<i>Corn Stick</i> Natural
8	<i>Corn Stick</i> Morango
9	<i>Corn Stick</i> Amendoim

Tabela 1: Lista de Produtos

Conhecem-se as características de produção de cada um destes produtos, nomeadamente o tempo unitário de produção, não havendo economias de escala relevantes.

O plano de produção reparte o ano em ciclos. Em cada ciclo são definidos quais os produtos a fabricar e respetivas quantidades. Num ciclo, a fabricação de cada produto não é interrompida para a produção de outro, isto é, uma vez iniciada a fabricação só termina quando concluída a quantidade predefinida.

As quantidades a produzir anualmente de cada produto são calculadas com base numa previsão feita pela empresa para um período de 18 meses. No plano da empresa, o ano é dividido em ciclos de produção de três semanas. A organização da produção em ciclos com esta duração decorre da validade dos produtos, que impede que cada produto seja produzido apenas uma vez por ano, procurando-se sempre que possível, ter produto fresco em *stock*.

Adicionalmente, sabe-se que a procura anual prevista está bastante abaixo da capacidade da linha. Esta folga confere uma flexibilidade importante para acomodar aumentos de procura inesperados e realizar testes de novas receitas ou produção de produtos especiais.

No planeamento, é também necessário respeitar o MOQ (*minimum order quantity*) de cada *sku*, isto é, o lote mínimo a produzir de cada produto. Este limite invalida uma solução em que todos os produtos sejam produzidos em todos os ciclos, pois há produtos cuja quantidade anual prevista não é suficiente, ou seja, a produção do MOQ excede a procura anual prevista.

Na linha, a mudança da produção de um produto para outro exige um tempo de preparação que depende quer dos formatos quer dos sabores dos produtos. Este tempo, o **tempo de mudança**, é relativo à limpeza das máquinas, necessária sempre que se troca de sabor e também à mudança de molde sempre que é alterado o formato. Como o tempo de mudança varia consoante o produto que está a ser produzido e o produto que se lhe segue, uma das questões relevantes no planeamento é encontrar a ordenação de produtos que minimiza o total dos tempos de mudança.

Outra questão a ter em conta quando se determina a ordenação dos *sku*'s a produzir, é a preferência manifestada pela fábrica em efetuar o mínimo de mudanças de formato

possível por ciclo. A justificativa para esta preferência prende-se com a constatação de que a troca de formato implica mudanças de peças nas máquinas, o que leva a um aumento da probabilidade de erros, e, consequentes atrasos na produção na totalidade dos ciclos. A minimização do tempo despendido na mudança de produção leva a que, simultaneamente, seja possível atender a esta questão.

A linha de produção dos *healthy snacks* funciona em dois turnos de oito horas. O primeiro com início às 8:00h e término às 16:00h, e o segundo com início às 16:00h e término às 24:00h. No entanto, um produto que está a ser produzido no primeiro turno pode continuar a ser produzido no segundo sem qualquer perda de tempo, isto é, a passagem de turno não influencia em nada a produção. Assim, ao longo do documento, o termo **turno** será sempre referente a um período de 16 horas, ou seja, um dia de produção.

Nesta linha de produção, é reservado diariamente o final do dia para limpeza das máquinas. Contudo, se a operação de mudança de produto coincidir com o fim do dia, prescinde-se do período de limpeza diária.

Um requisito no funcionamento da linha de produção é que o tempo de mudança deve ocorrer todo no mesmo dia. Se não existir tempo para terminar a mudança no dia em que termina a produção do produto que estava a ser produzido, esta deve ser feita na totalidade no dia seguinte.

Tendo em consideração a situação acima descrita, julgou-se adequado efetuar o planeamento em duas fases. Numa primeira, a produção anual é repartida em ciclos de três semanas. Numa segunda, é feito o escalonamento das produções em cada ciclo, isto é, é estabelecida a ordem pela qual os produtos deverão ser produzidos dentro de cada ciclo. As duas fases serão detalhadas no capítulo seguinte da Metodologia.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo propõe-se uma metodologia para estabelecer um plano de produção anual para a linha de produção de *healthy snacks* da *Nestlé*. Como acima se referiu o planeamento será feito em duas fases. Numa primeira fase, sabendo-se a duração de um ciclo, determina-se, para cada ciclo, quais os produtos a produzir e em que quantidades. Na segunda, dentro de cada ciclo, estabelece-se a ordem das produções assegurando-se que os tempos de limpeza são salvaguardados e que as operações de mudança de produção não são interrompidas. Cada uma das secções que se segue descreve uma fase.

4.1. FASE 1: DIVISÃO DA PRODUÇÃO ANUAL EM CICLOS

A primeira fase da metodologia, passa por entender quantas vezes cada produto deverá ser produzido, tendo em conta a procura anual e o lote mínimo (MOQ). O processo realiza-se dividindo as procuras anuais de cada produto A_j pelo número de ciclos (nc). Os produtos j para os quais essa quantidade é igual ou superior ao respetivo lote mínimo MOQ_j , podem ser produzidos em todos os ciclos, e serão chamados de produtos fixos.

Quando a quantidade determinada é inferior ao lote mínimo, é feita uma divisão da procura anual QA_j por MOQ_j , para obter o número de ciclos que o produto vai integrar, arredondado para o inteiro acima. Assim se calcula o número máximo de ciclos em que o produto vai estar presente.

Em resumo, determina-se para cada produto j o número de ciclos em que é produzido NC_j e em que quantidade Q_j , do seguinte modo: se $\frac{QA_j}{nc} \geq MOQ_j$, j é um produto fixo, $NC_j = nc$ e $Q_j = \left\lfloor \frac{QA_j}{nc} \right\rfloor$; caso contrário $NC_j = \left\lceil \frac{QA_j}{MOQ_j} \right\rceil$ e $Q_j = MOQ_j$.

Tendo em atenção que se pretende evitar que todos os ciclos tenham programas de produção distintos, foram criadas algumas opções que são repetidas sempre que possível. Uma **opção** consiste num programa de produção para um ciclo, ou seja, na identificação de um conjunto de produtos a produzir e respetivas quantidades. Note-se que todas as opções incluem os produtos fixos.

Para decidir quais as opções a envolver no plano anual e quantas vezes devem ser repetidas desenvolveu-se o algoritmo apresentado adiante.

Sejam:

K o conjunto dos produtos não fixos;

PF o conjunto dos produtos fixos;

$FNC_j = NC_j$, o número de ciclos que falta atribuir ao produto j , para $j \in K$;

$FPF = nc$ o número de ciclos que falta atribuir aos produtos fixos;

$u = 1$ o número da opção corrente;

Enquanto $K \neq \emptyset$

$P_u = PF$

Passo 1: Determinar o produto t tal que $FNC_t = \max_{j \in K \setminus P_u} \{FNC_j\}$

(em caso de empate a escolha é arbitrária).

Passo 2: Se existem em K produtos com o mesmo formato de t

$$P_u = P_u \cup \{j \in K \text{ e tem o mesmo formato de } t\} \cup \{t\}.$$

Caso contrário, determinar o produto v tal que $FNC_v = \max_{j \in K \setminus \{t\}} \{FNC_j\}$

$$P_u = P_u \cup \{v\} \cup \{t\} \cup \{j \in K \text{ e tem o mesmo formato de } v\}$$

(em caso de empate a escolha é arbitrária).

Passo 3: Criar a opção u com os produtos P_u que se repete R_u vezes com

$$R_u = \min_{j \in P_u} \{FNC_j\}.$$

Passo 4: Atualizações

- Para $j \in P_u \setminus PF$

$$FNC_j = FNC_j - R_u;$$

$$\text{Se } FNC_j = 0 \text{ então } K = K - \{j\};$$

- $FPF = FPF - R_u$;
- $u = u + 1$;

Fim (Enquanto $K \neq \emptyset$).

Criar opção u com os produtos fixos que se repete FPF vezes.

Considere-se o exemplo de aplicação do algoritmo.

No exemplo, são considerados 17 ciclos. Na Tabela 2, observa-se os diferentes formatos dos quatro produtos que compõem este exemplo, bem como o número de ciclos que estes integram, NC_j . O produto F é um produto fixo, já que integra todos os ciclos.

Formatos	Produtos	Nº de ciclos que integram - NC_j
Formato W	Produto F	17
Formato X	Produto A	10
Formato X	Produto B	5
Formato Y	Produto C	4

Tabela 2: Dados do Exemplo

Tem-se que $K = \{A, B, C\}$.

Iteração 1

Passo 1- O produto $t = A$, com FNC_t maior, integra 10 ciclos, sendo o selecionado pelo algoritmo.

Passo 2- O produto $t = A$ e $t = B$ têm o mesmo formato.

Passo 3- Cria-se a opção 1 com os produtos não fixos A e B, e com o produto fixo F. Esta repete-se cinco vezes.

Passo 4- Atualizam-se os dados. O produto F tem FNC_j de 12, o produto A tem FNC_j de 5 e o produto B tem FNC_j de 0. Assim $FPF = FNC_F$ e $K = \{A, C\}$. Enquanto $K \neq \emptyset$ volta-se ao Passo 1.

Atualiza-se a tabela representativa do exemplo.

Formatos	Produtos	Nº de ciclos que integram NC_j
Formato W	Produto Z	12
Formato X	Produto A	5
Formato X	Produto B	0
Formato Y	Produto C	4

Tabela 3: Exemplo Iteração 1

Iteração 2

Passo 1 – O produto $t = A$, com FNC_t maior, integra 5 ciclos, sendo o selecionado pelo algoritmo.

Passo 2- Não existem produtos não fixos com o mesmo formato. Deste modo, escolhe-se o produto $v = C$, com FNC_v maior, de 4 ciclos.

Passo 3- Cria-se a opção 2 com os produtos não fixos A e C, e com o produto fixo F. Esta repete-se quatro vezes.

Passo 4- Atualizam-se os dados. O produto F tem FNC_j de 8, o produto A tem FNC_j de 1 e o produto C tem FNC_j de 0. Assim $FPF = FNC_F$ e $K = \{A\}$. Enquanto $K \neq \emptyset$ volta-se ao Passo 1.

Atualiza-se a tabela representativa do exemplo.

Produtos	Produtos	Nº de ciclos que integram NC_j
Formato W	Produto Z	8
Formato X	Produto A	1
Formato X	Produto B	0
Formato Y	Produto C	0

Tabela 4: Exemplo Iteração 2

Iteração 3

Passo 1 – Nesta fase, o produto $t = A$, com FNC_t maior, integra 1 ciclo, sendo o selecionado pelo algoritmo.

Passo 2- Não existem produtos não fixos com o mesmo formato. Deste modo, não existindo mais produtos não fixos, escolhe-se apenas o produto $t = A$.

Passo 3- Cria-se a opção 3 com o produto não fixo A, e com o produto fixo F. Esta opção não se repete.

Passo 4- Atualizam-se os dados. O produto F tem FNC_j de 7 e o produto A tem FNC_j de 0. Assim $FPF = FNC_F$ e $K = \emptyset$. Fim.

Assim, cria-se a opção 4 com o produto fixo F, que se repete $FPF = 7$ vezes.

Terminada a aplicação do algoritmo, é necessário atribuir as opções aos respetivos ciclos.

Defina-se por O_i , $i = 1, \dots, no$, o número de vezes que a opção i é repetida em nc . Sendo no , o número de opções existentes.

Por uma questão de gestão de *stock*, os produtos que não são fixos (não estão em todos os ciclos) são repartidos com um determinado espaçamento ao longo dos nc ciclos, para que não haja concentração da produção desses produtos em ciclos consecutivos.

Por essa razão, a afetação das opções ao longo dos nc ciclos é feita com um espaçamento $\left\lceil \frac{nc}{O_i} \right\rceil$.

Vejamos no exemplo:

A opção 1 integra 5 ciclos. Dividindo $\left\lceil \frac{17}{5} \right\rceil$, obtém-se o espaçamento médio entre as quatro vezes que a opções 1 será integrada ao longo dos 17 ciclos, que será em média de 3,4.

Esta lógica deve continuar até que todas as opções estejam alocadas a um dos nc ciclos.

A primeira fase termina assim com a definição dos produtos e respectivas quantidades a produzir em cada um dos nc ciclos.

4.2. FASE 2: PLANEAMENTO DE UM CICLO DE PRODUÇÃO

Na segunda fase detalha-se, em cada ciclo, a melhor ordenação dos *sku's* a produzir, obedecendo a todas as condicionantes do problema. Relembrar que se deve respeitar a limitação de que a operação de mudança de produção deve ser toda realizada num mesmo dia, e reservar períodos de limpeza no final do dia, caso este tempo não seja aproveitado para efetuar mudança de produção.

Esta fase foi resolvida recorrendo à PLI. Na formulação usa-se a notação seguinte:

Parâmetros:

M – Tempo disponível num ciclo.

L – Período, em minutos, reservado para limpeza no final de cada dia.

T – Duração do turno diário, em minutos.

n – Número de produtos a processar.

N – Conjunto de produtos a processar, $N = \{0, 1, 2, \dots, n, n + 1\}$, sendo 0 o produto inicial e $n + 1$ o produto final, ambos fictícios.

c_{ij} – Tempo de mudança, em minutos, da produção do produto i para a produção do produto j , $i, j \in N$ ($c_{in+1} = 0, \forall i$).

s_j – Tempo, em minutos, para produzir a quantidade definida de produto j , $j \in N$ ($s_{n+1} = 0$)

A formulação requer a definição das seguintes variáveis:

Para $i = 0, 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n + 1$:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a produção de } j \text{ segue imediatamente a produção de } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ começa no dia seguinte ao que a produção de } i \text{ acaba} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se passa de } i \text{ a } j \text{ no dia seguinte ao que a produção de } i \text{ acaba} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Para $j \in N$:

t_j – Primeiro minuto de produção de j

d_j – Dia em que começa a produção de j

y_j – Dia em que termina a produção de j

O modelo pode então escrever-se:

$$\text{Min } z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij}x_{ij} + t_{n+1} + \alpha \sum_{j=1}^n t_j \quad (1)$$

s.a

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n + 1 \quad (3)$$

$$t_j \geq t_i + s_i + L(y_i - d_i) + c_{ij}x_{ij} - M(1 - x_{ij}), \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (4)$$

$$t_j \geq T(y_i) + c_{ij}z_{ij} + 1 - M(1 - x_{ij}) - M(1 - a_{ij}), \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (5)$$

$$t_j \leq T(y_i) - L + M(1 - x_{ij}) + M(a_{ij}), \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (6)$$

$$t_j \leq T(y_i) + M(1 - x_{ij}) + M(1 - a_{ij}) + M(z_{ij}) + 1, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (7)$$

$$\frac{t_j}{T} \leq d_j, \quad j = 1, \dots, n + 1 \quad (8)$$

$$d_j \leq y_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$\frac{t_j + s_j + L(y_j - d_j)}{T} \leq y_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$\frac{t_j + s_j + L(y_j - d_j)}{T} \geq y_j - 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$d_j - y_i \leq M(1 - x_{ij}) + a_{ij}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (12)$$

$$d_j - y_i \geq -M(1 - x_{ij}) + a_{ij}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (13)$$

$$z_{ij} \leq a_{ij}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (14)$$

$$a_{ij} \leq x_{ij}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (15)$$

$$t_0 = 0, d_0 = 1, y_0 = 1 \quad (16)$$

$$x_{ii} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (17)$$

$$t_i \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad i = 0, \dots, n + 1 \quad (18)$$

$$d_i \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad i = 0, \dots, n + 1 \quad (19)$$

$$y_i \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad i = 0, \dots, n \quad (20)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (21)$$

$$a_{ij} \in \{0,1\}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (22)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}, \quad i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \quad (23)$$

Com o modelo pretende-se encontrar um escalonamento de produções que minimize o tempo gasto nas mudanças de produção, termine o mais cedo possível o conjunto das produções e ainda inicie cada produção, o mais cedo possível. Assim, a função objetivo (1) é composta por três termos que traduzem estes objetivos: o primeiro termo é o total dos tempos de mudança ($\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij} x_{ij}$); o segundo, o tempo de finalização de toda a produção (t_{n+1}) e o terceiro, uma percentagem α do tempo de finalização das restantes produções ($\alpha \sum_{j=1}^n t_j$). A utilização de uma percentagem (20% no caso presente) evita que o terceiro termo domine o primeiro, isto é, que a minimização dos tempos de conclusão se sobreponha à minimização dos tempos de mudança.

As restrições (2) e (3) garantem que todo o produto j ($j \in N$) é produzido uma e uma só vez.

Os conjuntos de restrições (4) a (7) impõem condições ao período de início da produção de j ($j \in N$).

No grupo (4) garante-se que, se a produção imediatamente anterior a j for i , a produção de j , só é iniciada quando passar o tempo necessário para produzir i e mudar para j . Isto é, assumindo o primeiro período de produção de i (t_i), é necessário salvaguardar o tempo para a produção de i (s_i), o tempo gasto em limpeza nos dias de produção de i ($L(y_i - d_i)$) e o de mudança de i para j ($c_{ij}x_{ij}$). O termo $M(1 - x_{ij})$ torna esta restrição redundante se a produção de i não anteceder imediatamente a de j .

As restrições (5) estabelecem que o início da produção de j só pode ocorrer no dia seguinte ao do término da produção de i , e após o tempo necessário para fazer a mudança de produção de i para j . Admitindo que a produção que antecede imediatamente a de j é i ($x_{ij} = 1$) e além disso que a produção de j não pode começar no dia em que termina a de j ($a_{ij} = 1$), bem como a mudança terá de ser realizada no dia seguinte ($z_{ij} = 1$).

Ao contrário dos grupos que acabaram de se descrever (4) e (5), que estabelecem limites inferiores ao início da produção de j , com os restantes dois grupos, (6) e (7), são impostos limites superiores. Garantindo que, sempre que possível, o dia de início de j e o de fim de i coincidam (6) e, caso seja viável, a mudança será feita preferencialmente na véspera do início de j (7).

A definição dos dias em que começam e terminam as várias produções são da responsabilidade dos grupos (8) a (11). Com (12) e (13) estabelece-se que, se i antecede imediatamente j , o dia em que começa j ou coincide (e $a_{ij} = 0$) com o dia em que termina i , ou há uma diferença de um dia (caso em que $a_{ij} = 1$).

No modelo pressupõe-se que, caso a produção de j não seja precedida imediatamente pela de i ($x_{ij} = 0$), a_{ij} deverá tomar o valor zero (15). De igual modo admite-se que se a_{ij} for nulo, z_{ij} também terá de o ser (14). Com (14) salvaguarda-se também que, para que a mudança entre duas produções consecutivas aconteça no dia seguinte ao que termina a produção da primeira ($z_{ij} = 1$), obrigatoriamente há um dia de desfasamento entre o dia do final da primeira e o do início da segunda ($a_{ij} = 1$).

Por fim, em (16) fixam-se as condições iniciais, a impossibilidade das mudanças de produção entre os mesmos produtos em (17) e os domínios das variáveis de (18) a (23).

5. RESULTADOS

Neste capítulo propõe-se um planeamento anual para a linha de produção de *healthy snacks* da *Nestlé* tendo em conta a metodologia explicada no capítulo anterior e os dados fornecidos pela empresa.

O tempo disponível para produção num ciclo de três semanas é 14 400 minutos, este valor justifica-se por cada semana ter apenas cinco dias de produção e cada dia 960 minutos (16 horas). Assim, em termos de planeamento devem ser considerados 15 turnos de 960 minutos por ciclo. No final de cada dia, reserva-se um período de 60 minutos para limpeza. Contudo, caso neste período esteja a decorrer a operação de mudança de produção, então prescinde-se da limpeza nesse dia.

O número de ciclos que se pretende planear é 17. O ano tem 52 semanas, desta forma, uma semana não é tida em conta no escalonamento, com o intuito de o programa ter maior flexibilidade para produções extra.

Na Tabela 5, está a informação sobre os nove produtos que se pretendem produzir no ano.

	Produtos	Procura anual (kg)	Tempo de produção unitário (min/kg)	MOQ (kg)
1	<i>Puff</i> Banana	26105	2,3747	1200
2	<i>Puff</i> Framboesa	81967	2,3375	1200
3	<i>Chips</i> Cenoura	20550	2,0916	1200
4	<i>Chips</i> Tomate	37991	2,0916	1200
5	<i>Popcorn</i> Manga	4253	2,0916	1200
6	<i>Popcorn</i> Amendoim	3429	2,0916	1200
7	<i>Corn Stick</i> Natural	12498	1,2799	1200
8	<i>Corn Stick</i> Morango	9961	1,2799	1200
9	<i>Corn Stick</i> Amendoim	3650	1,2799	1200

Tabela 5: Dados de produção

A procura anual corresponde a dois terços do valor para 18 meses fornecido pela empresa. O tempo de produção unitário é dado em minutos por quilograma e o lote mínimo de produção, MOQ, é 1200 quilogramas para qualquer um dos nove produtos.

5.1. RESULTADOS DA FASE 1

De acordo com as informações da Tabela 5, e o procedimento descrito na metodologia determinaram-se os dados necessários para aplicação do algoritmo da primeira fase que constam na Tabela 6. Mais precisamente calcula-se para cada produto, a “Produção por Ciclo”, isto é, a quantidade a produzir de cada produto sempre que é incluído num ciclo, o “Tempo de Produção”, ou seja, o tempo que demora a produzir essa quantidade, e ainda o “N.º de Ciclos” que deve conter o produto.

Produto (j)	Produção por Ciclo (kg) (Q_j)	Tempo de Produção (minutos) (s_j)	Nº de Ciclos (NC_j)
1	1536	647	17
2	4822	2159	17
3	1209	578	17
4	2235	1069	17
5	1200	574	4
6	1200	574	3
7	1200	938	11
8	1200	938	9
9	1200	938	4

Tabela 6: Produção por ciclo

Na Tabela 6, podemos observar que os produtos 1, 2, 3 e 4 são fixos, pois a procura anual é suficiente para a sua inclusão em todos os (17) ciclos. As quantidades a produzir em cada ciclo são 1536 kg do produto 1, 4822 kg do produto 2, 1209 kg do produto 3, e 2235 kg do produto 4, valores superiores ao MOQ que é 1200 kg para todos os produtos.

Para os restantes produtos, foi feita a divisão da sua procura anual pelo MOQ para calcular o número de ciclos em que o produto devia constar. Esta informação está contida na última coluna (“Nº de Ciclos”).

Aplicando o algoritmo para criar opções, descrito na metodologia, e afetando as opções aos ciclos, de acordo com a lógica esboçada, obtém-se o resultado da Fase 1, contido na Tabela 7. Para cada opção estão identificados os “Produtos” a incluir nas quantidades dadas pela coluna “Produção por Ciclo” da Tabela 6. A última coluna da Tabela 7 (“Ciclos”) tem a afetação dos ciclos às opções. Por exemplo, na última linha da tabela, podemos ver que a opção 6 será o programa de produção dos ciclos 3 e 8. A opção propriamente dita, é composta pelos produtos, 1, 2, 3, 4 e 8, em quantidades 1536, 4822, 1209, 2235 e 1200, respetivamente.

Opções	Produtos	Ciclos
Opção 1	1,2,3,4,5,6	1, 6,11
Opção 2	1,2,3,4,7,8,9	2,7,12,16
Opção 3	1,2,3,4,5	15
Opção 4	1,2,3,4,7,8	4,9,14
Opção 5	1,2,3,4,7	5,10,13,17
Opção 6	1,2,3,4,8	3, 8

Tabela 7: Produtos e afetação das opções

No gráfico da Figura 1, estão representadas as seis opções ao longo do ano. No eixo horizontal estão as 52 semanas do ano, e no eixo vertical as seis opções identificadas. Os retângulos vazios reproduzem o intervalo de tempo de três semanas, duração de um ciclo. Estes estão posicionados, no eixo horizontal, no intervalo de três semanas ao qual correspondem, e no eixo vertical, na direção da opção com a qual são correspondidos.

Assim, na Figura 1, pode ser visualizado o mapa do plano anual de produção que se obtém no final da Fase 1.

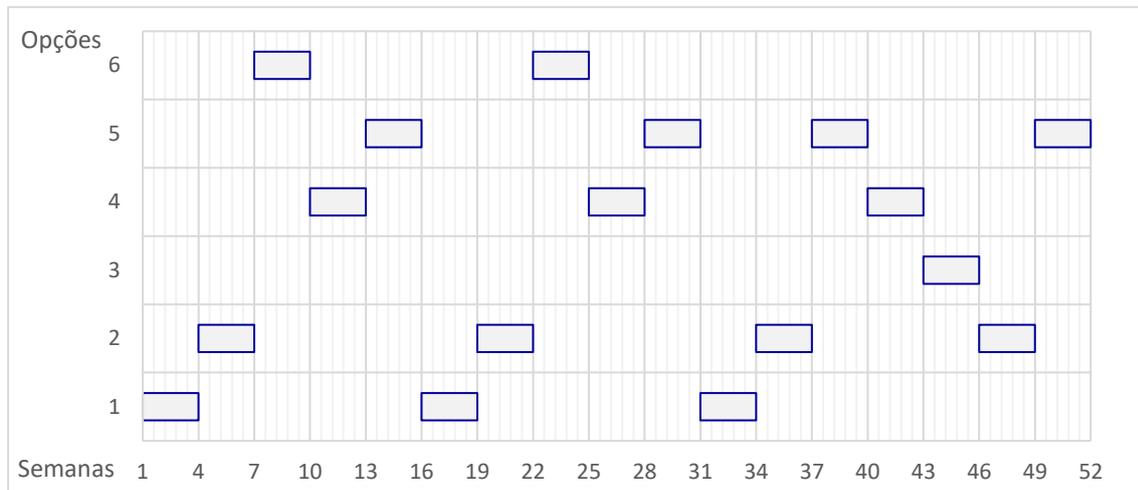


Figura 1: Distribuição das opções ao longo do ano

5.2. RESULTADOS DA FASE 2

Esta fase foi concretizada resolvendo o modelo de programação Linear Inteira (1) a (23) apresentado na metodologia. Devido ao nível de complexidade do modelo, o *Open Solver*, versão 2.9.3, (OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes, 2012), demora mais tempo do que é razoável para conseguir chegar a uma solução. Assim, foi necessário recorrer a outro programa mais potente para poder avançar com o trabalho. Optou-se pelo *CPLEX*, versão 20.1.0.0, (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 20.1.0 documentation, 2021).

Para cada opção, foi determinado pelo modelo quer a ordenação das tarefas, quer o momento exato em que cada produto inicia a sua produção e em que começa cada operação de mudança de produção.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 2 o plano de produção para o primeiro ciclo, que corresponde ao escalonamento da opção 1.

Na Figura 2, cada barra corresponde ao intervalo de tempo do turno de produção. Os valores que se encontram abaixo dos traços verticais representam o momento, em minutos, de início e término das ações. Na figura é ainda indicada a semana e o dia.

O **dia 0** começa com a produção do produto 5, com uma duração de 574 minutos. De seguida, procede-se à operação de mudança do produto 5 para o produto 3, que termina no minuto 814. Posteriormente, inicia-se parte da produção de 3, dividida entre o dia 0 e 1, por não existir tempo suficiente para o total desta ser realizado no dia 0. Por fim, é feita a limpeza, com duração de 60 minutos.

Assim, no **dia 1**, termina-se a produção de 3, inicia-se a produção de 4 e são efetuadas as limpezas necessárias.

No **dia 2**, termina-se a produção de 4, e, como não foi possível realizar toda a operação de mudança neste dia, é necessário proceder à limpeza de 60 minutos. Assim, a operação de mudança passa para o dia seguinte, dia 3, e o tempo que sobra do dia 2, é considerado tempo de inatividade. Já que não está afeta nenhuma atividade para este tempo.

No **dia 3**, é feita a operação de mudança do produto 4 para o 1, produz-se 1, e o restante tempo, é parte dele de inatividade parte dele para limpezas.

No **dia 4**, é feita a operação de mudança do produto 1 para o 2 e inicia-se a produção de 2 e termina a primeira semana de produção.

O **dia 5** do ciclo, marca o início da segunda semana, e é produzido mais uma parte da produção de 2.

O **dia 6** é ocupado pela produção de 2, bem como pelo tempo afeto à mudança de 2 para 6. Neste dia, inicia-se a produção de 6, que termina no dia seguinte, **dia 7**. No fim do dia, é efetuada a limpeza.

Para todos os ciclos obtém-se assim um escalonamento detalhado similar ao apresentado na Figura 2 para o ciclo 1, que constitui o plano anual com que termina a Fase 2.

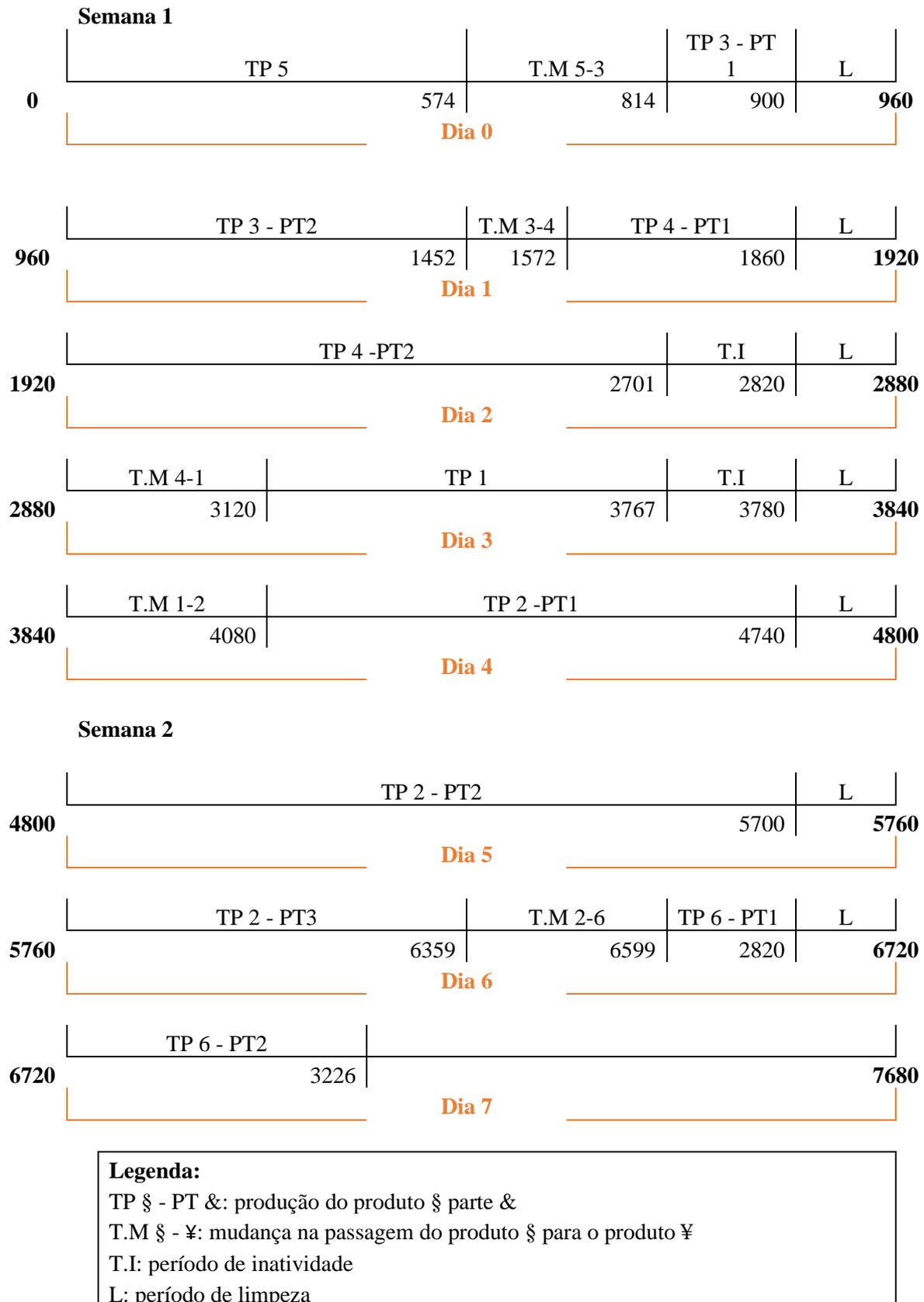


Figura 2: Escalonamento da Opção 1 do ciclo

Os resultados obtidos com o *CPLEX* para as seis opções consideradas podem ser avaliados tendo em conta a informação da Tabela 8. Nesta, a primeira coluna identifica a opção e a segunda contém a ordenação dos seus produtos. A coluna “T. Mudança”, exhibe o tempo (em minutos) que é gasto em mudanças de produção na ordenação determinada. A coluna “T. Produção” inclui a soma do tempo (em minutos) de produção dos produtos presentes na opção. Por sua vez, a coluna “T. Total”, soma os minutos gastos em mudança de máquinas com os minutos gastos em produção. O “T. Final” (t_{n+1}) regista o primeiro minuto após a última produção do ciclo estar concluída.

A diferença entre o “T. Final” e o “T. Total” encontra-se na penúltima coluna, esta diferença representa tempo de inatividade (incluindo limpeza), portanto quanto menor for, mais eficiente na utilização do tempo útil será o escalonamento. Por fim, a última coluna contém o valor da função objetivo.

Opção	Ordenação	T. Mudança	T. Produção	T. Total	T. Final	Diferença	F.O
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)+(4)	(6)	(7)=(6)-(5)	(8)
1	5-3-4-1-2-6	960	5601	6561	7114	553	11263,6
2	3-4-1-2-7-8-9	1080	7267	8347	8919	572	15186,8
3	5-3-4-1-2	720	5027	5747	6240	493	8853,6
4	3-4-1-2-7-8	840	6328	7168	7921	753	12604,6
5	3-4-1-2-7	720	5391	6111	6518	407	9514
6	3-4-1-2-8	720	5391	6111	6518	407	9514

Tabela 8: Proposta de escalonamento

Observando a Tabela 8, podemos constatar que os valores da coluna “Diferença”, não são elevados, o que significa que o modelo usado na Fase 2 teve um bom desempenho. Note-se que, estes tempos serem pequenos, significa que não há elevadas perdas de tempo na linha e, conseqüentemente, há um maior aproveitamento da mesma.

Como já foi referido, cada ciclo tem no máximo um tempo útil de 14 400 minutos. Assim, se a este tempo subtrairmos o “T. Final”, obtém-se o tempo útil que sobra em cada ciclo. Este valor pode ser lido na Tabela 9, na coluna com o nome de “T. Útil Restante”, em minutos.

Opção	T. Útil Ciclo	T.Final	T. Útil Restante	% T. Utilizado
(1)	(2)	(3)	(4)=(2)-(3)	(5)=(3)/(2)x100
1	14400	7114	7286	49,4
2	14400	8919	5481	61,9
3	14400	6240	8160	43,3
4	14400	7921	6479	55,0
5	14400	6518	7882	45,3
6	14400	6518	7882	45,3

Tabela 9: Tempo útil utilizado e restante

5.3. AVALIAÇÃO DA PROPOSTA DESENVOLVIDA

Para avaliar o plano anual pode-se calcular o tempo útil total restante no fim do plano anual. Este valor é determinado pela multiplicação do tempo útil restante de cada opção (Tabela 9), pelo número de vezes que essa opção é utilizada (Tabela 7). Assim, como as opções 1 e 4 são repetidas três vezes, as opções 2 e 5 são repetidas quatro vezes, a opção 3 apenas uma vez, a opção 6 é repetida duas vezes, este valor é de 118 671 minutos. Logo, após a produção para satisfação da procura prevista, a linha dispõe de uma folga substancial, aproximadamente 123 dias, para efetuar testes e acomodar procuras não previstas.

Com o auxílio da Figura 3, visualiza-se a proposta apresentada anteriormente na Tabela 8.

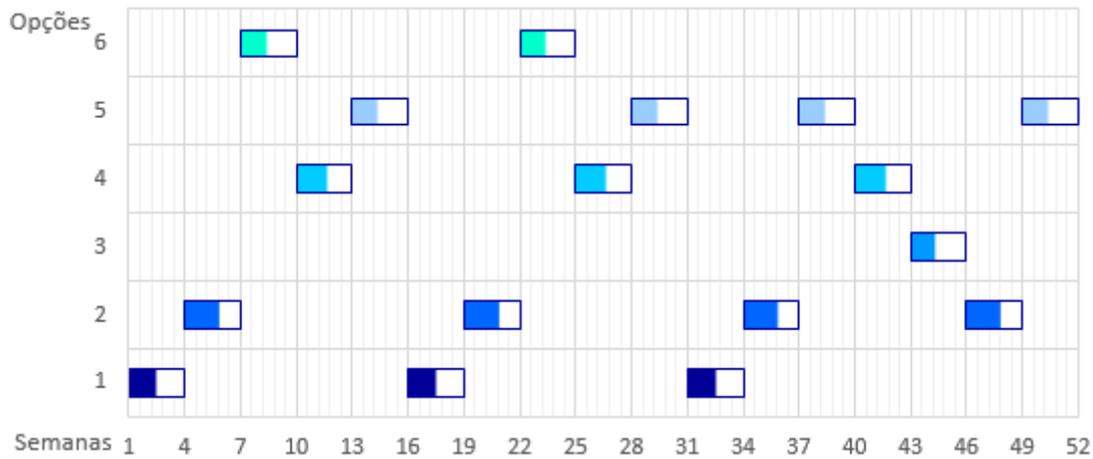


Figura 3: Distribuição das opções ao longo do ano e tempo de inatividade

Na Figura 3 os retângulos representam um ciclo e estão parcialmente preenchidos. O preenchimento dos retângulos tem por base a percentagem de tempo utilizada em cada ciclo, informação contida na coluna “% T. Gasto” da Tabela 9. A parte não pintada corresponde ao tempo útil restante por ciclo.

Por conseguinte, a opção 2 é a que utiliza mais tempo do ciclo e a opção 3 a que utiliza menos tempo, apenas 43,33 % do tempo total do ciclo. Deste modo, na opção 3 sobram 8160,05 minutos, e na opção 2 5486,4 minutos.

Como já se referiu, o tempo que sobra em cada ciclo não é perdido, pelo contrário confere ao planeamento da linha uma maior flexibilidade. Este aspeto é importante, não só porque se trata de uma produção recente, mas sobretudo porque a previsão da procura de produtos novos é feita com alguma incerteza. Assim podem ser introduzidos ajustamentos sem prejudicar o plano anual.

Na realidade, este tempo ganho na linha, pode ser utilizado, tanto para adicionar produções extra e muitas vezes de última hora, como para fazer produções especiais, campanhas, testes de novos produtos ou amostras.

Em complemento, as novas produções que poderão ser adicionadas nestes tempos podem também ser alvo de escalonamento, utilizando o modelo desenvolvido e otimizar assim o tempo da melhor forma possível.

Além disto, nesta proposta existem tempos de inatividade, que foram calculados na Tabela 8, na coluna “Diferença”. Durante o ciclo de produção existem tempos em que não se está a produzir nem têm uma finalidade. O modelo tem em consideração certas informações para não produzir nestes intervalos.

Uma possível sugestão de utilização do tempo de inatividade poderá ser, estender a produção do produto que estava anteriormente a ser produzido.

Este tempo é calculado, subtraindo ao tempo de produção total, o momento em que acaba o ciclo. Pois, todo o tempo extra ao de produção total, será o de inatividade. Nesta proposta, o tempo total de inatividade é de 3185 minutos.

5.4. COMPARAÇÃO COM UMA SITUAÇÃO ATUAL

De forma a perceber o impacto da utilização do modelo desenvolvido na eficiência da linha de produção, foram comparados dois cenários reais, fornecidos pela empresa, de um ciclo de produção com a solução da empresa. Considere-se que, a Fase 1 foi previamente resolvida pela empresa. Comparam-se de seguida os dois cenários reais com a solução do modelo nas mesmas condições, isto é, a comparação tem em conta as mesmas procuras, produtos, tempos de produção e mudança.

Na Tabela 10 observa-se a comparação entre o cenário 1 da empresa, com os resultados do modelo.

	Ordenação	T. Mudança	T. Produção	T. Total	T. Final	Diferença	F.O
	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)+(4)	(6)	(7)=(6)-(5)	(8)
Nestlé	1-7-8-9-2-3-4	1440	4608	6048	6500	452	11340,4
Modelo	7-8-9-3-4-1-2	1320	4608	5928	6288	360	10168,4

Tabela 10: Comparação com cenário 1 da Empresa

Neste cenário, os produtos do programa de produção são os 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9. A empresa sequenciou-os da seguinte forma: 1-7-8-9-2-3-4. O modelo, por sua vez, apresentou a sequência 7-8-9-3-4-1-2.

Visualizando a coluna “T.Mudança” da Tabela 10, podemos verificar que o tempo de mudança na sugestão do modelo, 1320 minutos, é inferior ao tempo de mudança no plano da empresa, 1440 minutos. Além disso, a “Diferença” no modelo é de 360 minutos enquanto a solução da empresa que é 452 minutos, sendo a do modelo melhor, visto ter menos minutos de inatividade.

Adicionalmente, o valor da função objetivo é também menor. Assim, conclui-se que a sequência do modelo é uma melhor escolha.

A Tabela 11 tem os resultados do cenário 2, onde os produtos do programa de produção são: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

	Ordenação	T. Mudança	T. Produção	T. Total	T. Final	Diferença	F.O
	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)+(4)	(6)	(7)=(6)-(5)	(8)
Nestlé	1-5-6-7-8-2-3-4	1920	5129	7049	8138	1089	15201,4
Modelo	6-5-3-4-1-2-7-8	1800	5129	6929	7461	532	11016,4

Tabela 11: Comparação com cenário 2 da Empresa

A empresa sequenciou-os da seguinte forma: 1-5-6-7-8-2-3-4. O modelo, por sua vez, apresentou a sequência 6-5-3-4-1-2-7-8.

Visualizando a coluna “T.Mudança” da Tabela 11, podemos verificar que o tempo de mudança na solução do modelo, 1800 minutos, é inferior ao tempo de mudança no plano da empresa, 1920 minutos. Além disso, a “Diferença” no modelo é de 532 minutos *versus* a da empresa que é 1089 minutos, sendo a do modelo melhor, visto que significa ter menos minutos de inatividade.

Adicionalmente, o valor da função objetivo é também menor. Assim, pode concluir-se mais uma vez que a sequência do modelo é a melhor.

Desta forma, para ambos os cenários da empresa, o modelo sequenciou os produtos de forma mais eficiente, sendo mais rápido, tendo menos tempos de inatividade e tornando assim a linha mais eficiente.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Em qualquer empresa, um dos principais objetivos será sempre por melhorar volumes e receitas. Assim, rentabilizar da melhor forma o tempo, é a chave para o aumento da produtividade e melhor aproveitamento dos recursos utilizados. A realização deste projeto mostrou que a utilização de métodos de otimização de processos produtivos melhora o funcionamento destes em contextos empresariais.

A otimização de escalonamentos tem uma grande relevância a nível académico por onde podem ser exploradas várias situações. Tem uma vasta literatura, no que toca a aplicação de problemas desta matéria a casos práticos. Com o presente trabalho procurou-se contribuir para a biblioteca académica de aplicação de problemas de escalonamento à otimização de processos produtivos.

O modelo desenvolvido ao longo do projeto, apresentou resultados consideravelmente melhores do que os relatados pela empresa. Desta forma, a proposta de plano anual, sendo aplicada proporcionaria uma maior produtividade para a empresa, o que consequentemente levaria a maiores receitas, devido à maior capacidade da fábrica para responder às necessidades.

No decurso deste estudo enfrentaram-se algumas dificuldades, nomeadamente o facto do modelo construído conter um número bastante elevado de restrições e variáveis, o que não permitiu a resolução do mesmo no *OpenSolver*.

O trabalho deixa ainda diversas vertentes por explorar. Seria interessante, nesta sequência, a construção de um modelo capaz de resolver as duas fases da metodologia em simultâneo. Esta podia ser implementada, através de um modelo de PLI tendo por base restrições e todas as premissas consideradas ao longo do documento.

Em suma, o modelo construído revelou melhorias notáveis em relação às práticas atuais da empresa, proporcionando não apenas uma visão crítica das operações, mas também soluções tangíveis para impulsionar a eficiência.

7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, Z. H. (2013). A Hybrid Genetic Algorithm for the Bottleneck Traveling. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 12, 1-10.
- Bérczi, K., Mních, M., & Vincze, R. (2022). Efficient Approximations for Many-Visits. *Omega*, 116, 102816.
- Conheça a Nestlé*. (2023). Retrieved Julho 2023, from Nestlé Portugal: <https://empresa.nestle.pt>
- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2, 393-410.
- Fábry, J., & Kobzareva, M. (2012). Multiple messenger problem. *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*, (pp. 141-147).
- Fuchigami, H. Y., & Rangel, S. (2017). A survey of case studies in production scheduling: Analysis and Perspectives. *Journal of Computational Science*, 25, 425-436.
- Gomes, H. C. (2008). Relaxação Lagrangeana com Fixação de Variáveis Aplicada ao Problema de Sequenciamento em uma máquina. pp. 4-39.
- Gutin, G., & Punnen, A. P. (2007). *The Traveling Salesman and Its Variations*. New York: Springer.
- Herrmann, J. W. (2010). The Perspectives of Taylor, Gantt, and Johnson: "How to Improve Production Scheduling". *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 243-254.
- IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 20.1.0 documentation*. (2021). Retrieved Junho 20, 2023, from IBM: https://www.ibm.com/docs/en/icos/20.1.0?topic=SSSA5P_20.1.0/ilog.odms.studio.help/Optimization_Studio/topics/COS_home.html
- Inauguração do Campus Nestlé*. (2021). Retrieved Abril 16, 2023, from Nestlé em Portugal: <https://empresa.nestle.pt/media/comunicados/2021-evento-inauguracao-sede>

- Kenneth, R. B., & Trietsch, D. (1974). *Principles of sequencing and scheduling*. New York: JOHN WILEY & SONS.
- Ku, W.-Y., & Beck, J. C. (2016). Mixed integer programming models for job shop scheduling: A computational analysis. *Elsevier*, 73, 165-173.
- Laporte, G., & Palekar, U. (2002). Some applications of the clustered travelling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 972-976.
- Mason, A. (2012). *Operations Research Proceedings 2011: OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes*. (D. a.-J. Klatte, Ed.) Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-29210-1_64
- Oliveira, A. (2015). *Extensões do Problema do Caixeiro Viajante*. Tese Mestrado.
- PAN, C.-H. (1996). International Journal of Systems Science. In C.-H. PAN, *A study of integer programming formulations for scheduling problems* (pp. 33-41). Taylor & Francis.
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. New York: Springer.
- Presença Local*. (2023). Retrieved Abril 16, 2023, from Nestlé em Portugal: <https://empresa.nestle.pt/conheca-nestle/nestle-portugal/localizacoes>
- Su, F., Kong, L., Wang, H., & Wen, Z. (2021). Modeling and application for rolling scheduling problem based on TSP. *Applied Mathematics and Computation*, 407(3), 1-13.

ANEXOS

Anexo 1- Matriz de Tempos de Mudança (T.M)

Produtos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	100000	120	240	240	240	240	240	240	240
2	240	100000	240	240	240	240	240	240	240
3	240	240	100000	120	240	240	240	240	240
4	240	240	240	100000	240	240	240	240	240
5	240	240	240	240	100000	240	240	240	240
6	480	480	480	480	480	100000	480	480	120
7	480	480	480	480	480	480	100000	120	120
8	480	480	480	480	480	480	240	100000	240
9	480	480	480	480	480	480	240	240	100000