



Ferramenta de Apoio à Decisão ao Planejamento Agregado da Produção

Guilherme Murilho

Trabalho realizado sob a orientação de
Prof. Dr. Maria Clara Rodrigues Bento Vaz Fernandes
Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira

2022-2023

Ferramenta de Apoio à Decisão ao Planejamento Agregado da Produção

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia Industrial**
no âmbito da **Dupla Diplomação** com a **Universidade Tecnológica Federal do**
Paraná – Campus Pato Branco

Guilherme Murilho

2022-2023

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas nesta dissertação.

Certifico que revi esta dissertação, que o trabalho descrito reúne as condições necessárias para ser avaliado, e que é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido.

Prof. Dr. Maria Clara Rodrigues Bento Vaz Fernandes (Orientador)

Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira (Co-orientador)

Certifico que li esta dissertação e que, na minha opinião, a mesma é adequada no conteúdo e na forma como demonstrador do trabalho desenvolvido.

Prof. Dr. Maria Prudência Gonçalves Martins (Arguente)

Certifico que o trabalho descrito nesta dissertação reúne as condições necessárias para ser avaliado, e que é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido.

Guilherme Murilho

Agradecimentos

Este trabalho é o resultado de um esforço colaborativo, e gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos às pessoas e instituições que me apoiaram ao longo deste desafio.

Em primeiro lugar, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) por proporcionarem essa experiência única. Agradeço também a todas as pessoas nessas instituições que contribuíram de alguma forma para tornar tudo isso possível.

À empresa, sou grato pela recepção, pelo aprendizado e pela oportunidade de realizar um estágio e desenvolver um estudo em seu ambiente de trabalho.

À Prof^a Dra. Clara Bento Vaz, gostaria de expressar minha profunda gratidão pela sua paciência, incentivo e apoio ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe Cristina, ao meu pai Rafael, e ao meu irmão Gustavo. Sem vocês, nada disso seria possível. Sou imensamente grato por tudo que fizeram por mim. Vocês são o meu alicerce, minha força e minha maior motivação para sempre seguir em frente. Eu amo vocês infinitamente e sou imensamente grato por todo o apoio e amor incondicional que recebo de vocês. Sou verdadeiramente abençoado por ter uma família tão maravilhosa como a nossa.

À todos os meus familiares e amigos no Brasil que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, mesmo com a distância. Em particular, gostaria de agradecer minhas avós Maria e Neusa e meu avô Rafael. Sou imensamente grato por todo o amor e apoio que recebo de vocês.

Ao meu grande amigo Fernando, que esteve ao meu lado ao longo dessa jornada e compartilhou comigo os momentos mais felizes, bem como os mais desafiadores. Muitas

das ideias e aspectos abordados aqui surgiram a partir das discussões enriquecedoras que tivemos. Sou extremamente grato por ter você como amigo e por todo o crescimento pessoal e acadêmico que compartilhamos ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos Dalila, Maria Isabel, Mariah, Nathan, Vinicius, Wellington, William e Zied. Ao longo dessa jornada em Bragança, vocês se tornaram minha família. Compartilhamos momentos inesquecíveis, vivências enriquecedoras, conversas profundas, risadas contagiantes e memórias preciosas. Sou imensamente grato por ter cada um de vocês ao meu lado. Agradeço por todo o carinho, companheirismo e conexão verdadeira que compartilhamos.

Um agradecimento especial ao meu avô Divino, que sempre foi um grande incentivador em minha trajetória acadêmica e infelizmente não pode assistir à finalização desta jornada. Sinto-me grato por todas as palavras encorajadoras, conselhos e pelo amor incondicional que ele dedicou a mim.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para toda a minha jornada acadêmica e para a realização deste trabalho.

Resumo

Este estudo tem como objetivo desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão para o planejamento agregado da produção em uma empresa de médio porte do setor automotivo em Portugal. A ferramenta consiste em um modelo de programação linear inteira (PLI) implementado no software CPLEX Studio, com o intuito de estimar os níveis ótimos de produção, estoque, carga e mão de obra, visando a minimização do custo total de produção em um horizonte de três meses. A validação do modelo foi realizada por meio de um estudo comparativo com um caso real de produção, além de testes de resposta em cenários específicos, o que resultou em estimativas eficientes e alinhadas aos objetivos da empresa. Diversos cenários foram simulados, destacando a eficácia do modelo na identificação de gargalos de produção, antecipação da produção para fazer face a uma maior demanda e ajuste de níveis de estoque de segurança. A ferramenta desenvolvida apresenta um grande potencial para melhorar significativamente o planejamento agregado da produção, permitindo decisões mais fundamentadas e estratégicas. Para obter o máximo proveito da ferramenta, é essencial manter os parâmetros de entrada atualizados e realizar análises periódicas, permitindo à empresa antecipar variações previstas na demanda e otimizar a alocação de recursos de forma eficiente e competitiva.

Palavras-chave: Ferramenta de apoio à decisão; Programação linear inteira; Otimização; Planejamento agregado.

Abstract

This study aims to develop a decision support tool for aggregate production planning in a medium-sized company in the automotive sector in Portugal. The tool consists of an integer linear programming model (ILP) implemented in the CPLEX Studio software, with the aim of estimating the optimal levels of production, inventory, load and labor, aiming to minimize the total cost of production in three months. The validation of the model was carried out through a comparative study with a real production case, in addition to response tests in specific scenarios, which resulted in efficient estimates aligned with the company's objectives. Several scenarios were simulated, highlighting the model's effectiveness in identifying production bottlenecks, anticipating production to meet greater demand and adjusting safety stock levels. The developed tool has a great potential to significantly improve aggregate production planning, allowing more informed and strategic decisions. To get the most out of the tool, it is essential to keep the input parameters up to date and carry out periodic analyses, allowing the company to anticipate expected variations in demand and optimize the allocation of resources efficiently and competitively.

Keywords: Decision support tool; Integer linear programming; Optimization; Aggregate planning.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos do estudo	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Estrutura da dissertação	3
2	Caracterização da empresa	4
3	Revisão da literatura	9
3.1	Planejamento e controle da produção	9
3.1.1	Planejamento de capacidade	13
3.1.2	Planejamento agregado	14
3.1.3	Plano mestre da produção	17
3.1.4	Programação da produção	18
3.2	Programação linear	19
4	Metodologia	21
4.1	Metodologia de pesquisa	21
4.2	Definição do problema	23
4.3	Estudo do sistema	24
4.4	Formulação do modelo matemático	26
4.4.1	Notação	26

4.4.2	Modelo matemático	28
4.4.3	Dados do modelo	33
5	Resultados e discussão	35
5.1	Validação do modelo	35
5.1.1	Comparação com um plano real de produção	36
5.1.2	Testes de resposta	39
5.2	Possíveis cenários	44
5.2.1	Análise do primeiro cenário	46
5.2.2	Análise do segundo cenário	49
5.2.3	Análise do terceiro cenário	51
6	Conclusões	54

Lista de Tabelas

3.1	Estudos que utilizam diferentes tipos de planejamento e métodos de otimização aplicados ao PCP.	13
4.2	Estatísticas dos parâmetros relacionados aos custos.	30
5.1	Comparação dos turnos necessários por diferentes planos.	37
5.2	Comparação entre os planos real, teórico e otimizado.	39
5.3	Resultados do primeiro teste de resposta.	41
5.4	Resultados do segundo teste de resposta.	42
5.5	Resultados do terceiro teste de resposta.	43
5.6	Resultados do quarto teste de resposta.	44
5.7	Dados de processamento.	46
5.8	Horizonte de planejamento.	46
5.9	Demanda real entre janeiro e março de 2023.	47
5.10	Resumo dos resultados do primeiro cenário.	49
5.11	Resumo dos resultados do segundo cenário.	51
5.12	Resumo dos resultados do terceiro cenário.	53

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de produtos finais.	5
2.2	Layout da empresa.	5
2.3	Fluxograma dos processos produtivos.	7
3.1	Atividade de planejamento e controle da produção.	10
3.2	Dimensões do planejamento e controle da produção.	12
3.3	Entradas e saídas típicas do Planejamento Agregado (PA).	16
3.4	Entradas e saídas típicas do Plano Mestre da Produção (PMP).	17
4.1	Metodologia da pesquisa operacional.	22
4.2	Dados de entrada e saída do modelo.	25
5.1	Nível de ocupação das máquinas para o primeiro cenário.	48
5.2	Nível de ocupação das máquinas para o segundo cenário.	50
5.3	Nível de ocupação das máquinas para o terceiro cenário.	52

Siglas

AG Algoritmos Genéticos. 17, 18

CP Controle da Produção. 10

GRG Gradiente Reduzido Generalizado. 14

PA Planejamento Agregado. xiv, 12, 14–18, 26

PC Planejamento de Capacidade. 13, 14

PCP Planejamento e Controle da Produção. 1–3, 9–14, 25

PL Programação Linear. 9, 15, 19

PLI Programação Linear Inteira. 2, 3, 20, 21, 26, 28, 30, 35, 44, 54

PLIM Programação Linear Inteira Mista. 16–20

PLIMD Programação Linear Inteira Mista Difusa. 18, 20

PMP Plano Mestre da Produção. xiv, 12, 17, 18, 26

PO Pesquisa Operacional. 1, 21

PP Planejamento da Produção. 2, 3, 8, 10, 15, 21, 24, 45, 48, 53–55

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, ocorreram grandes mudanças no mercado que transformaram a forma como as indústrias devem operar para se manterem competitivas. Há mudanças no gerenciamento, na tecnologia, na expectativa dos consumidores, na atitude dos fornecedores e na concorrência, entre outros aspectos (Metaxiotis, Askounis e Psarras 2001). Os esforços para aumentar a competitividade obrigaram as empresas a rever suas estratégias, resultando em decisões de curto a longo prazo que afetam toda a sua cadeia produtiva. Em termos de processos produtivos, essas decisões costumam incluir, por exemplo, a redução dos custos de produção e a busca por maior qualidade e produtividade.

Com isso, ao planejar a produção, os profissionais responsáveis pelos processos estão envolvidos em escolhas complexas entre diversas alternativas, na qual decisões devem ser tomadas levando em consideração muitas vezes objetivos divergentes (por exemplo, redução de estoque e aumento do nível de serviço oferecido aos clientes), assim como a presença de restrições financeiras, tecnológicas e de marketing. Nesse contexto, a Pesquisa Operacional (PO) tem se mostrado um mecanismo importante para auxiliar a tomada de decisão, especialmente no campo do Planejamento e Controle da Produção (PCP).

O presente trabalho é resultado de um estágio em uma empresa do setor automobilístico, especializada na produção de peças por estampagem a frio. Durante o estágio, foi identificado a necessidade de uma ferramenta que auxilie nas tomadas de decisão ao

Planejamento da Produção (PP) a curto e médio prazo, a fim de evitar problemas decorrentes da rápida expansão das atividades de produção, devido à crescente demanda do mercado externo.

A falta de uma ferramenta adequada expõe a empresa a problemas como atraso de entregas, capacidade e mão de obra insuficientes ou excessivas, além de dificuldades no controle de custos de produção e níveis de estoque. Diante dessa situação, torna-se evidente a necessidade de desenvolver um modelo de apoio à decisão que integre as estratégias da empresa com as atividades de produção.

Nesse sentido, é proposto o desenvolvimento de um modelo de otimização linear que possa auxiliar as tomadas de decisão do PP a curto e médio prazo, levando em consideração as necessidades específicas da empresa em estudo, assim como seu atual planejamento do processo produtivo.

1.1 Objetivos do estudo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma ferramenta que auxilie na tomada de decisões do PP a curto e médio prazo em uma empresa do ramo de estampagem.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Rever a literatura relacionada com o PCP mais relevante para o problema em estudo;
- Compreender os processos produtivos da empresa e as suas principais características;
- Compreender o processo atual de PP da empresa;
- Desenvolver um modelo de otimização que permita a análise de diversos cenários de produção e auxilie nas decisões do PP. Esse modelo utilizará o método de Programação Linear Inteira (PLI) com o intuito de minimizar os custos de produção em

um horizonte de tempo de curto e médio prazo. O foco principal será estimar os níveis de produção, estoque e carga em cada máquina, além de determinar a mão de obra necessária para atender à demanda planejada para o período em questão.

- Validar o modelo desenvolvido;
- Utilizar o modelo desenvolvido para teste de possíveis cenários de produção, a fim de demonstrar o uso da ferramenta pela empresa;

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em 6 capítulos, com conteúdos explicitados a seguir:

- O presente capítulo apresenta a introdução, os objetivos e a organização do trabalho.
- O capítulo 2 apresenta uma breve caracterização da empresa, a fim de visualizar algumas informações pertinentes para a elaboração do modelo.
- O capítulo 3 descreve a revisão da literatura, onde se faz uma breve introdução ao PCP, assim como as etapas nele presentes, discutindo estudos já existentes em cada uma delas e referindo os métodos de otimização utilizados. Além disso, será apresentado em detalhes o método de PLI, que será utilizado como base neste trabalho.
- O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta no trabalho, com a descrição do modelo desenvolvido para o PP, assim como dos dados de entrada e saída.
- O capítulo 5 descreve a validação do modelo desenvolvido e apresenta os resultados para os cenários de produção mais relevantes.
- E por fim, o capítulo 6 compreende as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Caracterização da empresa

Este capítulo apresenta a caracterização da empresa estudada, abrangendo sua posição no mercado, os produtos fabricados e suas instalações, bem como a descrição dos processos produtivos presentes.

A empresa em estudo se situa em Portugal, sendo uma empresa de média dimensão, com 78 colaboradores, na qual produz produtos (peças) por estampagem a frio para a indústria automotiva, principalmente produtos para incorporar em sistemas de escape. O portfólio da empresa conta com mais de 100 diferentes tipos de produtos finais, sendo alguns deles produzidos em mais de uma etapa de estampagem. A Figura 2.1 apresenta alguns exemplos de produtos fabricados na empresa pelo processo de estampagem.

O principal processo de fabricação que a empresa utiliza é o da estampagem a frio, que permite a transformação de chapas metálicas a uma temperatura ambiente, na qual é submetido uma força de compressão entre dois moldes (matrizes de estampagem) a fim de obter uma forma desejada.

A empresa possui um layout funcional, organizando as máquinas e respectivos processos em setores separados. Isso permite trabalhar com uma ampla variedade de produtos, pois cada um possui etapas e processos específicos, variando apenas a sequência de locais por onde os produtos precisam passar. A Figura 2.2 ilustra essa organização.

Para o processo de estampagem a frio, a empresa possui um total de 10 prensas hidráulicas (localizadas nas áreas em azul do layout): (i) Omera 300T; (ii) Rovetta 300T;



Figura 2.1: Exemplos de produtos finais.

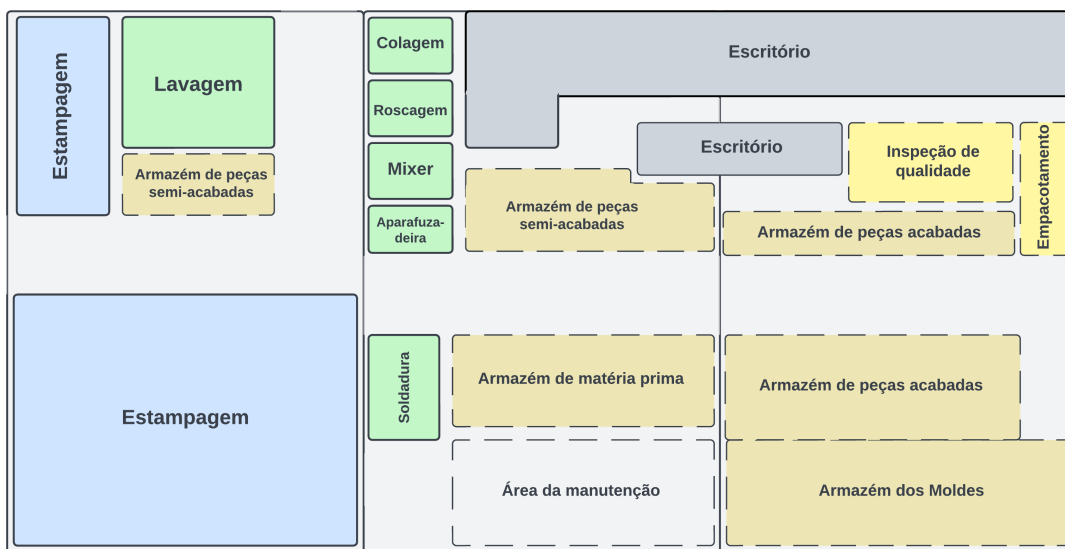


Figura 2.2: Layout da empresa.

(iii) Rovetta 500T; (iv) Gigant 315T; (v) Gigant 400T; (vi) Radaelli 250T; (vii) Radaelli 600T; (viii) Balconi 250T-6; (ix) Balconi 250T-7 e (x) Gadalbini 400T. Cada máquina pode produzir uma quantidade limitada do portfólio da empresa, sendo que alguns produtos podem ser fabricados em mais de uma máquina. Além das máquinas de estampagem, a empresa também possui outras que são responsáveis pelas demais etapas do processo de fabricação (localizadas nas áreas em verde do layout), sendo essas, 3 lavadoras, 3 soldadoras, 1 *mixer*, 1 aparafusadora, 1 rosqueadora e 1 máquina de colagem. A empresa possui um total de 20 máquinas em todo processo produtivo, sendo que cada máquina requer apenas um funcionário para operá-la.

O fluxograma apresentado na Figura 2.3 ilustra os processos produtivos da empresa. Além da sequência de atividades descritas, em cada etapa existe um plano de controle de qualidade, na qual os produtos são separados caso apresentem alguma não conformidade, sendo transformados em sucatas ou retrabalhados, dependendo do grau do problema apresentado. De modo geral, os processos produtivos de um produto passam por 4 fases distintas, sendo essas:

- (1) Controle da matéria-prima: nessa fase, é realizado o controle da quantidade e qualidade da matéria-prima, que consiste principalmente em chapas metálicas. É essencial garantir que a matéria-prima atenda aos requisitos especificados antes de prosseguir para as etapas seguintes;
- (2) Estampagem: essa fase representa o principal processo de fabricação da empresa e é onde os produtos adquirem sua forma final. Durante essa etapa, os produtos podem passar por várias prensas ao longo do ciclo de produção, sendo um ponto crítico que demanda atenção especial devido ao seu potencial de causar gargalos na produção;
- (3) Operações complementares: essa fase abrange os processos adicionais necessários para a finalização dos produtos, tais como: soldagem, lavagem, colagem, roscagem, entre outros apresentados no fluxograma. As operações complementares variam de acordo com as características e requisitos de cada produto.

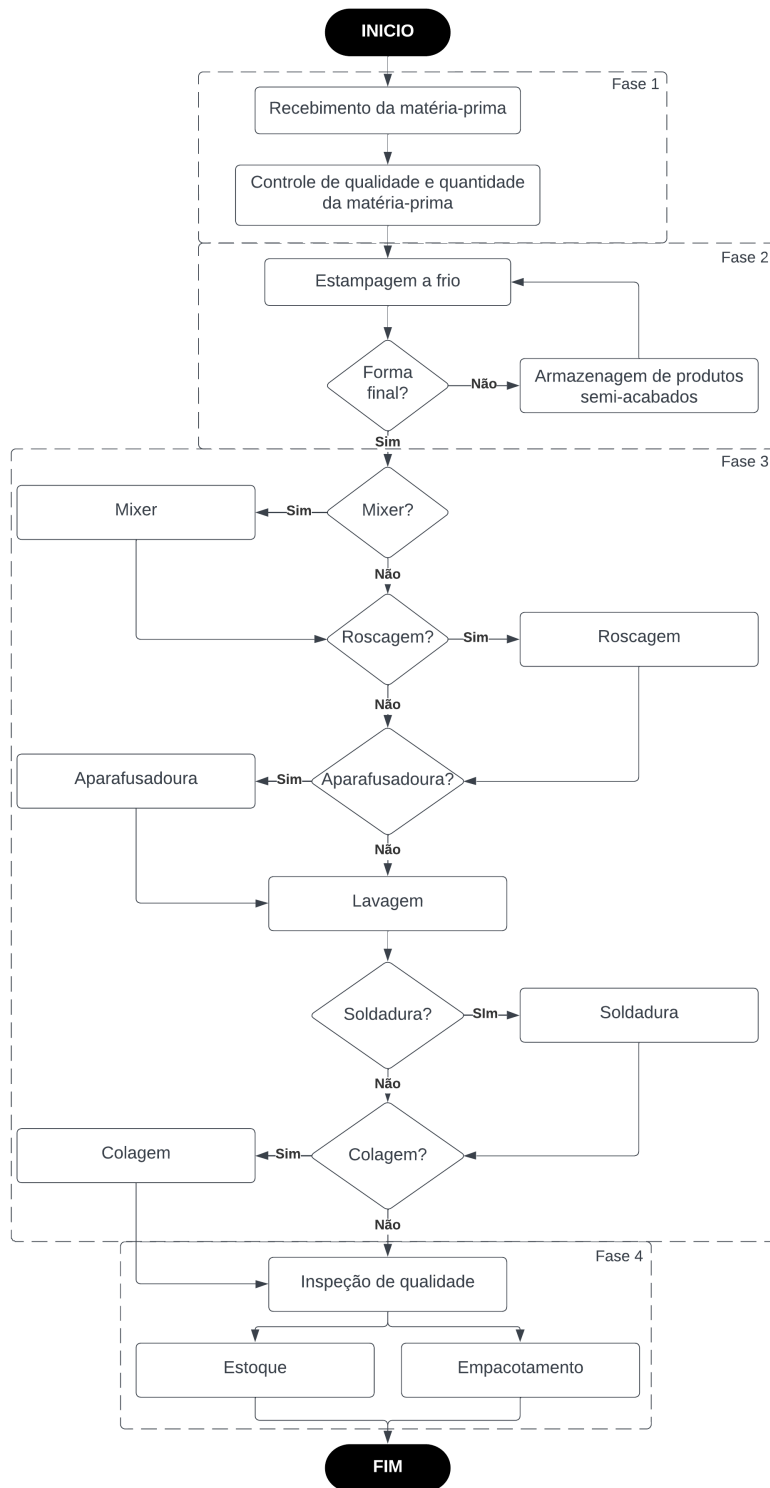


Figura 2.3: Fluxograma dos processos produtivos.

- (4) Finalização: nessa fase, os produtos são submetidos à inspeção de qualidade, onde são verificados diversos critérios para garantir sua conformidade. Após passarem pela inspeção e serem aprovados, são estocados ou empacotados para entrega ao cliente.

Todas as fases do processo produtivo são controladas e os dados (de custo, tempo de *setup*, produtividade e estoque) retirados são armazenados no sistema da empresa periodicamente.

Atualmente, a empresa não possui nenhuma ferramenta de otimização que auxilie no PP, sendo todo processo desenvolvido manualmente com o uso de planilhas do Excel, tornando-o trabalhoso e lento. As planilhas em questão foram desenvolvidas em colaboração com a empresa durante o período de estágio. Nesse processo manual, cada etapa de produção de um produto é planejado quanto à máquina a ser usada e à quantidade a ser produzida, permitindo determinar a carga da máquina e a mão de obra necessária, em um horizonte de planejamento que costuma ser de 1 a 2 meses.

No entanto, essa abordagem manual apresenta limitações. Alguns produtos podem ser fabricados em diferentes máquinas, e há outros fatores que podem impactar significativamente nos resultados, como o tempo de *setup*, estoque intermediário e os custos envolvidos no processo. Essas complexidades levam à necessidade de uma ferramenta de otimização que considere esses aspectos e possibilite a análise de diversos cenários de produção.

Para superar as desvantagens do atual processo de PP, pretende-se desenvolver uma ferramenta de otimização que possibilite a análise de diferentes cenários de produção, a fim de permitir a tomada de decisões no nível do PP, tornando o processo mais ágil e confiável. Essa ferramenta considerará um horizonte de planejamento de 3 meses, contribuindo assim para uma maior eficiência e eficácia da empresa, o que resultará em uma melhoria de sua competitividade.

Capítulo 3

Revisão da literatura

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos e estudos relacionados aos métodos utilizados para resolver problemas semelhantes ao problema descrito. Inicialmente, é apresentada uma introdução ao Planejamento e Controle da Produção (PCP), abordando as diferentes etapas presentes nesse processo. Em seguida, serão apresentados alguns estudos utilizados na indústria para planejar e programar as atividades de produção. Por fim, será descrita a técnica de otimização conhecida como Programação Linear (PL), que possui aplicação relevante nesse contexto.

3.1 Planejamento e controle da produção

O PCP, tem duas grandes atividades, como indica o próprio nome, o planejamento e o controle, que Slack, Chambers e Johnston (2009) definem da seguinte forma:

“Planejamento: é a formalização do que se pretende que aconteça em determinado momento no futuro. Embora os planos sejam baseados em expectativas, durante sua implementação os eventos nem sempre acontecem como esperado.”

“Controle: é o processo de lidar com as variações entre as ações planejadas e as ocorridas, retomando o caminho traçado, como solicitar manutenção, realocar pessoas ou realizar horas extras, entre outras medidas.”

O Planejamento da Produção (PP) e o Controle da Produção (CP) complementam-se para garantir a eficiência e eficácia da produção. O PP é responsável por estabelecer planos de médio a longo prazo, considerando aspectos como demanda, recursos disponíveis e capacidade de produção. Já o CP é responsável por estabelecer planos de curto prazo e tem a função de monitorar a produção em andamento, comparando os resultados com os planos estabelecidos pelo PP e tomando ações corretivas quando necessário. A combinação destas duas funções permite ajustes constantes na produção, assegurando que sejam atendidas as necessidades dos consumidores, com a utilização eficiente dos recursos e com o menor custo possível.

Conforme o horizonte de tempo varia, a importância de cada uma das funções aumenta ou diminui, mas ambas mantêm um papel fundamental no sucesso da produção (Slack, Chambers e Johnston 2009), o que pode ser melhor visualizado pela Figura 3.1. Como na prática administrativa, a definição clara das fronteiras de cada uma destas atividades é dificultada, a título didático elas são designadas como sendo uma única atividade, de PCP.

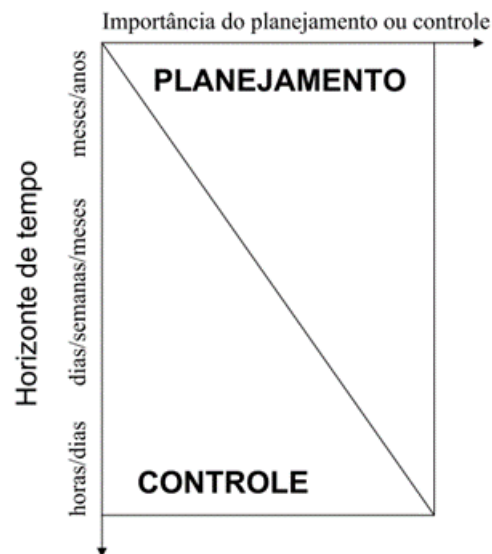


Figura 3.1: Atividade de planejamento e controle da produção.

Fonte: Slack, Chambers e Johnston (2009).

O PCP é responsável pelo gerenciamento integrado de todos os elementos envolvidos no processo produtivo, incluindo gestão de estoques, planejamento e alocação de recursos, tais como máquinas e pessoas, além de assegurar a comunicação e coordenação eficiente com fornecedores e clientes (Vollmann et al. 2004; Heizer e Render 2008).

Motta (1997), apresenta o PCP como uma função administrativa, que tem o propósito de criar os planos que vão guiar a produção e que servirão de orientação para seu controle, garantindo que a produção ocorra de forma eficaz e eficiente, gerando assim produtos e serviços que atendem as necessidades dos consumidores com o menor custo possível.

Slack, Chambers e Johnston (2009), acrescentam que programar e controlar a produção significa essencialmente adequar o fornecimento de produtos e serviços à demanda de pedidos, o que garante ao PCP a responsabilidade de fornecer auxílio e orientação para a execução de todas as atividades relacionadas à produção.

A implementação de um sistema de PCP pode envolver custos significativos tanto na fase inicial quanto durante as operações contínuas. Os custos iniciais abrangem a aquisição de um sistema de PCP disponível no mercado, bem como os gastos relacionados à implementação e ao treinamento dos funcionários. No que diz respeito aos custos operacionais contínuos, além das despesas regulares de manutenção, é necessário um número considerável de profissionais e recursos de suporte para manter as informações atualizadas (Vollmann et al. 2004).

Vollmann et al. (2004) destacam também que o sistema de PCP fornece as informações que devem apoiar os gestores na tomada de decisões eficazes, uma vez que não é o sistema quem toma decisões e gerencia as operações.

As atividades do PCP devem ser organizadas em três diferentes horizontes de planejamentos: longo prazo, médio prazo e curto prazo. Embora não seja uma norma, essa organização é amplamente adotada e reconhecida por diversos autores (Moreira 1996; Vollmann et al. 2004; Heizer e Render 2008). Os vários estudos da literatura (Gaither e Frazier 2001; Tubino 2007; Pedroso e Correa 1996; Moreira 1996; Vollmann et al. 2004; Heizer e Render 2008) utilizam denominações diferentes para cada horizonte, no entanto os conceitos bases da segmentação utilizados por esses autores são similares.

Verifica-se na literatura que a designação e o intervalo de tempo de cada atividade do PCP podem variar, mas de forma geral podem ser expressos de acordo com o esquema ilustrado na Figura 3.2.

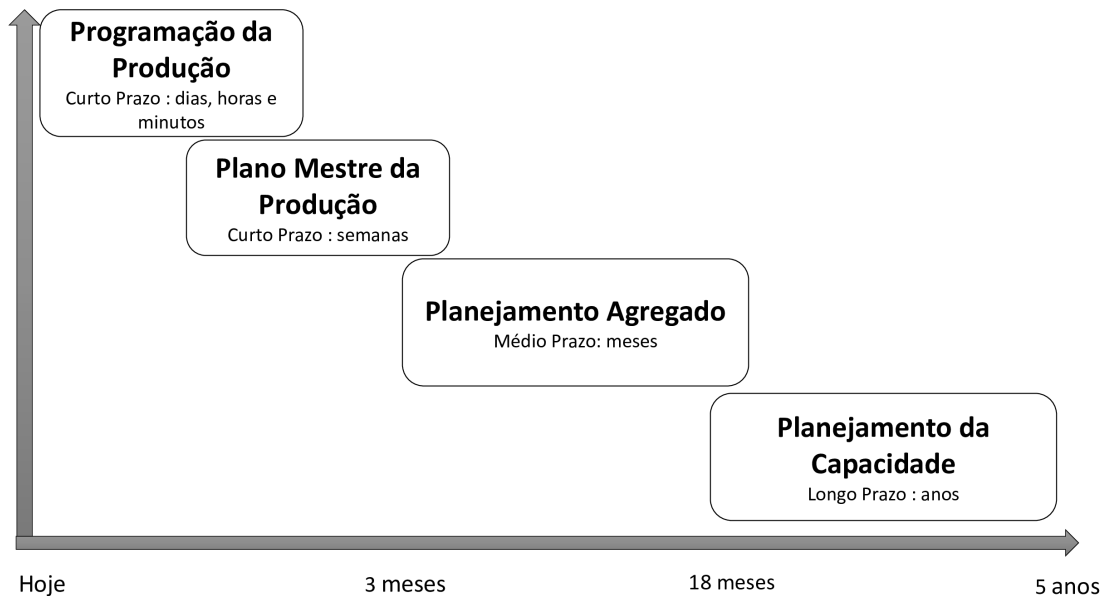


Figura 3.2: Dimensões do planejamento e controle da produção.

Fonte: adaptado de Vollmann et al. (2004) e Heizer e Render (2008).

Em alternativa, essa segmentação das atividades do PCP pode também ser classificada em três níveis hierárquicos, originalmente proposto por Anthony (1965), o nível estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo). Devido a complexidade do PCP, as várias etapas serão descritas, sendo que o PMP e o PA serão mais detalhados e explorados, uma vez que correspondem ao planejamento de curto e médio prazo.

Os métodos matemáticos são amplamente utilizados na resolução de problemas de PCP, incluindo a programação linear, programação dinâmica, algoritmos genéticos e métodos baseados em simulações (Lachtermacher 2009). Para implementar esses métodos, existem diversos softwares disponíveis, tais como o Microsoft Excel, Solver, Lingo, ILOG-CPLEX, entre outros (Hillier, Lieberman et al. 2006).

A seleção adequada do método e software é crucial para uma resolução eficaz dos

problemas de PCP. A Tabela 3.1 apresenta uma síntese dos estudos que abordam diferentes tipos de planejamento e métodos de otimização aplicados ao PCP, os quais serão discutidos ao longo deste capítulo.

Estudos	Tipo de planejamento	Método	Software
Almeida, Romanzini e Werner (2016)	Planejamento de Capacidade	GRG não linear	Microsoft® Excel
Filho, Cezarino e Ratto (2010)	Planejamento Agregado	PL	Microsoft® Excel/Solver
Omar e Teo (2007)	Planejamento Agregado	PLIM	LINGO 8.0
Sillekens, Koberstein e Suhl (2011)	Planejamento Agregado	PLIM	ILOG-CPLEX
Attia et al. (2016)	Planejamento Agregado	PLIM	ILOG-CPLEX
Al-Ashhab e Fadag (2018)	Plano Mestre de Produção	PLIM e AG	Xpress e Evolver
Lalami, Frein e Gayon (2015)	Plano Mestre de Produção	PLIM	ILOG-CPLEX
Mohamed Omar, Mohd-Jusoh e Mohd. Omar (2021)	Plano Mestre de Produção	PLIMD	LINGO 11.0
Y. Wu, Liu e C. Wu (2002)	Plano Mestre de Produção	AG	MS Win2K
Lee et al. (1996)	Programação da Produção	PLIM	GAMS/OSL

Tabela 3.1: Estudos que utilizam diferentes tipos de planejamento e métodos de otimização aplicados ao PCP.

3.1.1 Planejamento de capacidade

A longo prazo, o Planejamento de Capacidade (PC) é responsável por fornecer informações que auxiliam na tomada de decisões sobre a quantidade adequada de capacidade necessária para atender às demandas futuras do mercado. Essas decisões estabelecem os parâmetros dos quais a empresa responde às demandas atuais e gere as mudanças de curto prazo requeridas pelo cliente. Isso envolve considerações essenciais relacionadas a equipamentos, como a quantidade e capacidade dos equipamentos necessários para

atender à demanda projetada, edifícios, como o espaço físico necessário para abrigar a produção e o armazenamento de produtos, fornecedores, que devem ser selecionados e gerenciados para garantir a disponibilidade de matérias-primas e componentes, e outros recursos, como mão de obra qualificada e tecnologia adequada para suportar a capacidade planejada (Vollmann et al. 2004; Heizer e Render 2008).

Além disso, de acordo com Vollmann et al. (2004), é importante ter um planejamento eficiente da capacidade para garantir que a combinação correta de recursos, pessoas, tecnologia e localizações geográficas estejam disponíveis para atender às necessidades da empresa. Ter uma capacidade excessiva resulta em custos desnecessários, enquanto uma capacidade insuficiente pode prejudicar a entrega, causar problemas com estoques, frustrar colaboradores envolvidos na produção e prejudicar a credibilidade da empresa perante os clientes. O PC, geralmente, tem poucos detalhes e se concentra nas famílias de produtos agregadas em um horizonte temporal de, pelo menos, 18 meses.

Um exemplo de PC é o modelo apresentado por Almeida, Romanzini e Werner (2016), baseado em programação matemática, que utiliza algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não linear para auxiliar no planejamento da capacidade produtiva, na qual integra técnicas de previsão de demanda e conceitos de capacidade de produção, a fim de determinar o *mix* de produtos que otimiza a utilização da capacidade de produção disponível. O modelo permite o planejamento da capacidade produtiva a longo prazo, fornecendo informações que auxiliam a tomada de decisões na escolha de políticas de capacidade adequadas ao contexto no qual a organização está inserida.

3.1.2 Planejamento agregado

A médio prazo, a questão fundamental abordada pelo sistema PCP é alinhar a oferta com a demanda em termos de volume e *mix* de produtos em um horizonte de tempo que pode variar de 3 a 18 meses. O resultado final é chamado de Planejamento Agregado (PA). A função principal do PA é equilibrar a capacidade de produção com a demanda do mercado, maximizando a eficiência e minimizando os custos, ao mesmo tempo em que

atende aos objetivos e estratégias da organização. Para isso, combina opções de custo, capacidade e estoque de forma otimizada. Outra função é apoiar a gestão relativamente a informações aos clientes e fornecedores sobre os prazos de entrega (Vollmann et al. 2004).

No PA, os produtos são agrupados em categorias ou famílias, o que permite uma maior precisão na previsão da demanda agregada em comparação com a previsão feita para itens específicos. Normalmente, esses planos são atualizados periodicamente para considerar as previsões de pedidos atualizadas e outras mudanças, resultando em um horizonte de planejamento contínuo (Stevenson 2017).

Segundo Brocka e Brocka (1995), o PA pode ser bastante complexo em situações reais de negócio, por causa dos diversos fatores envolvidos e das incertezas do futuro (demanda, produtividade a ser alcançada etc.). Assim como, cada empresa apresenta um ambiente específico, principalmente no que se refere aos fatores internos e externos, o que influenciam no PP e conseqüentemente no PA. De acordo com Chase, Aquilano e Jacobs (1998), os fatores externos que podem influenciar o PP, são: a existência de matéria-prima, a demanda, as condições econômicas, o comportamento dos concorrentes e a capacidade externa (como a capacidade de subcontratação). No caso dos fatores internos, os autores citam: a mão de obra e a capacidade física atuais, os níveis de estoque e as atividades necessárias para produção.

Para Krajewski e Ritzman (1996), o PA tem seu foco em uma linha de ação, coerente com os objetivos estratégicos da organização, sem envolver detalhes específicos da produção. Os principais dados de entradas e saídas do PA podem ser resumidos na Figura 3.3.

Filho, Cezarino e Ratto (2010) por exemplo, apresentam um sistema de apoio à decisão, que utiliza um modelo baseado em PL, solucionado a partir da ferramenta Solver do Excel, com o objetivo de minimizar custos de produção para um horizonte de planejamento de 12 meses, no qual, administradores de pequenas empresas podem desenvolver planos ótimos e obter cenários que os auxiliam na tomada de decisão. A ferramenta é bastante flexível no sentido de permitir a manipulação dos dados e a comparação de cenários. É utilizado um planejamento estocástico, ou seja, um modelo no qual a demanda por produto é uma

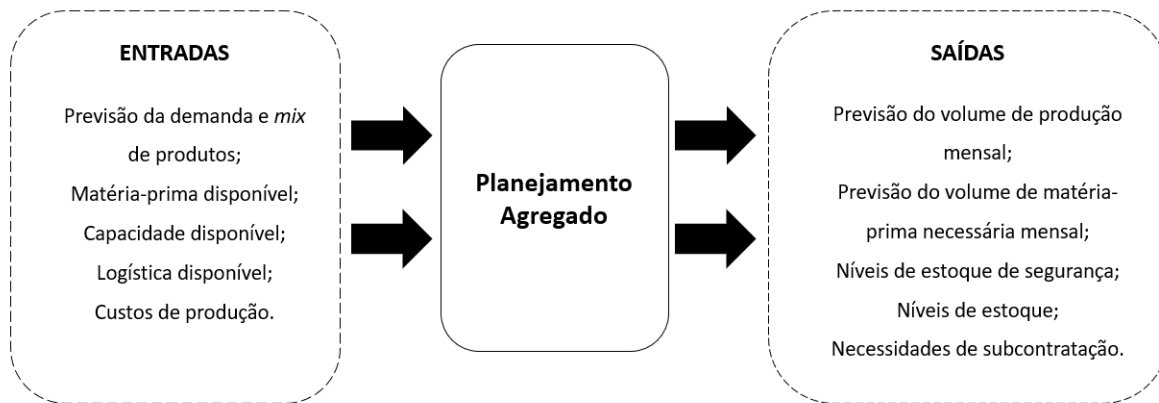


Figura 3.3: Entradas e saídas típicas do PA.

variável aleatória, com distribuição de probabilidade conhecida. Além disso, assume-se que a solução do modelo pode ser atualizada ao longo do tempo, a partir de intervenções do usuário.

Omar e Teo (2007), também propõem um modelo de PA, baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), com o objetivo de minimizar os custos de produção, estoque, pedidos pendentes e força de trabalho necessária. O modelo é resolvido a partir do software LINGO 8.0 e apresenta um horizonte de planejamento de 17 meses, os dados de demanda utilizados são agregados e determinísticos.

No estudo de Sillekens, Koberstein e Suhl (2011), apresentam um modelo que incorpora o planejamento de capacidade produtiva e a flexibilidade de mão de obra no setor automotivo. O objetivo desse modelo é minimizar os custos de produção, utilizando o método PLIM, o qual é resolvido pelo software ILOG-CPLEX.

Attia et al. (2016) também propõe um modelo de PA, que utiliza o método PLIM para minimizar o custo total de produção, incluindo os custos de manutenção de estoque, custos de produção regular, subcontratação, excesso e falta de capacidade, implementado com o software ILOG-CPLEX. A eficácia do modelo foi comprovada por meio de comparação com o método utilizado pela empresa, mostrando uma redução significativa nos custos de produção em 3 anos consecutivos, alcançando 5,43% de redução no primeiro ano, 2,66% no segundo e 1,86% no terceiro.

3.1.3 Plano mestre da produção

O Plano Mestre de Produção (PMP), também conhecido como programa mestre de produção ou planejamento mestre da produção, é uma representação das metas de produção da empresa, incluindo as especificações, quantidades e datas específicas dos produtos a serem fabricados (Heizer e Render 2008). Geralmente, o PMP é estruturado e executado semanalmente para operacionalizar os planos de produção.

Para Fernandes (2010), o PMP tem como objetivo estabelecer quais produtos serão fabricados em um determinado período de tempo e em que quantidades, sendo gerado a partir da desagregação do PA, da estimativa de demanda para os itens finais individuais ou então da carteira de pedidos. De acordo com o autor, o PMP tem a função de coordenar os recursos internos da empresa para fazer face à demanda do mercado, adequando a produção de produtos finais para atender aos pedidos. Os principais dados de entrada e saída de um PMP são apresentados na Figura 3.4.

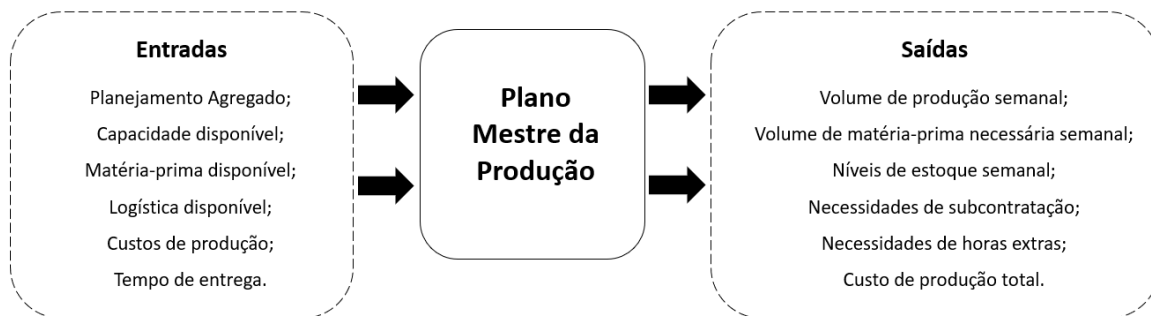


Figura 3.4: Entradas e saídas típicas do PMP.

Al-Ashhab e Fadag (2018), desenvolveram um modelo PMP para maximizar o lucro total, a fim de determinar o número ideal de lotes a serem produzidos em um horizonte de planejamento de 3 meses, assim como a logística ideal entre fornecedores e fábrica. O modelo é resolvido por dois métodos: (i) PLIM através software Xpress e (ii) Algoritmos Genéticos (AG) com o software Evolver. Os resultados dos dois modelos foram comparados para analisar o seu desempenho, verificando-se que ambos obtêm o mesmo valor ótimo da função objetivo, apresentando pequenas diferenças em algumas variáveis.

Lalami, Frein e Gayon (2015) apresentaram um modelo que utiliza o método PLIM para resolver múltiplos objetivos, que visa atender à demanda dos clientes, minimizar o estoque de segurança, equilibrar o nível de estoque e ajustar a carga de produção na indústria automotiva. A resolução desse modelo é realizada utilizando o software ILOG CPLEX e foi testado com dados reais da empresa, demonstrando resultados que atenderam às necessidades específicas do estudo.

Mohamed Omar, Mohd-Jusoh e Mohd. Omar (2021), propuseram um modelo de PMP que utiliza o método Programação Linear Inteira Mista Difusa (PLIMD), que é muito utilizado em abordagens que lidam com problemas com incerteza. O Modelo tem como objetivo minimizar os custos totais de produção, *setup*, estoque e pedidos pendentes em uma empresa que produz resinas. Este modelo foi implementado no software LINGO 11.0, sendo o Excel usado para exportar e importar dados. É realizada a desagregação dos dados do PA, depois para avaliar os benefícios da abordagem PLIMD, os autores comparam seus resultados com os obtidos por um modelo PLIM previamente relatado por Omar e Teo (2007). Ambos os modelos foram executados para um horizonte de planejamento de curto a médio prazo (6 meses) e os resultados foram comparados com os da empresa. Estes resultados, mostram que a abordagem PLIMD conseguiu reduzir ainda mais os custos de produção e estoque em comparação com a empresa, além de eliminar completamente os pedidos pendentes.

Y. Wu, Liu e C. Wu (2002), desenvolveram um modelo matemático para o PMP utilizando AG, o que permitiu incorporar várias técnicas para atender a restrições complexas e, assim, otimizar o PMP. O modelo é implementado utilizando linguagem de programação C e executado no sistema operacional MS Win2K.

3.1.4 Programação da produção

A programação da produção ocorre no curto prazo, logo após a definição do PMP. Essa programação é tipicamente elaborada em períodos diários. Nessa etapa, as ordens de

produção são atribuídas aos centros de trabalho e a sequência de processamento é determinada, estabelecendo as datas de início e término para cada ordem de produção (Heizer e Render 2008; Vollmann et al. 2004).

No âmbito desse contexto, um estudo sobre programação da produção é apresentado por Lee et al. (1996). Nesse estudo, é abordado o desafio da gestão de estoques em uma refinaria de petróleo, propondo um modelo baseado no método PLIM. O objetivo desse modelo é minimizar os custos de produção em um período de uma semana. Para ilustrar o potencial econômico e os benefícios da otimização, o modelo foi aplicado em quatro cenários distintos. A implementação do modelo foi realizada por meio do software GAMS/OSL.

É importante destacar que não foram consultados outros estudos sobre programação da produção, uma vez que o presente trabalho aborda um tipo de planejamento diferenciado, com períodos de tempo mais longos.

3.2 Programação linear

A PL é um método matemático de otimização altamente eficaz com grande aplicação na determinação da alocação ideal dos recursos de uma empresa para atingir um determinado objetivo. Reconhecido como um dos métodos de otimização mais utilizados, a PL é uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões estratégicas na gestão empresarial (Oladejo et al. 2019).

O modelo matemático de programação linear é composto por: (I) Variáveis de decisão, que refletem as decisões que precisam ser tomadas; (II) Função objetivo, que especifica o que se deseja maximizar ou minimizar; (III) Restrições funcionais, que limitam a solução a um determinado domínio de soluções admissíveis; e (IV) Restrições de sinal, que indicam a natureza dos valores das variáveis de decisão. A resolução do modelo matemático de programação linear permite determinar a solução ótima para o problema em estudo, em que a função objetivo e as restrições funcionais são lineares (Hillier, Lieberman et al. 2006).

As n variáveis de decisão representam a solução do modelo e podem ser escritas como X_1, X_2, \dots, X_n ($j=1, \dots, n$). Quando um problema de programação linear é modelado, o objetivo é calcular os valores ótimos de X_1, X_2, \dots, X_n que satisfaçam todas as restrições maximizando ou minimizando a função objetivo. Quando todas as variáveis de decisão estão sujeitas à condição de integralidade, ou seja, todas assumem números inteiros, estamos perante um modelo de PLI. No caso de apenas algumas dessas variáveis serem inteiras, trata-se de um modelo PLIM. Existem também variações desses modelos, como por exemplo, a PLIMD que é um modelo PLIM mas que incorpora a incerteza nos dados.

A função objetivo, representada pela expressão matemática (3.1), é uma forma geral que relaciona diretamente as variáveis de decisão, com o objetivo do modelo, denotado por Z , visando maximizar ou minimizar seu valor. Nessa expressão, as constantes conhecidas C_1, C_2, \dots, C_n determinam o peso ou importância atribuída a cada variável de decisão.

$$Z = X_1C_1 + X_2C_2 + \dots + X_nC_n \quad (3.1)$$

Quanto às restrições funcionais, tem como objetivo restringir os valores das variáveis de decisão com base em determinados critérios, limitando o conjunto de soluções admissíveis quando se maximiza ou minimiza Z . De forma genérica as restrições funcionais são apresentadas pelas expressões (3.2), onde B_i ($i = 1, \dots, u$) são constantes que representam as limitações de recursos ou condições específicas do problema e A_{ij} são coeficientes técnicos que descrevem a sua relação com as variáveis X_j .

$$\begin{aligned} X_1A_{11} + X_2A_{12} + \dots + X_nA_{1n} &\geq B_1 \\ X_1A_{21} + X_2A_{22} + \dots + X_nA_{2n} &\geq B_2 \\ &\vdots \\ X_1A_{u1} + X_2A_{u2} + \dots + X_nA_{un} &\geq B_u \end{aligned} \quad (3.2)$$

E por fim, as restrições de sinal existem para evitar que as variáveis de decisão tomem valores negativos, devendo ser no mínimo iguais a 0, ou seja, $X_j \geq 0$, ($j = 1, \dots, n$).

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo, o objetivo é apresentar os métodos utilizados para a criação da ferramenta que auxiliará no planejamento de curto e médio prazo da empresa em estudo. Inicialmente, é definido a metodologia de pesquisa adotada. Em seguida, será apresentado a definição do problema, juntamente com as entradas e saídas (parâmetros) necessárias para a construção do modelo. Por fim, é proposto um modelo de PLI, detalhando todos os métodos e técnicas utilizados durante o seu desenvolvimento.

4.1 Metodologia de pesquisa

Os problemas de otimização, como os encontrados no desenvolvimento de ferramentas para o PP, podem ser resolvidos pela PO. A Figura 4.1 apresenta o modelo adaptado de Winston (2022) que representa a metodologia da PO, a qual foi utilizada para o desenvolvimento desse estudo. Para Hillier, Lieberman et al. (2006), pode ser representada como uma abordagem científica à tomada de decisões que envolvem as operações de sistemas organizacionais. Para estes autores, a abordagem da PO é a do método científico.

A PO envolve diversas etapas que precisam ser bem compreendidas e executadas para garantir o sucesso do estudo. De acordo com Winston (2022), as principais etapas da PO incluem:

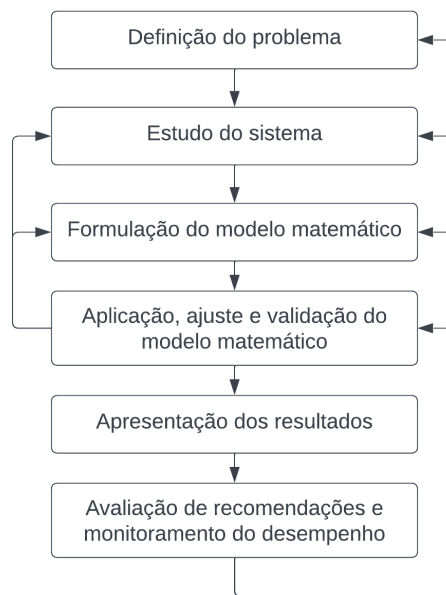


Figura 4.1: Metodologia da pesquisa operacional.

Fonte: Adaptada de Winston (2022).

- Etapa 1 - Definição do problema: nesta etapa, é necessário descrever claramente os objetivos do estudo e identificar as alternativas de decisão existentes. Isso permite que sejam estabelecidos os limites do problema e definido o âmbito da pesquisa.
- Etapa 2 - Estudo do sistema: nesta etapa, é essencial estimar os parâmetros que afetam o problema em estudo, identificando as limitações e exigências do sistema. Essa etapa possibilita que se tenha uma compreensão profunda do problema e do ambiente em que ele ocorre.
- Etapa 3 - Formulação do modelo matemático: a representação do sistema é realizada através do uso de equações e inequações matemáticas. Isso permite a formulação do problema em termos quantitativos, o que facilita a sua análise e solução.
- Etapa 4 - Aplicação, ajuste e validação do modelo matemático: nesta etapa, a formulação matemática permite obter a solução do problema. É importante verificar o grau de representação do modelo em relação ao sistema real. Se a representação

não for satisfatória, deve-se revisar a etapa anterior ou executar um estudo mais detalhado do sistema, a fim de validar uma solução viável que atenda aos objetivos da empresa.

- Etapa 5 - Apresentação dos resultados: a divulgação da solução do problema é importante para que as pessoas envolvidas possam ter uma compreensão clara da solução encontrada. Essa etapa também permite que outras pessoas possam aprender com o estudo realizado.
- Etapa 6 - Avaliação de recomendações e monitoramento do desempenho: a avaliação das recomendações e monitoramento do desempenho do modelo é crucial para garantir a sua eficácia a longo prazo. Caso o desempenho não seja adequado, pode ser necessário rever as etapas intermediárias ou redefinir o problema.

Por fim, ao final de todas estas etapas é realizado a implementação do modelo matemático. Neste capítulo, serão abordadas as três primeiras etapas, enquanto as demais serão apresentadas no capítulo seguinte.

4.2 Definição do problema

O problema em estudo, é decorrente da rápida expansão das atividades de produção da empresa, impulsionada pela crescente demanda do mercado externo. No entanto, apesar desse crescimento, a empresa não conta com uma ferramenta que possibilite uma gestão ágil e eficaz do planejamento da produção a curto e médio prazo. Essa falta de suporte pode comprometer a capacidade da empresa de alinhar suas estratégias com as atividades de produção, o que pode levar a atrasos nas entregas, falta ou excesso de capacidade e mão de obra, bem como dificuldades no controle dos custos de produção e dos níveis de estoque.

Além disso, é importante ressaltar que a produção de um produto envolve uma série de processos e etapas que ocorrem em diferentes máquinas. Para além disso, uma etapa de um produto pode ser fabricado em máquinas distintas, especialmente durante as etapas

relacionadas ao processo de estampagem da empresa. A ausência de uma ferramenta de otimização acaba restringindo a capacidade da empresa de aproveitar plenamente suas máquinas e recursos, uma vez que não há uma análise precisa e detalhada do PP.

A elaboração do PP é uma atividade crítica para a empresa, pois influencia a sua capacidade de responder às tendências do mercado e, conseqüentemente, a sua competitividade. Portanto, uma ferramenta eficiente, permite tomadas de decisão mais fundamentadas e assertivas.

Dessa forma, a ferramenta proposta para a resolução do problema, deve estimar os níveis de produção, inventário, carga e mão de obra necessária para atender à demanda planejada, de modo a minimizar o custo total de produção, em um horizonte de planejamento de curto e médio prazo, dividido em períodos mensais. O custo total é composto pelos custos de fabricação (horário normal e extraordinário), custos de estoque, assim como pelo custo do tempo de *setup*.

4.3 Estudo do sistema

Em situações que exigem tomada de decisão, o primeiro passo fundamental para entender a natureza do problema é identificar todos os fatores envolvidos, que fornecerão os elementos para análise e modelação. Ao construir um modelo de otimização, esses fatores podem se traduzir em variáveis de decisão e parâmetros.

Variáveis de decisão são aquelas cujo valor é desconhecido e que fornecem informações para a tomada de decisões. Já os parâmetros são conhecidos e permitem fornecer suporte para o cálculo das variáveis de decisão e estabelecer restrições para o sistema.

Uma vez que as principais etapas dos processos relacionados à manufatura são conhecidas (Figura 2.3), é possível identificar os fatores que exercem maior influência no sistema em estudo. Essa etapa foi realizada em colaboração com o responsável pela produção da empresa, resultando na definição de todos os fatores do sistema. Esses fatores foram traduzidos em variáveis (dados) de entrada e saída, que se resume na Figura 4.2 e constitui a base do modelo a construir.

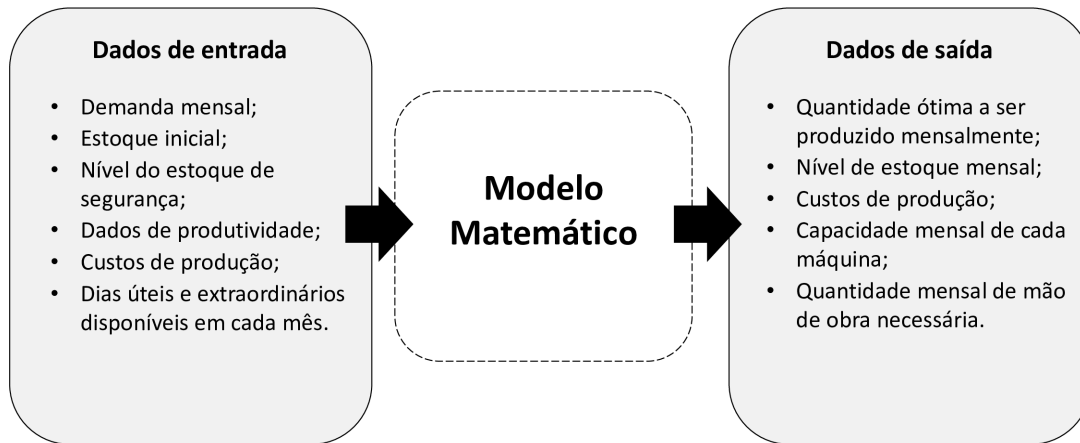


Figura 4.2: Dados de entrada e saída do modelo.

Desse modo, através dos fatores estabelecidos em conjunto com a empresa, propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático utilizando a técnica de otimização baseada em programação linear. Esse modelo deve contemplar um horizonte de planejamento de três meses, uma vez que há uma demanda prevista para esse período.

Além disso, o horizonte de planejamento de três meses também permite que a empresa tenha tempo útil para fazer as alterações necessárias, como por exemplo a contratação de mão de obra, produção de estoque, entre outras estratégias que exigem tempo para serem implementadas. Dessa forma, o modelo matemático proposto pode ser utilizado para avaliar diferentes cenários e determinar a melhor estratégia para lidar com as condições do mercado, garantindo a competitividade da empresa no longo prazo.

No entanto, é importante destacar que o planejamento deve ser contínuo e atualizado periodicamente, a fim de considerar quaisquer incertezas nos dados de entrada que possam surgir. Essa abordagem permitirá que o modelo seja ajustado em tempo hábil para lidar com mudanças na demanda, na disponibilidade de recursos ou em outras condições externas que possam afetar o processo de planejamento. Dessa forma, o modelo pode ser aprimorado e refinado ao longo do tempo, garantindo sua relevância e eficácia.

Ao realizar uma comparação com a literatura apresentada no capítulo anterior, torna-se desafiador determinar com precisão a dimensão específica em que o modelo de PCP se enquadra o sistema em estudo. Tanto o horizonte de tempo do planejamento quanto

os dados de entrada e saída definidos estão presentes de forma pontual tanto no PA, que abrange o médio prazo, quanto no PMP, que aborda o curto prazo. No entanto, considerando os objetivos do modelo proposto e os estudos semelhantes apresentados na literatura, o PA é a dimensão que mais se enquadra ao sistema em estudo.

4.4 Formulação do modelo matemático

Como já referido anteriormente, o modelo baseia-se na PLI como técnica de resolução, e tem como objetivo minimizar os custos totais com a produção, a fim de definir os níveis adequados de produção, inventário, carga e mão de obra.

4.4.1 Notação

Em seguida, apresenta-se a notação utilizada na formulação do modelo.

Índices

i	Nº de produtos	$(i = 1, \dots, N)$
j	Nº de etapas	$(j = 1, \dots, J)$
m	Nº de máquinas	$(m = 1, \dots, M)$
t	Nº de meses	$(t = 1, 2, 3)$

Variáveis de Decisão

Xn_{ijmt}	Quantidade do produto i da etapa j produzido na máquina m no mês t em horas normais [un.]
Xe_{ijmt}	Quantidade do produto i da etapa j produzido na máquina m no mês t em horas extraordinárias [un.]
ϕN_{ijmt}	Variável binária para troca de ferramenta do produto i da etapa j na máquina m no mês t no caso do tempo de <i>setup</i> ser efetuado em horas normais, onde 1 significa que existe troca de ferramenta e 0 que não existe

Variável binária para troca de ferramenta do produto i da etapa j na máquina m no mês t no caso do tempo de *setup* ser efetuado em horas extraordinárias, onde 1 significa que existe troca de ferramenta e 0 que não existe

Função Objetivo

CTP Custo total de produção [€]

Parâmetros

CFN_{ijm} Custo de fabricação unitário do produto i da etapa j na máquina m em horas normais [€/un.]

CFE_{ijm} Custo de fabricação unitário do produto i da etapa j na máquina m em horas extraordinária [€/un.]

CE_{ij} Custo mensal de armazenamento do estoque de uma unidade do produto i da etapa j [€/un.]

$CTSN$ Custo do tempo de *setup* ocorrido em horas normais [€/hora]

$CTSE$ Custo do tempo de *setup* em horas extras [€/hora]

D_{ijt} Demanda do produto i da etapa j no mês t [un.]

EI_{ijt} Estoque inicial do produto i da etapa j no mês t [un.]

ES_{ijt} Estoque de segurança do produto i da etapa j no mês t [un.]

TS_{ijm} Tempo de *setup* do produto i da etapa j na máquina m [horas]

P_{ijm} Tempo necessário para produzir uma unidade do produto i da etapa j na máquina m [horas]

TDN_t Tempo disponível normal no mês t [horas]

TDE_t Tempo disponível extraordinário no mês t [horas]

δ_{ijm} Parâmetro binário que define a máquina m em que a etapa j do produto i pode ser fabricado. Quando $\delta_{ijm} = 1$, o produto pode ser produzido na máquina; caso contrário, quando $\delta_{ijm} = 0$, o produto não pode ser produzido.

Os índices i e j variam de acordo com as quantidades mensais a serem produzidos de acordo com a demanda, enquanto o índice m varia de 1 a M , representando o número de máquinas envolvidas nos processos produtivos da empresa. Por fim, o índice t varia de 1 a 3 meses, indicando o horizonte de planejamento do modelo.

4.4.2 Modelo matemático

Nesta seção apresenta-se a formulação do modelo PLI de otimização definido por (4.1).

Minimizar

$$\begin{aligned}
CTP = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^3 (CFN_{ijm} \cdot Xn_{ijmt}) + (CFE_{ijm} \cdot Xe_{ijmt}) \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^3 CE_{ij} \cdot \left(\sum_{m=1}^M (Xn_{ijmt} + Xe_{ijmt}) \right) + EI_{ijt} - D_{ijt} \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^3 TS_{ijm} \cdot \phi N_{ijmt} \cdot CTSN \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^3 TS_{ijm} \cdot \phi E_{ijmt} \cdot CTSE
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Sujeito a

$$\begin{aligned}
\sum_{m=1}^M (Xn_{ijmt} + Xe_{ijmt}) & \geq D_{ijt} + ES_{ijt} - EI_{ijt} \quad i = \{1, \dots, N\}, j = \{1, \dots, J\}, \\
t & = \{1, 2, 3\}
\end{aligned} \tag{R1}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J (P_{ijm} \cdot Xn_{ijmt}) + (TS_{ijm} \cdot \phi N_{ijmt}) & \leq TDN_t \quad m = \{1, 2, \dots, 20\}, \\
t & = \{1, 2, 3\}
\end{aligned} \tag{R2}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J (P_{ijm} \cdot Xe_{ijmt}) + (TS_{ijm} \cdot \phi E_{ijmt}) & \leq TDE_t \quad m = \{1, 2, \dots, 20\}, \\
t & = \{1, 2, 3\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Xn_{ijmt} \cdot (1 - \delta_{ijm}) & = 0 \quad i = \{1, \dots, N\}, j = \{1, \dots, J\}, \\
& m = \{1, 2, \dots, 20\}, t = \{1, 2, 3\} \\
Xe_{ijmt} \cdot (1 - \delta_{ijm}) & = 0 \quad i = \{1, \dots, N\}, j = \{1, \dots, J\}, \\
& m = \{1, 2, \dots, 20\}, t = \{1, 2, 3\}
\end{aligned} \tag{R3}$$

$$\begin{aligned}
Xn_{ijmt} &\leq \left(\frac{1}{P_{ijt}} \cdot TDN_t \cdot \phi N_{ijmt}\right) & i = \{1, \dots, N\}, j = \{1, \dots, J\}, \\
& & m = \{1, 2, \dots, 20\}, t = \{1, 2, 3\} \\
Xe_{ijmt} &\leq \left(\frac{1}{P_{ijt}} \cdot TDE_t \cdot \phi E_{ijmt}\right) & i = \{1, \dots, N\}, j = \{1, \dots, J\}, \\
& & m = \{1, 2, \dots, 20\}, t = \{1, 2, 3\}
\end{aligned} \tag{R4}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{m=1}^M (Xn_{ijmt} + Xe_{ijmt}) &\leq \sum_{m=1}^M (Xn_{i(j-1)mt} + Xe_{i(j-1)mt}) & i = \{1, \dots, N\}, \\
& & j = \{2, \dots, J\}, \\
& & t = \{1, 2, 3\}
\end{aligned} \tag{R5}$$

$$\begin{aligned}
Xn_{ijmt} &\in \mathbb{Z}^+ \\
Xe_{ijmt} &\in \mathbb{Z}^+
\end{aligned} \tag{R6}$$

$$\begin{aligned}
\phi N_{ijmt} &= \{1, 0\} \\
\phi E_{ijmt} &= \{1, 0\}
\end{aligned} \tag{R7}$$

Variáveis de Decisão

Para garantir que as máquinas da empresa em estudo sejam utilizadas de forma eficiente, é preciso considerar dois tipos de variáveis de decisão principais: (i) as quantidades de produtos a serem produzidas (Xn_{ijmt} e Xe_{ijmt}) e (ii) as variáveis que denotam o tempo necessário para as trocas de ferramentas (ϕN_{ijmt} e ϕE_{ijmt}). No entanto, o tempo de produção é dividido entre horas normais e extraordinárias, o que resulta em quatro tipos de variáveis distintas. O modelo de otimização proposto (4.1) utiliza as seguintes variáveis de decisão: Xn_{ijmt} representa a quantidade do produto i na etapa j produzida na máquina m durante o mês t em horas normais, enquanto Xe_{ijmt} representa a quantidade produzida em horas extraordinárias. Adicionalmente, as variáveis binárias ϕN_{ijmt} e ϕE_{ijmt} indicam se ocorrem ou não as trocas de ferramentas para o produto i na etapa j na máquina m durante o mês t , respectivamente para horas normais e extraordinárias. Com essas variáveis, é possível formular um modelo matemático eficiente para otimizar o planejamento da produção, levando em consideração as limitações de capacidade das máquinas.

A quantidade de produtos a serem produzidos, representada por Xn_{ijmt} e Xe_{ijmt} , é sempre um número inteiro. Essa restrição é expressa no modelo (4.1) por meio da expressão (R6). Portanto, o modelo matemático (4.1) é classificado como PLI, devido a essa característica.

Função objetivo

Dentro de um contexto competitivo, a empresa busca sempre atender à demanda do cliente, minimizando os custos associados ao processo de fabricação e garantindo a utilização apenas dos recursos necessários. A função objetivo do modelo de otimização (4.1) tem como finalidade minimizar o CTP, que é composto por três componentes principais (parâmetros de custos): (i) o custo de fabricação (CFN_{ijm} e CFE_{ijm}), dado em €/un., (ii) o custo de estoque (CE_{ij}), também dado em €/un., e (iii) o custo do tempo de *setup* (CTSN e CTSE), em €/hora. A Tabela 4.2 apresenta as estatísticas sobre esses parâmetros de custos.

Parâmetros	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Un.
CFN_{ijm}	3,21	0,05	1,29	0,93	€/un
CFE_{ijm}	4,34	0,08	1,77	1,24	€/un
CE_{ij}	0,08	0,01	0,039	0,019	€/un
CTSN	22	22	22	-	€/hora
CTSE	38	38	38	-	€/hora

Tabela 4.2: Estatísticas dos parâmetros relacionados aos custos.

O custo de fabricação de uma unidade do produto i na etapa j em horas normais e extraordinárias, representado por CFN_{ijm} e CFE_{ijm} , respectivamente, inclui os custos de operação com as máquinas, aquisição de matéria-prima e mão de obra. Vale ressaltar que o valor de fabricação para cada produto i na etapa j fabricado em várias máquinas provavelmente será diferente para cada uma delas. Esse valor tende a aumentar diretamente com base na potência da máquina utilizada para fabricar determinado produto. Por exemplo, com relação ao processo de estampagem, se um produto pode ser fabricado nas máquinas Balconi I (250 toneladas), Balconi II (250 toneladas) e Radaelli (600 toneladas), é esperado um valor igual para as duas primeiras máquinas e um valor consideravelmente

maior para a última. Essa diferenciação nos custos por máquina permite uma alocação eficiente dos produtos, de modo a minimizar o CTP. Isso implica que o modelo (4.1) pode identificar a combinação economicamente ideal entre os produtos a serem fabricados e as máquinas a serem utilizadas.

O custo de manutenção de estoque, representado por CE_{ij} , é o valor estimado para cada unidade excedente do produto i na etapa j armazenado pela empresa. Como as peças de metal estampadas a frio não requerem cuidados especiais além de estarem armazenadas adequadamente e do pagamento dos funcionários envolvidos no processo, o principal impacto do estoque é o custo de oportunidade, ou seja, o fato de que os recursos financeiros empregados poderiam ser utilizados em alternativas mais rentáveis para a empresa. Para cada produto i na etapa j , o valor de CE_{ij} é calculado com base em seu volume. É estimado um valor útil para o metro cúbico disponível no armazém, que é obtido pela soma de todos os custos envolvidos no armazenamento dos produtos, divididos pelo volume útil do depósito. A partir dessa informação, é possível estimar o custo unitário do estoque (CE_{ij}) de cada produto em cada etapa com base em seu volume.

Por fim, o CTSN e o CTSE representam os custos em €/hora relacionados com o tempo de preparação da ferramenta necessária para fabricar um produto i na etapa j durante horas normais e extraordinárias, respectivamente. Esse tempo de preparação inclui tanto os custos das máquinas paradas quanto os custos da mão de obra necessários para ajustar as ferramentas. Para estimar esses valores, foi considerado o custo médio por hora das máquinas paradas, somado ao valor por hora de um operador. O tempo necessário para preparar cada ferramenta varia, geralmente de trinta minutos a duas horas, o que depende do tipo de produto, máquina e experiência do operador. Como a empresa produz diversos tipos de produtos mensalmente, é necessário trocar de ferramenta muitas vezes. Se esse tempo não for administrado de forma eficiente, pode resultar em custos desnecessários.

Restrições

Para modelar com maior precisão o processo produtivo da empresa, são consideradas seis restrições: (i) a quantidade mínima a ser produzida para satisfazer a demanda (R1), (ii)

a disponibilidade da máquina (R2), (iii) a alocação específica das máquinas para cada etapa do produto (R3), (iv) a dependência entre produção e preparação de ferramentas (tempo de *setup*) (R4), (v) o sequenciamento de produção (R5), (vi) a restrição de não-negatividade e inteirabilidade (R6) e (vii) a exigência de que a variável que denota a ocorrência ou não-ocorrência da troca de ferramentas seja um valor binário (R7). Essas restrições refletem com mais fidelidade as características e limitações do processo produtivo, permitindo que o modelo de otimização (4.1) seja mais efetivo na busca pela solução ótima.

A restrição R1 determina a quantidade mínima a ser produzida mensalmente, levando em conta o nível de estoque de segurança (ES_{ijt}), a demanda (D_{ijt}) e o estoque inicial do mês (EI_{ijt}). É importante destacar que o estoque inicial da etapa j do produto i no primeiro mês (EI_{ij1}) é um valor de entrada (parâmetro). Nos demais meses, o estoque inicial é calculado como $EI_{ijt} = EI_{ij(t-1)} + Xn_{imj(t-1)} + Xe_{imj(t-1)} - D_{ij(t-1)}$. Para lidar com possíveis flutuações de mercado ou imprevistos, a empresa mantém um nível de estoque de segurança (ES_{ijt}).

A restrição R2 garante que o tempo total disponível para produção seja suficiente para cobrir todas as unidades de produtos que serão fabricadas, assim como o tempo para trocas de ferramentas e preparação. Na prática, é necessário saber o número de dias em horário normal e extraordinário disponíveis por mês, assim como as horas produtivas por turno, para que se possa calcular quantas horas de trabalho a máquina será capaz de operar ao longo do horizonte de planejamento. Com base no tempo médio necessário para produzir uma unidade de cada produto (P_{ijm}) e na ocorrência ou não da troca de ferramentas (ϕN_{ijmt} e ϕE_{ijmt}). Essas horas de trabalho disponíveis afetam o limite superior no número total de produtos que podem ser fabricados em horas normais e extraordinárias. Dessa forma, a restrição R2 limita a quantidade de produtos produzidos em cada período de tempo para garantir que o processo de produção seja eficiente e viável.

A restrição R3 é responsável por determinar quais máquinas podem produzir cada etapa j do produto i . Quando o parâmetro binário δ_{ijm} é igual a 1, a etapa do produto pode ser fabricado na máquina, pois Xn_{ijmt} e Xe_{ijmt} podem assumir valores diferentes

de zero, que o resultado da equação ainda será satisfeito. No entanto, se δ_{ijm} é igual a 0, Xn_{ijmt} e Xe_{ijmt} precisam ser iguais a zero para cumprir com o resultado da equação, o que significa que a etapa j do produto i não pode ser produzida naquela máquina. Essa restrição garante que o modelo (4.1) não crie produção de uma etapa de um produto em uma máquina que não seja capaz de fabricar essa etapa.

A restrição R4 é responsável por garantir que uma troca de ferramenta seja realizada toda vez que um produto i na etapa j é fabricado em horário normal (1ª expressão) ou extraordinário (2ª expressão). A expressão $(1/P_{ijt} \cdot TDN_t)$ define o número de unidades que seriam produzidas se apenas o produto i na etapa j fosse fabricado durante o mês t em horas normais. Observa-se em (R4) que, como esse valor é sempre maior que 0, sempre que Xn_{ijmt} for maior que 0, ϕN_{ijmt} é igual a 1. Se Xn_{ijmt} for igual a 0, ϕN_{ijmt} pode ser igual a 0 ou 1 matematicamente, e a restrição R4 ainda será satisfeita. No entanto, nesse último caso, o termo de custo do tempo de *setup* incluído na minimização da função objetivo (*CTSN*) implica sempre que ϕN_{ijmt} seja igual a 0 indiretamente. O mesmo ocorre no caso da restrição relativa ao horário extraordinário.

A restrição de sequenciamento da produção (R5) tem como objetivo evitar a fabricação da etapa j de um produto i sem a disponibilidade da etapa anterior ($j - 1$) desse produto. Essa restrição garante que a produção de um produto i na etapa 2 só seja viável se houver disponibilidade suficiente dos produtos i na etapa 1, seja através de estoque ou da produção realizada no mesmo mês. Dessa forma, essa restrição assegura que o fluxo de produção seja sequencial e que as etapas anteriores sejam concluídas antes que as etapas subsequentes possam ser iniciadas.

4.4.3 Dados do modelo

Os dados utilizados para testar e validar o modelo (4.1) estão diretamente relacionados com os produtos, máquinas e estoque da empresa, tal como se apresenta na Tabela 4.2. Esses dados são considerados parâmetros, pois são conhecidos e definidos desde o início do processo de modelagem, o que garante que não haja incertezas na análise.

A empresa utiliza frequentemente planilhas do Excel contendo todos os dados relacionados com as máquinas. A partir destes documentos, foi possível obter informações sobre os produtos, incluindo os seus custos de fabricação (CFN_{ijm} e CFE_{ijm}), assim como os custos de tempo de *setup* (CTSN e CTSE). No entanto, é importante destacar que os preços das matérias-primas podem sofrer flutuações constantes, o que pode afetar os custos de fabricação dos produtos. Por isso, é necessário atualizar regularmente os valores do banco de dados para garantir a precisão do modelo (4.1) e tomar decisões mais acertadas.

Como a empresa já utiliza o software Excel diariamente, e de forma a facilitar o processo de aprendizagem e domínio da ferramenta, optou-se por se fazer o uso desse software. No entanto, ao implementar o modelo de otimização (4.1), foi necessário recorrer a uma solução mais robusta e eficiente, já que a ferramenta Solver do Excel apresenta limitações quanto ao número de variáveis e restrições.

Por essa razão, optou-se por utilizar o software CPLEX Studio IDE 22.1.0 para a resolução do modelo de otimização. A planilha do Excel é usada para armazenar os dados, que são importados para o modelo (4.1) no CPLEX. Depois que o modelo é resolvido, os resultados são exportados para a planilha do Excel, onde são tratados para análise posterior.

Essa abordagem permite que a empresa aproveite a facilidade de uso do Excel para gerenciar seus dados, enquanto utiliza um software mais potente para resolver o modelo (4.1) de otimização. Além disso, a conexão entre a planilha do Excel e o CPLEX permite uma integração entre a gestão de dados e o processo de otimização, o que pode facilitar a introdução e a atualização dos parâmetros, como também a análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5

Resultados e discussão

Este capítulo apresenta uma análise detalhada dos resultados obtidos no modelo de PLI (4.1), enfatizando tanto os aspectos positivos quanto as limitações identificadas. Inicialmente, é realizada a validação do modelo (4.1), que compreende uma comparação com um caso real e a realização de quatro testes de resposta. Em seguida, são explorados e discutidos diferentes cenários para demonstrar como a ferramenta pode ser utilizada pela empresa para determinar a melhor estratégia em cada um deles, fornecendo uma visão abrangente de suas implicações e considerações relevantes.

5.1 Validação do modelo

O modelo de PLI (4.1) passou por duas etapas de validação. Na primeira etapa, foi realizado uma comparação entre um caso real de produção executado pela empresa e um plano sugerido pelo modelo. Isso foi elaborado para demonstrar que a ferramenta é capaz de fornecer uma visão otimizada e viável. Na segunda etapa, foram realizados quatro testes de resposta em cenários específicos, com previsão de resultados, para verificar o comportamento da ferramenta ao se realizar alterações nos parâmetros. Esses testes confirmam que o modelo PLI (4.1) foi formulado corretamente.

5.1.1 Comparação com um plano real de produção

Ao realizar o planejamento do modelo (4.1), o objetivo é abranger um horizonte de 3 meses, sendo necessário decidir sobre a quantidade a produzir de cada etapa para cada produto a fim de satisfazer a demanda. No entanto, a empresa não dispõe de alguns dados fundamentais para uma comparação precisa nesse horizonte de planejamento, como por exemplo: estoque de produtos em etapas intermediárias, informações de produtividade de determinadas etapas de alguns produtos em máquinas específicas e custos detalhados de cada fase de produção em cada máquina de alguns produtos, que são dados de entrada e podem impactar significativamente nos resultados. Para ultrapassar estas dificuldades, a comparação foi efetuada a partir de uma amostragem de produtos menor, utilizando um horizonte de planejamento de 5 dias, o que possibilita um controle maior dos dados de entrada.

Os dados utilizados para validar o modelo de otimização (4.1) foram coletados durante o período de 20 a 24 de fevereiro de 2023, no qual foram produzidos nove tipos de produtos distintos durante as horas normais de trabalho. Cada produto apresentou suas respectivas etapas de produção e demandas específicas (D_{ijt}), conforme detalhado na Tabela 5.1. A empresa operou em 3 turnos diários, com aproximadamente 7,33 horas cada. Para adaptar o modelo (4.1) à situação real, os parâmetros de estoque inicial (EI_{ijt}) e estoque de segurança (ES_{ijt}) foram ambos definidos como zero. Além disso, para conferir ao modelo (4.1) um horizonte de 5 dias úteis, o valor do tempo disponível normal (TDN_1) foi calculado como sendo igual a (quantidade de turnos diários) x (horas por turno) x (dias úteis) = $3 \times 7,33 \times 5 = 109,99$ horas, enquanto os valores de TDN_2 e TDN_3 foram definidos como zero.

A Tabela 5.1 apresenta três tipos de planos: (i) teórico, (ii) real e (iii) otimizado. Os números de turnos referentes aos planos teórico e real, levam em consideração as máquinas listadas na 4ª coluna, que foram escolhidas pela empresa para a fabricação dos 9 tipos de produtos. Os valores teóricos foram calculados com base em dados de produtividade e no tempo de *setup* previamente registrados no banco de dados da empresa, já os valores

Produto	Etapa	D_{ijt}	Máquinas (Real)	N.º de turnos necessários			Máquinas (Otimizado)
				Teórico	Real	Otimizado	
1	1	2011	Balconi 250T-7	0,53	0,50	0,68	Balconi 250T-6
1	2		Omera 300T	1,38	2,00	1,47	Balconi 250T-6
1	3		Balconi 250T-6	1,46	2,00	1,46	Balconi 250T-6
1	4		Lavadora - 1	0,13	0,13	0,13	Lavadora - 1
2	1	2251	Balconi 250T-7	0,91	1,00	0,91	Balconi 250T-7
2	2		Gigant 400T	3,97	4,00	3,97	Gigant 400T
2	3		Omera 300T	2,30	3,50	2,30	Omera 300T
2	4		Lavadora - 1	0,34	0,34	0,34	Lavadora - 1
3	1	3000	Rovetta 300T	0,66	2,50	0,66	Rovetta 300T
3	2		Omera 300T	2,74	3,50	2,74	Omera 300T
3	3		Lavadora - 2	0,58	0,58	0,58	Lavadora - 2
4	1	12000	Rovetta 500T	2,34	3,00	2,34	Rovetta 500T
4	2		Lavadora - 1	0,86	0,86	0,86	Lavadora - 1
5	1	6000	Radaelli 600T	1,41	2,00	1,47	Balconi 250T-6
5	2		Omera 300T	1,98	4,00	1,98	Omera 300T
5	3		Lavadora - 1	0,82	0,82	0,82	Lavadora - 1
6	1	20000	Rovetta 300T	2,36	2,50	2,36	Rovetta 300T
6	2		Lavadora - 2	1,39	1,39	1,39	Lavadora - 2
6	3		Soldadora - 1	5,31	5,00	5,31	Soldadora - 1
7	1	50000	Balconi 250T-7	2,37	3,00	2,37	Balconi 250T-7
7	2		Rosqueadora	22,73	17,00	22,73	Rosqueadora
7	3		Lavadora - 1	0,25	0,25	0,25	Lavadora - 1
8	1	3000	Rovetta 300T	0,66	1,00	0,66	Rovetta 300T
8	2		Gigant 400T	1,80	2,50	1,80	Gigant 400T
8	3		Rovetta 500T	3,21	4,00	3,21	Rovetta 500T
8	4		Lavadora - 2	0,58	0,58	0,58	Lavadora - 2
9	1	4000	Radaelli 600T	1,16	1,50	1,32	Omera 300T
9	2		Omera 300T	1,84	2,50	1,84	Omera 300T
9	3		Lavadora - 1	0,39	0,39	0,39	Lavadora - 1

Tabela 5.1: Comparação dos turnos necessários por diferentes planos.

reais foram mensurados durante a fabricação. Comparando os dois planos (teórico e real), percebe-se que, em sua maioria, os números de turnos reais são maiores do que os teóricos para cada produto. Isso ocorre pois os tempos reais refletem as paragens das máquinas, sejam por falhas ou necessidade de manutenção. Além disso, é importante levar em conta que o fator humano, como a habilidade e a produtividade dos trabalhadores, também podem influenciar nos tempos reais de produção. Portanto, é importante que a empresa monitore constantemente os tempos de produção reais e tome medidas para minimizar os tempos imprevistos de paragem de forma a aumentar a eficiência homem/máquina, a fim de melhorar a produtividade do processo.

As duas últimas colunas da Tabela 5.1 correspondem ao plano otimizado, que é gerado a partir do modelo de otimização (4.1). Embora o número de turnos necessários para produzir cada um dos nove tipos de produtos em horas normais não seja uma saída direta do modelo, esse valor pode ser obtido com base nos dados de produtividade e tempo de *setup* de cada máquina designada para cada etapa de produção de cada produto.

O modelo de otimização (4.1) tem como objetivo minimizar os custos totais de produção, levando em consideração todas as máquinas disponíveis para cada etapa de cada produto. O plano ótimo proposto pelo modelo (4.1) reflete essa busca pela eficiência econômica e, como esperado, resulta em algumas mudanças nas máquinas atribuídas a determinadas etapas de alguns produtos. Isso é evidenciado pelos valores de turnos semelhantes aos do plano teórico para a maioria das etapas de cada produto, exceto aquelas que tiveram suas máquinas alteradas, nos quais os números de turnos necessários são maiores.

Essa diferença ocorre porque o modelo (4.1), ao minimizar os custos, aloca as produções nas máquinas com menor custo de fabricação. No entanto, é importante ressaltar que essas máquinas geralmente apresentam uma produtividade menor.

Na Tabela 5.2, é possível observar a diferença nos custos totais de produção entre os três planos, sendo que o plano otimizado apresenta menor custo. Isso se deve à escolha de máquinas com custos de fabricação inferiores aos selecionados pela empresa nos planos teórico e real. Além disso, os valores relativos ao número de turnos dos três planos são

próximos, indicando que o modelo (4.1) fornece uma boa estimativa de produção, que conduz ao custo total da produção mínimo, como seria de esperar. O mesmo pode ser referido em relação ao número de operadores necessários para a fabricação durante os 5 dias de trabalho. Assim, no plano real, foram necessários 15 operadores, enquanto no plano teórico e no plano otimizado, foram necessários 1 operador a menos. Esse cálculo é realizado a partir da divisão do número de turnos pela quantidade de dias úteis disponíveis, considerando que cada máquina trabalha com apenas um operador, conforme mencionado anteriormente no Capítulo 2.

	Teórico	Real	Otimizado
N.º de Turnos	66,45	72,34	66,91
N.º Operadores	13,3	14,5	13,4
Custo Total	148 090,70 €	-	146 936,06 €

Tabela 5.2: Comparação entre os planos real, teórico e otimizado.

O custo total de produção do plano real não foi calculado devido à falta de dados sobre os custos relacionados com as paragens das máquinas, que podem ter influenciado a diferença observada entre o plano teórico e o plano real. No entanto, é esperado que o custo total do plano real seja maior do que os demais, uma vez que a fabricação ocorreu nas mesmas máquinas utilizadas no plano teórico e exigiu um número maior de turnos.

5.1.2 Testes de resposta

Os testes de resposta foram conduzidos para avaliar o desempenho do modelo (4.1) em quatro situações distintas, todas relacionadas com um produto realizado em quatro etapas de produção, podendo cada etapa ser fabricada em diferentes máquinas, o que varia de acordo com a especificação de cada etapa. O primeiro caso (i) envolveu uma sobrecarga no sistema durante o último mês, com o objetivo de observar como a produção seria priorizada e antecipada em uma situação de alta demanda. No segundo caso (ii), os estoques iniciais foram estabelecidos acima da demanda dos dois primeiros meses, a fim de analisar o consumo dos estoques ao longo do tempo. No terceiro caso (iii), os estoques iniciais foram definidos abaixo dos níveis de segurança, visando avaliar o processo de

reposição dos estoques. Por fim, no quarto caso (iv), semelhante ao primeiro, também envolveu uma sobrecarga no sistema, entretanto para o primeiro mês, no qual foi atribuído uma demanda superior à capacidade de produção das máquinas durante as horas normais de trabalho, com o propósito de demonstrar e validar a utilização da produção em horas extraordinárias.

É importante ressaltar que esses casos de teste são cumulativos, ou seja, as entradas de um caso são utilizadas nos demais, proporcionando uma avaliação mais abrangente e precisa da capacidade e sensibilidade do modelo (4.1) em diferentes cenários. Além disso, é válido destacar que os dados de entrada utilizados nesses testes são fictícios e têm o único propósito de testar a sensibilidade do modelo, não representando dados reais.

O primeiro teste de resposta representa uma sobrecarga no terceiro mês devido a uma alta demanda de 150000 unidades para o produto. Todas as outras demandas (D_{ijt}) são definidas para um valor constante de 5000 unidades no primeiro mês e 8000 no segundo mês, a fim observar como o modelo (4.1) antecipa a produção. Neste teste não existe estoque inicial (EI_{ij1}), assim como o nível de estoque de segurança (ES_{ijt}) não é levado em consideração, sendo considerado nulo. Os resultados do primeiro teste são apresentados na Tabela 5.3.

No que se refere às quantidades a serem produzidas, conforme previsto, o modelo (4.1) propôs antecipar a produção do último mês para o segundo mês, devido à falta de capacidade disponível no terceiro mês. Além disso, a fim de evitar custos com estoque, não foi fabricado mais do que a demanda solicitada no primeiro mês. É importante destacar que, quando não há estoque inicial no primeiro mês e nenhum nível de estoque de segurança é estabelecido para nenhum dos meses, devido à restrição de sequenciamento (R5) do modelo (4.1), as quantidades de produção em cada etapa tendem a ser idênticas.

O modelo (4.1) também sugeriu distribuir a produção da etapa 3 entre duas máquinas diferentes no terceiro mês, uma vez que a capacidade máxima da Rovetta 300T foi atingida nesse período. Por fim, no primeiro teste de resposta, o modelo (4.1) atendeu à demanda de cada mês e não produziu produtos além dos solicitados nos dados de entrada.

No segundo teste de resposta, a demanda (D_{ijt}) e o estoque de segurança (ES_{ijt})

Mês 1					
Etapa	EI_{ij1}	D_{ij1}	Xn_{ijm1}	Xe_{ijm1}	Máquina
1	0	5000	5000	0	Rovetta 300T
2	0	5000	5000	0	Balconi 250T-7
3	0	5000	5000	0	Balconi 250T-7
4	0	5000	5000	0	Lavadora - 1
Mês 2					
Etapa	EI_{ij2}	D_{ij2}	Xn_{ijm2}	Xe_{ijm2}	Máquina
1	0	8000	60215	0	Rovetta 300T
2	0	8000	60215	0	Balconi 250T-7
3	0	8000	60215	0	Balconi 250T-7
4	0	8000	60215	0	Lavadora - 1
Mês 3					
Etapa	EI_{ij3}	D_{ij3}	Xn_{ijm3}	Xe_{ijm3}	Máquina
1	52215	150000	97785	0	Rovetta 300T
2	52215	150000	97785	0	Balconi 250T-7
3	52215	150000	72557	0	Rovetta 300T
			25228	0	Balconi 250T-7
4	52215	150000	97785	0	Lavadora - 1

Tabela 5.3: Resultados do primeiro teste de resposta.

permaneceram os mesmos do primeiro teste. No entanto, foi adicionado um estoque inicial (EI_{ijt}) de 15000 unidades para cada etapa no primeiro mês, o que já é suficiente para atender a demanda dos dois primeiros meses. Os resultados desse teste são apresentados na Tabela 5.4:

Devido ao estoque inicial do primeiro mês ser maior do que a demanda, conforme o previsto, o modelo (4.1) sugere que não haja produção durante esse período, resultando em um estoque inicial (EI_{ij2}) de 10000 unidades para o segundo mês. Essa decisão é baseada no custo adicional de manter um estoque excessivo, que seria incorrido caso a fabricação do produto ocorresse no primeiro mês. Portanto, a fim de evitar esse custo desnecessário, o modelo (4.1) não aloca produção para o mês um.

Nos meses dois e três, o modelo (4.1) propõe um plano semelhante ao primeiro teste de resposta. No entanto, as 10000 unidades do estoque inicial (EI_{ij2}) só são utilizadas no terceiro mês. Isso indica que é mais econômico manter esse estoque até o último mês do que produzir durante esse período.

Por fim, assim como no primeiro teste de resposta, o modelo (4.1) conseguiu atender

Mês 1					
Etapa	EI_{ij1}	D_{ij1}	Xn_{ijm1}	Xe_{ijm1}	Máquina
1	15000	5000	0	0	-
2	15000	5000	0	0	-
3	15000	5000	0	0	-
4	15000	5000	0	0	-
Mês 2					
Etapa	EI_{ij2}	D_{ij2}	Xn_{ijm2}	Xe_{ijm2}	Máquina
1	10000	8000	60216	0	Rovetta 300T
2	10000	8000	60216	0	Balconi 250T-7
3	10000	8000	60216	0	Balconi 250T-7
4	10000	8000	60216	0	Lavadora - 1
Mês 3					
Etapa	EI_{ij3}	D_{ij3}	Xn_{ijm3}	Xe_{ijm3}	Máquina
1	62216	150000	87784	0	Rovetta 300T
2	62216	150000	87784	0	Balconi 250T-7
3	62216	150000	53242	0	Rovetta 300T
			34542	0	Balconi 250T-7
4	62216	150000	87784	0	Lavadora - 1

Tabela 5.4: Resultados do segundo teste de resposta.

à demanda de cada mês de forma eficiente, evitando a produção excessiva de produtos além do necessário, como indicado nos dados de entrada.

No terceiro teste de resposta, tanto a demanda (D_{ijt}) quanto o estoque inicial (EI_{ijt}) permanecem os mesmos em relação ao segundo teste. A única alteração ocorre no estoque de segurança (ES_{ijt}), que passa a ser de 20000 unidades em cada etapa durante todos os meses. O objetivo desse teste é avaliar como o modelo (4.1) processa a reposição dos estoques de cada etapa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Considerando a necessidade de manter um estoque de segurança, o modelo (4.1) recomenda a produção de 10000 unidades do produto no primeiro mês. Essa quantidade é suficiente para atender à demanda e garantir um estoque de segurança de 20000 unidades para o mês seguinte. Nos meses dois e três, o modelo (4.1) segue um plano semelhante ao teste anterior, levando em conta o estoque de segurança definido para este teste.

Como esperado, o modelo (4.1) atendeu à demanda de cada mês e evitou a produção excessiva de produtos, seguindo a mesma abordagem adotada nos demais testes de

Mês 1						
Etapa	EI_{ij1}	D_{ij1}	ES_{ij1}	Xn_{ijm1}	Xe_{ijm1}	Máquina
1	15000	5000	20000	10000	0	Rovetta 300T
2	15000	5000	20000	10000	0	Balconi 250T-7
3	15000	5000	20000	10000	0	Balconi 250T-7
4	15000	5000	20000	10000	0	Lavadora - 1
Mês 2						
Etapa	EI_{ij2}	D_{ij2}	ES_{ij2}	Xn_{ijm2}	Xe_{ijm2}	Máquina
1	20000	8000	20000	60215	0	Rovetta 300T
2	20000	8000	20000	60215	0	Balconi 250T-7
3	20000	8000	20000	60215	0	Balconi 250T-7
4	20000	8000	20000	60215	0	Lavadora - 1
Mês 3						
Etapa	EI_{ij3}	D_{ij3}	ES_{ij3}	Xn_{ijm3}	Xe_{ijm3}	Máquina
1	72215	150000	20000	97785	0	Rovetta 300T
2	72215	150000	20000	97785	0	Balconi 250T-7
3	72215	150000	20000	72558	0	Rovetta 300T
				25227	0	Balconi 250T-7
4	72215	150000	20000	97785	0	Lavadora - 1

Tabela 5.5: Resultados do terceiro teste de resposta.

resposta.

No quarto e último teste de resposta, as condições permaneceram as mesmas em relação ao estoque inicial (EI_{ij1}), estoque de segurança (ES_{ijt}) e demanda dos meses dois e três (D_{ij2} e D_{ij3}). No entanto, houve uma alteração significativa na demanda do primeiro mês (D_{ij1}), que foi aumentada para 200000 unidades por etapa, representando um mês de alta demanda que excede a capacidade de produção das máquinas durante o horário normal de funcionamento. Os resultados desse teste são apresentados na Tabela 5.6.

Para esse teste de resposta, o modelo (4.1) propõe a fabricação dos produtos em horas extraordinárias, uma vez que não há capacidade disponível para atender à demanda do mês durante o horário normal de produção. Além disso, o modelo (4.1) recomenda a divisão da fabricação das etapas 2 e 3 em máquinas diferentes. Nos meses dois e três, o plano de produção segue o mesmo padrão do teste de resposta anterior. Com isso, nesse teste o modelo (4.1) também atendeu à demanda de cada mês e não produziu mais

Mês 1						
Etapa	EI_{ij1}	D_{ij1}	ES_{ij1}	Xn_{ijm1}	Xe_{ijm1}	Máquina
1	15000	200000	20000	205000	0	Rovetta 500T
2	15000	200000	20000	125370	0	Gigant 315T
				79630	0	Balconi 250T-7
3	15000	200000	20000	116759	5797	Rovetta 300T
				42135	40309	Balconi 250T-7
4	15000	200000	20000	205000	0	Lavadora - 1
Mês 2						
Etapa	EI_{ij2}	D_{ij2}	ES_{ij2}	Xn_{ijm2}	Xe_{ijm2}	Máquina
1	20000	8000	20000	60215	0	Rovetta 300T
2	20000	8000	20000	60215	0	Balconi 250T-7
3	20000	8000	20000	60215	0	Balconi 250T-7
4	20000	8000	20000	60215	0	Lavadora - 1
Mês 3						
Etapa	EI_{ij3}	D_{ij3}	ES_{ij3}	Xn_{ijm3}	Xe_{ijm3}	Máquina
1	72215	150000	20000	97785	0	Rovetta 300T
2	72215	150000	20000	97785	0	Balconi 250T-7
3	72215	150000	20000	72558	0	Rovetta 300T
				25227	0	Balconi 250T-7
4	72215	150000	20000	97785	0	Lavadora - 1

Tabela 5.6: Resultados do quarto teste de resposta.

produtos do que o necessário.

Da análise dos resultados dos quatro testes de resposta verifica-se que o modelo (4.1) consegue gerar resultados que vão de encontro com os objetivos da empresa, respondendo efetivamente à demanda desigual, requisitos de nível de estoque de segurança e consumo inicial de estoque, o que indica que o modelo PLI (4.1) reflete corretamente o real problema, sendo capaz de fornecer planos de produção coerentes.

5.2 Possíveis cenários

Após a realização dos testes de resposta e a validação dos resultados do modelo (4.1), serão explorados e discutidos diferentes cenários para demonstrar como a ferramenta pode ser utilizada pela empresa a fim de determinar a melhor estratégia em cada um deles. Serão simulados três cenários distintos que podem surgir no contexto da empresa, permitindo

uma análise mais abrangente e adaptável às diferentes situações enfrentadas.

No primeiro cenário (i), consideram-se as demandas reais da empresa, utilizando como dado de entrada os produtos que têm o maior impacto na produção em termos de quantidade de vendas. Nesse cenário, os estoques iniciais e os estoques de segurança são definidos como nulos. Esse caso servirá como referência para os próximos cenários. Da mesma forma que nos testes de resposta, os dados de entrada são utilizados nos cenários subsequentes, proporcionando uma comparação consistente entre as diferentes situações.

No segundo cenário (ii), é apresentado um contexto em que a empresa enfrenta uma queda na demanda de todos os produtos durante o último mês do horizonte de planejamento. Nesse cenário, semelhante ao primeiro, os estoques iniciais e os estoques de segurança são nulos. O objetivo é prever variações na mão de obra decorrentes da redução da demanda desses produtos.

Por fim, o terceiro cenário (iii) descreve uma situação em que a empresa deseja criar um estoque de segurança. Nesse cenário, ao contrário do segundo, é atribuído um valor conhecido ao estoque de segurança. Esse valor é calculado levando em consideração o método de cálculo já utilizado pela empresa e os resultados do segundo cenário. O objetivo é prever as variações na carga das máquinas e compreender os custos associados à manutenção e criação desse estoque de segurança. Além disso, o cenário demonstra como os resultados da simulação de um cenário podem ser utilizados em conjunto com outra simulação, contribuindo para tomadas de decisão mais eficientes e eficazes.

Esses cenários foram desenvolvidos para ilustrar como o modelo (4.1) pode ser usado pela empresa como uma ferramenta valiosa no processo de tomada de decisão para o PP. A escolha desses três cenários tem como objetivo explorar diferentes situações e desafios que podem surgir no contexto da empresa. Cada cenário aborda uma questão específica e permite analisar a aplicabilidade e eficácia do modelo (4.1) em diferentes contextos. A Tabela 5.7 apresenta o número de variáveis e restrições utilizadas, bem como o tempo de processamento para cada cenário simulado no CPLEX Studio IDE.

Essas informações são essenciais para avaliar o desempenho do modelo (4.1) e a viabilidade de sua implementação prática. O tempo de processamento é um indicador

	Tempo de processamento (seg)	Quantidade de variáveis		Restrições
		Inteiras	Binárias	
Cenário 1	6,58	12600	12915	26202
Cenário 2	6,16			
Cenário 3	7,38			

Tabela 5.7: Dados de processamento.

importante para avaliar a eficiência e a escalabilidade do modelo (4.1), garantindo que ele possa lidar com grandes volumes de dados e fornecer resultados dentro de prazos aceitáveis. Conforme evidenciado na Tabela 5.7, os tempos de processamento projetados para os cenários simulados são bastante baixos, o que indica um desempenho satisfatório do modelo (4.1). Isso significa que o modelo (4.1) é capaz de fornecer resultados dentro de prazos aceitáveis, permitindo uma análise ágil e eficiente das diferentes situações. Essa rapidez de processamento é fundamental para auxiliar as tomadas de decisão em tempo real.

5.2.1 Análise do primeiro cenário

Para o primeiro cenário, as demandas reais (D_{ijt}) da empresa observadas no período de janeiro a março de 2023 foram utilizadas, visando uma representação mais precisa da realidade. No entanto, é importante considerar as limitações discutidas na seção 5.1.1, referentes aos estoques de produtos em etapas intermediárias, dados de produtividade e custos, os quais podem ter um impacto significativo nos resultados. A Tabela 5.8 apresenta os dados de entrada do horizonte de planejamento que definem o modelo (4.1) para esse período simulado.

	Dias úteis	Dias extras	Turnos por dia	Tempo por turno (horas)
Mês 1	22	8	3	7,333
Mês 2	20	8		
Mês 3	23	8		

Tabela 5.8: Horizonte de planejamento.

Por meio da aplicação do princípio de Pareto, que estabelece que 80% dos efeitos são provenientes de apenas 20% das causas, foram identificados os produtos que possuem o maior impacto na produção em termos de quantidade de vendas. Nesse contexto, dentre os 101 produtos que a empresa apresenta demanda ao longo desses três meses, foram selecionados 21, os quais passam por etapas e processos específicos. Esses 21 produtos correspondem a 80,38% das vendas da empresa. Dentre as 20 máquinas disponíveis na empresa, apenas 10 são utilizadas para a fabricação desses produtos selecionados. Para esse cenário, o estoque inicial (EI_{ijt}) e o estoque de segurança (ES_{ijt}), são considerados nulos. A Tabela 5.9 apresenta os dados de demanda (D_{ijt}) dos produtos selecionados para o horizonte de tempo definido.

Produto	D_{ijt}			Produto	D_{ijt}		
	Mês 1	Mês 2	Mês 3		Mês 1	Mês 2	Mês 3
1	160800	155000	142400	11	27500	21000	20000
2	48000	58000	52000	12	15750	18750	10500
3	72000	58000	42000	13	15060	11970	11970
4	82200	73800	72000	14	12800	11050	11000
5	42750	35000	25000	15	13550	14000	7250
6	29600	17600	17650	16	10500	12250	7875
7	25320	17160	16920	17	12250	12250	11375
8	26345	21000	19489	18	12570	8610	8490
9	26350	25300	202500	19	12570	8610	8460
10	21840	15440	10752	20	9500	13500	7000
11	27500	21000	20000	21	15000	15550	10350

Tabela 5.9: Demanda real entre janeiro e março de 2023.

Os resultados do primeiro cenário, obtidos por meio do modelo (4.1), em relação à ocupação das máquinas são apresentados na Figura 5.1. Nessa figura, é possível observar a taxa de ocupação de cada máquina ao longo dos três meses de planejamento, considerando tanto as horas normais quanto as horas extraordinárias. A análise desses resultados permite à empresa identificar as máquinas que têm maior probabilidade de se tornarem

gargalos no processo de produção.

Ao analisar a Figura 5.1, fica evidente que a maioria das máquinas apresenta uma taxa de ocupação inferior a 60%, indicando que a empresa possui uma capacidade ociosa considerável em suas máquinas. No entanto, também é possível identificar que a Rosqueadora atingiu sua ocupação máxima nos meses 1 e 2, assim como a Lavadora-1 no último mês. Essas informações ajudam a empresa a identificar as máquinas potenciais que podem se tornar gargalos na produção.

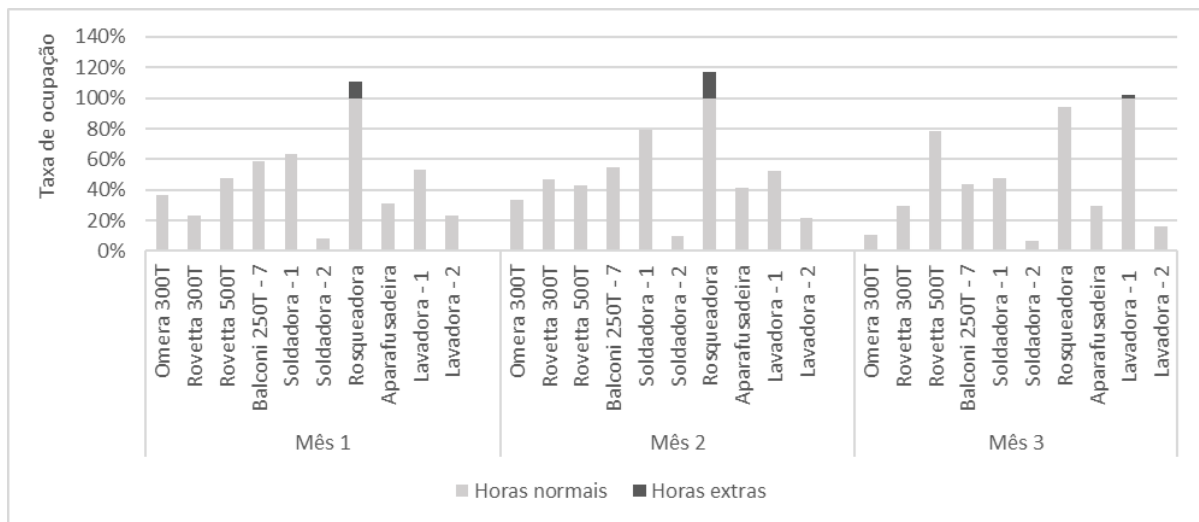


Figura 5.1: Nível de ocupação das máquinas para o primeiro cenário.

Dado que o horizonte de planejamento é de três meses e que o uso contínuo dessa ferramenta é recomendado, essa análise permite à empresa antecipar suas estratégias para resolver o problema de gargalos de produção dentro de um prazo adequado.

Para lidar com essas situações (falta de capacidade), o modelo sugere a implementação de horários extraordinários de trabalho, a fim de atender à demanda específica dessas máquinas e garantir o cumprimento dos prazos de entrega. A Tabela 5.10 resume outros resultados gerados pelo modelo (4.1) que são relevantes para auxiliar a empresa nas decisões relacionadas ao PP, tais como o número de operadores e turnos necessários para atender à demanda por mês, como também o custo total da produção (CTP) gerado pelos 3 meses.

No primeiro cenário, o modelo (4.1) obteve o valor de custo total de produção (CTP)

	Soma do n.º de turnos das máquinas		N.º Operadores	CTP
	Normal	Extra		
Mês 1	294,4	7,1	14,27	2 416 071,54 €
Mês 2	289,7	10,5	15,79	
Mês 3	314,7	1,5	13,87	
Total	898,8	19,1	43,93	

Tabela 5.10: Resumo dos resultados do primeiro cenário.

para o período de três meses simulados de 2.416.071,53 euros. Esse custo fornece à empresa a oportunidade de adotar estratégias econômicas, como investir em estoque de segurança ou considerar trocas de máquinas, entre outras opções disponíveis. Essas decisões podem ser fundamentadas nos resultados obtidos, permitindo que a empresa otimize seus recursos e tome medidas que impactem positivamente sua eficiência financeira.

Conforme mencionado anteriormente, devido à limitação de capacidade da Rosqueadora, é recomendado que sejam realizadas horas extras de produção nos meses 1 e 2, da seguinte forma: no primeiro mês, será necessário um total de 7,1 turnos em horas extraordinárias; no segundo mês, esse valor aumentará para 10,5 turnos, e no terceiro mês, apenas a Lavadora-1 precisará operar por 1,5 turno em horas extraordinárias.

Além disso, é importante considerar a necessidade de mão de obra durante o horizonte de planejamento. Estima-se que serão necessários 15 operadores no primeiro mês, 16 operadores no segundo mês e 14 operadores no terceiro mês. Essa estimativa leva em conta tanto as horas normais de produção quanto as horas extraordinárias. Essa informação é essencial para garantir que a empresa tenha a mão de obra necessária para atingir os objetivos de produção e cumprir com os prazos estabelecidos.

5.2.2 Análise do segundo cenário

O objetivo do segundo cenário é identificar as flutuações na mão de obra em resposta às variações na demanda (D_{ijt}). Os dados de entrada são os mesmos do primeiro cenário (Tabela 5.9), com o estoque inicial (EI_{ijt}) e estoque de segurança (ES_{ijt}) nulos, no entanto

a demanda do último mês para esse cenário é reduzida para metade. Esta redução da demanda permite observar os efeitos resultantes nas necessidades de mão de obra ao longo do horizonte de planejamento. A Figura 5.2 resume a ocupação das máquinas para esse segundo cenário.

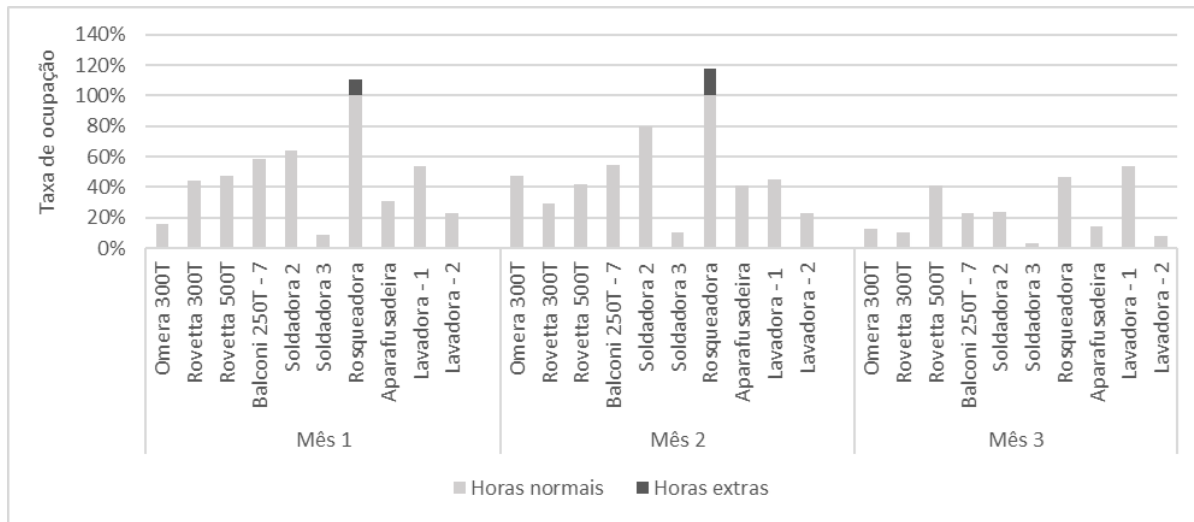


Figura 5.2: Nível de ocupação das máquinas para o segundo cenário.

Em relação à ocupação das máquinas, o modelo (4.1) não indica grandes alterações para o primeiro e segundo mês em comparação ao primeiro cenário. As poucas mudanças que ocorrem estão relacionadas à taxa de ocupação da Omera 300T e da Rovetta 300T. No primeiro mês do primeiro cenário, essas taxas são de 37% e 16%, respectivamente. No cenário atual, essas taxas são de 23% e 44%, respectivamente. Isso ocorre devido à semelhança nos custos de fabricação entre as duas máquinas (CFN_{ijm}), o que permite ao modelo (4.1) ser mais flexível na escolha da máquina para fabricar o produto, resultando em alterações na alocação da produção nessas máquinas. No entanto, para o terceiro mês, a diferença na ocupação das máquinas é visível. Os resultados mostram taxas de ocupação menores, o que se reflete diretamente na mão de obra necessária, como pode ser observado na Tabela 5.11.

Em comparação com o primeiro cenário, a necessidade de mão de obra se manteve constante nos dois primeiros meses e foi reduzida para metade no terceiro mês, conforme o esperado. Essa variação na necessidade de mão de obra está diretamente relacionada com

	Soma do n.º de turnos das máquinas		N.º Operadores	CTP
	Normal	Extra		
Mês 1	294,4	7,09	14,27	1 943 980,37 €
Mês 2	289,7	10,5	15,45	
Mês 3	164,2	0	7,14	
Total	748,3	17,59	36,86	

Tabela 5.11: Resumo dos resultados do segundo cenário.

a diminuição da demanda, uma vez que não há estoque inicial ou estoque de segurança.

Além disso, tal como esperado, o CTP também é menor do que no cenário anterior, uma vez que a demanda é inferior, o que se repercute na diminuição do custo total da produção. Da mesma forma, a soma dos turnos das máquinas em cada mês segue o mesmo padrão que os números de operadores, quando comparados ao primeiro cenário.

Com base nos resultados do segundo cenário, a empresa tem a oportunidade de antecipar-se a esse cenário desfavorável e desenvolver estratégias para lidar com a redução na carga de trabalho. Por exemplo, pode-se considerar a redução da mão de obra temporariamente, a diversificação de produtos para explorar outros mercados ou até mesmo a revisão dos preços para se tornar mais competitivo. Essas medidas ajudam a minimizar os impactos negativos da queda na demanda e a garantir uma alocação eficiente dos recursos humanos e financeiros.

5.2.3 Análise do terceiro cenário

O terceiro e último cenário trata da criação de um estoque de segurança (ES_{ijt}) pela empresa. Nesse cenário, os dados de entrada permanecem os mesmos, com estoque inicial (EI_{ijt}) nulo e demanda (D_{ijt}) equivalente ao cenário anterior. No entanto, para determinar o nível de estoque de segurança, a empresa adota um método de cálculo já estabelecido, que consiste em definir o estoque de segurança como a metade da média aritmética das demandas dos três meses para cada produto.

É importante ressaltar que, com base nos resultados do segundo cenário, a Rosqueadora já atingiu sua capacidade máxima. Portanto, para os produtos que dependem dessa máquina, o estoque de segurança não será considerado, uma vez que não há possibilidade de aumentar a produção além do limite da máquina. Essa informação ilustra como a empresa pode utilizar os resultados das simulações para definir cenários mais específicos e realistas, adaptando suas estratégias conforme a capacidade produtiva de cada máquina.

O objetivo desse cenário é prever as variações na taxa de ocupação das máquinas em função da criação de um estoque de segurança e compreender os custos associados à manutenção e criação desse estoque. A Figura 5.3 ilustra os resultados de ocupação das máquinas para esse terceiro cenário.

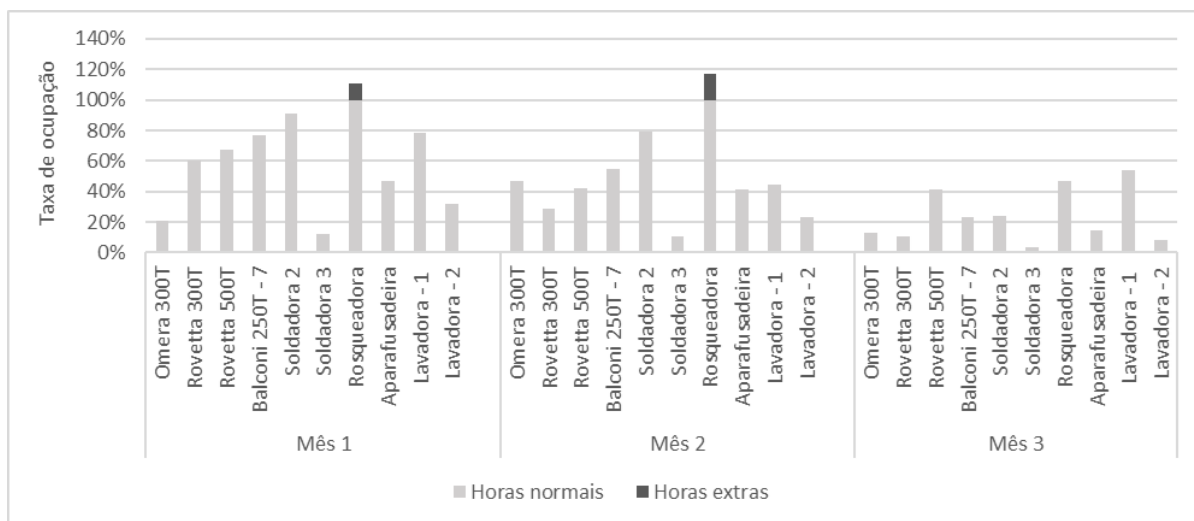


Figura 5.3: Nível de ocupação das máquinas para o terceiro cenário.

Nesse cenário, em comparação com o cenário anterior, como esperado, há uma alteração nos níveis de produção apenas durante o primeiro mês, como pode ser observado nas taxas de ocupação das máquinas, que tiveram um aumento considerável. Isso ocorre devido à fabricação do estoque de segurança, que é produzido nesse período. Nos meses seguintes, a produção é direcionada exclusivamente para atender à demanda dos clientes. Essa diferença é facilmente observável ao analisar os dados da soma dos turnos das máquinas e do número de operadores (conforme apresentado na Tabela 5.12), que permanecem inalterados nos dois últimos meses.

	Soma do n.º de turnos das máquinas		N.º Operadores	CTP
	Normal	Extra		
Mês 1	386,4	7,1	18,45	2 285 406,84 €
Mês 2	282,9	10,5	15,45	
Mês 3	164,2	0	7,14	
Total	833,5	17,6	41,04	

Tabela 5.12: Resumo dos resultados do terceiro cenário.

O modelo (4.1) calculou um custo total de produção (CTP) de 2.285.406,84 euros para esse cenário, representando um acréscimo de 341.426,47 euros em relação ao cenário anterior. Essa diferença reflete o custo de fabricação do estoque de segurança e os custos de armazenamento nos dois últimos meses. Essas informações são importantes para a empresa avaliar a viabilidade financeira e os benefícios de investir em uma reserva adicional de produtos.

Ao analisar os custos associados à produção antecipada do estoque de segurança, a empresa pode compará-los com os benefícios decorrentes desse investimento. Ter uma reserva de produtos permite à empresa lidar com flutuações na demanda e possíveis interrupções no processo de produção, garantindo a disponibilidade dos produtos quando necessário. Isso contribui para evitar a perda de vendas devido à falta de estoque e pode melhorar a satisfação do cliente.

Portanto, considerando as análises dos três cenários, os resultados obtidos pelo modelo (4.1) oferecem à empresa uma compreensão mais completa e detalhada das implicações do PP em diferentes situações. Isso permite que a empresa identifique oportunidades de otimização, antecipe-se a desafios e tome decisões estratégicas mais eficientes para atender às demandas do mercado, controlar custos e maximizar a eficiência operacional.

Além disso, é importante ressaltar que, por meio da atualização periódica do modelo (4.1) para um planejamento contínuo, os resultados gerados tendem a ser refinados e aprimorados ao longo do tempo. Isso resulta em projeções mais precisas e confiáveis, auxiliando nas decisões relacionadas à produção.

Capítulo 6

Conclusões

O presente trabalho foi resultado de um estágio numa empresa que produz peças automotivas por estampagem a frio e teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisões no curto e médio prazo do PP.

Após compreender a natureza do problema e identificar os fatores envolvidos, foi desenvolvido um modelo de PLI (4.1) que foi implementado no software CPLEX Studio IDE 22.1.0 para gerar os resultados. Esse modelo foi projetado para estimar os valores ótimos relativos aos níveis de produção, inventário, carga e mão de obra, buscando minimizar o custo total de produção em um horizonte de planejamento de três meses.

A validação do modelo foi conduzida em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizado um estudo comparativo entre um caso real de produção executado pela empresa e um plano sugerido pelo modelo (4.1). Na segunda etapa, foram realizados quatro testes de resposta em cenários específicos para verificar o comportamento da ferramenta à alteração de parâmetros, como a demanda, o estoque inicial e o estoque de segurança. Ambas as etapas apresentaram os resultados esperados, indicando que o modelo (4.1) fornece estimativas confiáveis e alinhadas aos objetivos da empresa.

A fim de ilustrar como o modelo (4.1) pode ser usado pela empresa como uma ferramenta valiosa no processo de tomada de decisão para o PP, foram simulados três cenários distintos. A escolha desses cenários foi realizada com o objetivo de explorar diferentes situações e desafios que podem surgir no contexto da empresa, permitindo uma análise

abrangente da aplicabilidade e eficácia do modelo (4.1) em diferentes contextos.

Os resultados gerados pelo modelo (4.1) nesses cenários possibilitam que a empresa tome decisões estratégicas, para otimizar a alocação de recursos disponíveis, como máquinas e mão de obra. Além disso, a ferramenta auxilia na identificação de possíveis gargalos na produção, indicando quando existe a necessidade de trabalhar em horas extraordinárias. Como também apoia na antecipação da produção devido variações na demanda, no ajuste dos níveis de estoque e na adoção de estratégias que garantam a entrega dos produtos dentro do prazo e com a qualidade necessária.

Com base nos resultados obtidos pelo modelo (4.1) nos vários cenários, fica claro que a ferramenta desenvolvida tem o potencial de melhorar significativamente o PP da empresa. Ao utilizar essa ferramenta, a empresa pode tomar decisões mais precisas e fundamentadas, resultando na otimização de recursos, no controle de custos e na capacidade de atender às demandas do mercado de maneira eficiente e competitiva.

Para explorar o potencial máximo da ferramenta, é fundamental manter os parâmetros de entrada sempre atualizados, garantindo que as informações utilizadas sejam precisas e reflitam a realidade da empresa. É necessário estabelecer um processo contínuo de utilização da ferramenta, realizando análises mensais ou sempre que ocorrerem alterações significativas nos parâmetros de entrada. Ao manter os parâmetros atualizados e utilizar a ferramenta de forma regular, a empresa pode se antecipar às variações previstas na demanda.

De acordo com a metodologia da pesquisa operacional, a ferramenta encontra-se na etapa de avaliação de recomendações e monitoramento do desempenho. É importante ressaltar que, até o momento, a implementação da ferramenta na empresa ainda não ocorreu.

As dificuldades encontradas para a realização do trabalho estão relacionadas à obtenção de alguns dados de entrada, como, por exemplo, o estoque de produtos em etapas intermediárias, o que não permitiu uma comparação real com o atual cenário da empresa. Essa limitação impediu uma análise direta e realista das condições existentes.

As limitações da ferramenta incluem: (i) o modelo (4.1) não tem memória referente

ao tempo de *setup* entre 2 meses consecutivos; (ii) para os produtos com etapas que podem ser fabricadas em mais de uma máquina, não existe restrição quanto a produção simultânea.

Para trabalhos futuros, é sugerido o desenvolvimento de um modelo adicional que complemente a ferramenta existente, auxiliando na programação da produção e gerando o sequenciamento das atividades a curto prazo. Esse modelo seria alimentado com os dados de saída do modelo (4.1) atual, incorporando informações como restrições de capacidade para cada máquina e datas de entrega.

Referências

- Almeida, R.P., F. Romanzini e L. Werner (2016). «Planejamento da capacidade de produção na indústria plástica: uma abordagem baseada em previsão de demanda e níveis de capacidade». Em: *Revista Produção Online* 16.3, pp. 1033–1057. DOI: 10.14488/1676-1901.v16i3.2320.
- Anthony, R N (1965). *Planning and control systems: a framework for analysis*. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Al-Ashhab, M. S. e Hassan Fadag (2018). «Multi-product master production scheduling optimization modelling using mixed integer linear programming and genetic algorithms». Em: *International Journal of Research - Granthaalayah* 6.5, pp. 78–92. DOI: 10.5281/zenodo.1255237.
- Attia, E.-A. et al. (2016). «Aggregate Production Planning Considering Performance Evolution: A Case Study». Em: *17th Int. AMME Conference*, pp. 25–40.
- Brocka e Brocka (1995). *Gerenciamento da Qualidade*. Portuguese. Trad. por Valdenio Ortiz de Sousa. Makron Books.
- Chase, Richard B, Nicholas J Aquilano e F Robert Jacobs (1998). *Production and operations management: manufacturing and services*. 8^a ed. McGraw-Hill.
- Fernandes Flavio Cesar Faria e Godinho Filho, Moacir (2010). *Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial*. Atlas.
- Filho, Oscar S. Silva, Wagner Cezarino e João Ratto (2010). «Aggregate Production Planning: Modeling and Solution via Excel Spreadsheet and Solver». Em: *IFAC Proceedings*

- Volumes 43.17. 5th IFAC Conference on Management and Control of Production Logistics, pp. 89–94. ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT-3007.00020>.
- Gaither, Norman e Greg Frazier (2001). *Production and operations management*. 8^a ed. South Western College Publishing.
- Heizer, Jay e Barry Render (2008). *Princípios de administração da produção e operações*. 8^a ed. LTC.
- Hillier, Frederick, Gerald J Lieberman et al. (2006). *Introduction to operations research*. Vol. 57. 3. Palgrave Macmillan Ltd, p. 330.
- Krajewski, Lee J. e Larry P. Ritzman (1996). *Operations management: strategy and analysis*. 3^a ed. Massachusetts: Addison – Wesley Publishing Company.
- Lachtermacher, G. (2009). *Pesquisa Operacional: Na tomada de decisões*. 4^a edição. São Paulo: Prentice Hall Brasil.
- Lalami, I., Y. Frein e J. P. Gayon (2015). «A model for master production scheduling in automotive powertrain plants: A case study». Em: *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. IEEE, pp. 1081–1090.
- Lee, H. et al. (1996). «Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management». Em: *Industrial and Engineering Chemistry Research* 35, pp. 1630–1641. DOI: [10.1021/ie950519h](https://doi.org/10.1021/ie950519h).
- Metaxiotis, K, D Askounis e J Psarras (2001). «An object-oriented analysis and design of a model for production planning and control in industry». Em: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18.9, pp. 657–664. DOI: [10.1007/s001700170026](https://doi.org/10.1007/s001700170026).
- Moreira, D A. (1996). *Administração da produção e operações*. 2^a ed. Pioneira.
- Motta, P R (1997). *Transformação Organizacional: a teoria e a prática de inovar*. Qualitymark.
- Oladejo, N. K. et al. (2019). «Optimization Principles and Its' Application in Optimizing Landmark University Bakery Production Using Linear Programming». Em: *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10, pp. 183–190.

- Omar, Mohamed, Muzalna Mohd-Jusoh e Mohd. Omar (2021). «Developing a Master Production Schedule Using Fuzzy Mixed Integer Linear Programming». Em: *International Journal of Computers* 15, pp. 8–13. DOI: 10.46300/9108.2021.15.2.
- Omar e Teo (2007). «Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, batch process environment». Em: *International Journal of Production Research* 45.5, pp. 1029–1047. DOI: 10.1080/00207540600724989.
- Pedroso, Marcelo e Henrique Correa (dez. de 1996). «Sistemas de programação da produção com capacidade finita: uma decisão estratégica?» Em: *Revista de Administração de Empresas* 36. DOI: 10.1590/S0034-75901996000400007.
- Sillekens, Thomas, Achim Koberstein e Leena Suhl (2011). «Aggregate production planning in the automotive industry with special consideration of workforce flexibility». Em: *International Journal of Production Research* 49.17, pp. 5055–5078. DOI: 10.1080/00207543.2010.524261.
- Slack, Nigel, Stuart Chambers e Robert Johnston (2009). *Administração da produção*. Atlas.
- Stevenson, William J (2017). *Operations Management*. 13^a ed. McGraw-Hill Education.
- Tubino, D F (2007). *Planejamento e controle da produção*. Atlas.
- Vollmann, T et al. (2004). *Manufacturing planning and control systems for supply chain management: the definitive guide for professionals*. Vol. 5. McGraw-Hill Professional.
- Winston, Wayne L (2022). *Operations research: applications and algorithms*. Cengage Learning.
- Wu, Y., M. Liu e C. Wu (2002). «A genetic algorithm for optimizing the MPS of a processing-assembly production line with identical machines». Em: *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Beijing.