

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

BRUNO HENRIQUE ROMANO

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA GESTÃO DE
ESTOQUES UTILIZANDO UM ALGORITMO EM LINGUAGEM C++

Joinville

2022

BRUNO HENRIQUE ROMANO

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA GESTÃO DE
ESTOQUES UTILIZANDO UM ALGORITMO EM LINGUAGEM C++

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia de Transportes e
Logística do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Silvia Lopes de Sena
Tagliarenha

Joinville

2022

BRUNO HENRIQUE ROMANO

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA GESTÃO DE
ESTOQUES UTILIZANDO UM ALGORITMO EM LINGUAGEM C++

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 11 de março de 2022.

Banca Examinadora:

Dr.(a) Silvia Lopes de Sena Taglialha
Orientador(a)
Presidente

Dr.(a) Francielly Hedler Staudt
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Sr.(a) Emerson Aliske
Membro(a)
Perfil Group

Dedico este trabalho a meu pai.
Sua força de vontade sempre será
inspiração para mim.

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos são para as duas pessoas mais importantes do mundo para mim, que foram os maiores exemplos de educação e amor que sempre vou carregar pela minha vida. A minha mãe, por ser a pessoa mais forte que eu já conheci na vida e cuidar de mim em todos os momentos. E meu pai, sempre me apoiou em todas as minhas decisões, e que não poderá compartilhar este encerramento deste ciclo comigo, porém, sempre estará dentro de mim.

Quero agradecer a minha família, por serem sempre a estrutura emocional que eu precisei. E mesmo alguns morando em outros estados, sempre posso me sentir acolhido por eles, fazendo com que a barreira da distância seja vencida.

Quero agradecer aos meus amigos, Apu, João, Luiz, Pedro, Karen, Júlia, Lídia, Zuco, Azaliáh e Madrona que sempre estiveram presentes quando eu precisei, me deram conselhos quando eram necessários e me ajudaram a enfrentar todos esses anos na universidade de forma mais leve e feliz.

A minha orientadora, Silvia, que propôs a ideia inicial para este trabalho e aturou as diversas alterações de data de entrega do TCC e reuniões que tivemos, porém sempre foi muito paciente para me ensinar em todos os momentos e deu todo o suporte necessário para que este estudo fosse desenvolvido e concluído.

A empresa Perfil Group, que disponibilizaram os dados para realização deste estudo, em especial ao Emerson, por me auxiliar no processo de desenvolvimento do algoritmo e me passar diversos ensinamentos sobre o assunto que pude aproveitar no trabalho.

Gostaria também de agradecer ao Professor Sacchelli e a todos que fizeram parte do PET durante os três anos em que eu fiz parte do grupo, pela amizade e todo o aprendizado que tive foram fundamentais para o meu desenvolvimento interpessoal e intrapessoal.

RESUMO

A necessidade de minimização de custos e armazenagem de materiais é fundamental em um cenário mundial onde vantagens competitivas são um diferencial na geração de lucro e melhoria no nível de serviço. O custo de estocagem, frente ao objetivo de minimização de despesas, faz com que gestores se questionem sobre quando e quantos itens devem ser comprados. Este estudo apresenta uma metodologia para o controle de estoque em uma empresa no ramo de perfis térmicos que importa matéria prima da China por containers, a fim de minimizar o custo total da gestão do estoque. Utilizou-se um modelo de programação dinâmica determinística implementado em um algoritmo em linguagem C++ e os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo são comparados com o método utilizado pela própria empresa. Com a metodologia proposta pelo estudo, observa-se que é possível obter uma redução de custo em torno de 13%, quando se considera um horizonte de planejamento de 12 meses. Cinco cenários foram propostos para identificar as tendências do funcionamento do algoritmo, onde observou-se que devido ao custo de frete e pedido desenvolvida pela empresa, a escolha que trará um menor custo para todo o processo será comprar o máximo de material necessário para toda a previsão e estocar.

Palavras-chave: Gestão de estoques. Redução de custos de gestão de estoque. Programação dinâmica. Previsão de demanda.

ABSTRACT

The need to minimize costs and store materials is fundamental in a global scenario where competitive advantages are a differential in generating of profit and improving the level of service. The cost of storage, in view of the objective of minimizing expenses, makes managers question themselves about when and how many items should be purchased. This research presents a methodology for inventory control in a company in the field of thermal profiles that imports raw material from China by containers, in order to minimize the total cost of inventory management. A deterministic dynamic programming model implemented in an algorithm in C++ language was used and the results obtained with the application of the algorithm are compared with the method applied by the company. With the proposed methodology, it is possible to obtain a cost reduction of around 13%, when considering a planning horizon of 12 months. Five scenarios were proposed to identify the algorithm trends, where it was observed that due to the cost of freight and order developed by the company, the choice that will bring a lower cost to the entire process will be to buy as much material as possible and stock up.

Keywords: Inventory management. Reduction of inventory management costs. Dynamic programming. Demand forecasting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do gráfico dente de serra	26
Figura 2 – Esquema caso genérico de um estágio n	38
Figura 3 - Esquema caso genérico de N estágios.....	38
Figura 4 - Estrutura básica para a programação dinâmica determinística.....	39
Figura 5 - Formulação genérica de um problema de PPD	40
Figura 6 – Estrutura básica para a programação dinâmica probabilística	41
Figura 7 – Etapas para desenvolvimento do trabalho.....	43
Figura 8 – Etapas do método de solução	47
Figura 9 – Caixa de madeira utilizada no transporte.....	49
Figura 10 - Previsão de janeiro a dezembro de 2021	57
Figura 11 - Modelo de PD determinística para controle de estoque em N estágios...	59
Figura 12 - Definição da equação de recorrência para o PCE.....	60
Figura 13 - Modelo determinístico de PD.....	61
Figura 14 - Algoritmo de PD considerado para o PCE.	66
Figura 15 - Informações da saída do programa.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de serviço em relação ao nível de serviço (%)	28
Tabela 2 - Saída de materiais para vendas em rolos.....	50
Tabela 3 - Entrada de matéria prima em rolos	50
Tabela 4 - Valores da taxa de armazenagem disponibilizados pela empresa terceira	51
Tabela 5 - Dimensional e custo dos containers de 20 e 40 pés	52
Tabela 6 – Dados material container de 20 pés.....	52
Tabela 7 – Dados material container de 40 pés.....	53
Tabela 8 – Custo das taxas de importação	54
Tabela 9 - Estoque de segurança para diferentes níveis de serviço.....	56
Tabela 10 - Erros de previsão de demanda.....	57
Tabela 11 - Exemplo de planilha com todas as etapas utilizadas na PD.....	63
Tabela 12 - Erro histórico de rolos comprados	65
Tabela 13 – Gestão de estoque de 2021	71
Tabela 14 - Variáveis que sofrerão alteração para os cenários	73
Tabela 15 - Custos da aplicação para o cenário base	74
Tabela 16 - Custos da aplicação para o cenário 1	75
Tabela 17 - Nova proposta para os custos da aplicação para o cenário 1	75
Tabela 18 - Custos da aplicação para o cenário 2	76
Tabela 19 - Custos da aplicação para o cenário 3	76
Tabela 20 - Custos da aplicação para o cenário 4	77
Tabela 21 - Custos da aplicação para o cenário 5	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PD - Programação Dinâmica

PDD - Programação Dinâmica Determinística

PDE - Programação Dinâmica Estocástica

MMS - Média Móvel Simples

MMP - Média Móvel Ponderada

SES - Suavização Exponencial Simples

SET - Suavização Exponencial com Tendência

ME - Erro Médio

MAD - Erro Médio Absoluto

MSE - Erro Médio Quadrado

MAPE - Erro Percentual Médio Absoluto

IR - Índice de Rotatividade

PO - Pesquisa Operacional

PP - Posição Pallet

THC - Movimentação do Contêiner no Terminal Portuário

ISPS - Proteção de Navios e Instalações Portuárias

IOF - Imposto sobre Operações Financeiras

TRS - Taxa de Registro de Siscarga

AFRMM - Adicional ao Frete para Renovação da Marinha Mercante

PCE - Problema de Controle de Estoque

CP - Custo de Compra

MDC - Mínimo Divisor Comum

JAN - Janeiro

FEV - Fevereiro

MAR - Março

ABR - Abril

MAI - Maio

JUN - Junho

JUL - Julho

AGO - Agosto

SET - Setembro

OUT - Outubro

NOV - Novembro

DEZ - Dezembro

LISTA DE SÍMBOLOS

mm – milímetro

m – metro cuadrado

m³ – metro cúbico

m² – metro cuadrado

R\$ – real

\$ – dólar

≈ – aproximadamente

cm – centímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	LOGÍSTICA.....	19
2.1.1	Estoques.....	20
2.1.1.1	Tipos de estoque.....	21
2.1.1.2	Análise sobre o uso de estoques	22
2.1.1.3	Custos de estoques	22
<i>2.1.1.3.1</i>	<i>Custos de Armazenagem</i>	<i>23</i>
2.1.1.4	Gestão de estoques	24
2.1.2	Métodos e ferramentas de gestão de estoque	24
2.1.2.1	Giro e cobertura de estoque.....	25
2.1.2.2	Níveis de estoque	26
<i>2.1.2.2.1</i>	<i>Estoque de segurança.....</i>	<i>27</i>
2.2	PREVISÃO DE DEMANDA	28
2.2.1	Média móvel simples	29
2.2.2	Média móvel ponderada	30
2.2.3	Suavização exponencial simples.....	31
2.2.4	Suavização exponencial com tendência	32
2.2.5	Métodos de cálculo de erro de previsão	33
2.3	TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO	35
2.3.1	Pesquisa Operacional.....	35
2.3.2	Programação dinâmica	36
2.3.2.1	Programação dinâmica determinística	39
2.3.2.2	Programação dinâmica estocástica.....	40
3	METODOLOGIA	42
4	ESTUDO DE CASO.....	45
4.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ESTUDADA.....	45
4.2	PROBLEMÁTICA E ESCOPO DO TRABALHO	46

4.3	ETAPAS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	47
4.3.1	COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS.....	48
4.3.1.1	Custo e característica do material.....	48
4.3.1.2	Demanda do item	49
4.3.1.3	Taxa de armazenagem.....	50
4.3.1.4	Frete de carga	52
4.3.1.5	Despesas de importação	53
4.3.2	MODELO DE PREVISÃO DE DEMANDA.....	54
4.3.2.1	Definição da quantidade a ser comprada.....	54
4.3.2.1.1	<i>Aplicação do estoque de segurança.....</i>	<i>55</i>
4.3.2.1.2	<i>Métodos de previsão de demanda.....</i>	<i>56</i>
4.3.2.2	Quando deve ser comprado	58
4.3.3	MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA O PCE.....	59
4.3.3.1	Modelo na planilha de programação dinâmica para o PCE	61
4.3.3.1.1	<i>Tratamento de dados utilizados para a combinação de valores possíveis.....</i>	<i>64</i>
4.3.3.2	Detalhamento do algoritmo de programação dinâmica para o PCE	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
5.1	CUSTO TOTAL DA GESTÃO DE ESTOQUE.....	71
5.2	CENÁRIOS PROPOSTOS PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO.....	72
5.3	APLICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO NOS CENÁRIOS	74
5.3.1	Cenário base.....	74
5.3.2	Cenário 1 – Taxa de armazenagem	75
5.3.3	Cenário 2 – Custo do material	76
5.3.4	Cenário 3 – Custo container.....	76
5.3.5	Cenário 4 – Ajuste da demanda.....	76
5.3.6	Cenário 5 – Nível de serviço	77
5.3.7	Informações sobre o processamento do algoritmo.....	77
5.4	DISCUSSÕES.....	78
6	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O mercado atual cria um constante movimento de competitividade no qual as organizações estão inseridas, almejando diferenciar-se no relacionamento com clientes e consumidores em busca de oportunidades de lucratividade (BERTAGLIA, 2016). Tal busca requer a otimização de recursos e processos na cadeia de suprimentos com objetivo de ser um diferencial competitivo das empresas para vislumbrar novas possibilidades de mercado, se adaptarem rapidamente às novas tendências, melhorar suas performances e agregar valores aos seus serviços e produtos (PAURA, 2012).

A aplicação da otimização em recursos e processos pode ser facilitada com a rápida evolução das tecnologias de informação e comunicação e sua integração nas cadeias de suprimentos que levaram ao advento da quarta revolução industrial (DALENOGARE et al., 2018). Um número crescente de empresas tem adotado princípios e tecnologias da quarta revolução industrial para melhorar o desempenho e a produtividade (GHADGE et al., 2020), como a adoção de tecnologias digitais para coleta e análise de dados em tempo real, fornecendo informações úteis ao sistema de fabricação (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Considerando a otimização de alguns recursos e processos, Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (2010), destacam que para muitos administradores, a gestão da cadeia de suprimentos é sinônimo de otimização dos níveis de estoque. Devido os estoques de diferentes recursos serem utilizados desde o começo da história da humanidade, como alimentos e ferramentas, para apoiar sua sobrevivência e desenvolvimento, a gestão de estoques, como conceito amplamente difundido, também está presente em praticamente todo o tipo de organização, até mesmo no dia a dia das pessoas (GARCIA et al., 2006).

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2009) gerentes de produção usualmente têm uma atitude ambivalente em relação a estoques. Se por um lado baixos níveis de estoque podem levar a perdas de economias de escala e altos custos de falta de produtos, por outro lado, o excesso de estoques representa custos operacionais e de recursos ociosos (GARCIA et al., 2006). Slack et al. (2009) completam que pode proporcionar determinada segurança em um ambiente complexo e incerto.

Encontrar um equilíbrio em uma gestão de estoque não é tarefa simples, pois não importa o que está sendo armazenado, ou onde está posicionado na operação, o estoque existirá devido a diferença de ritmo ou de taxa entre fornecimento e demanda. Se ocorresse o

fornecimento de cada item quando fosse demandado, o item não precisaria ser estocado (SLACK et al., 2009).

Tendo em vista os problemas enfrentados pelo mal gerenciamento de estoque, observa-se então a necessidade de realizar procedimentos para corrigir determinadas consequências em uma gestão de estoques. Partindo da hipótese que muitas empresas apresentam dificuldades na gestão de seus estoques, como espaço, manutenção e mão de obra, certas ferramentas podem auxiliá-las neste gerenciamento. Oliveira e Melo (2015) destacam previsão de demanda, nível de estoque, curva ABC e avaliação de estoques como uma dessas ferramentas.

Devido às informações sobre estoques fornecerem uma vasta gama de dados referentes à distribuição, quantidade, custo de manutenção, custo de estocagem, entre outros, a utilização de sistemas robustos pode ser o diferencial na resolução dos problemas de gerenciamento de estoque. Uma forma de resolver estes tipos de problemas, é com a aplicação de métodos de otimização, os quais buscam determinar os valores máximos ou mínimos de uma determinada medida de desempenho, em geral descrita por função de várias variáveis (MARTINEZ; SANTOS, 1995). São vários os métodos de otimização, sendo um exemplo o método da programação dinâmica (PD).

A PD é uma técnica de tomada de decisão sequencial que considera a decomposição de um problema de otimização em subproblemas (estágios), sendo que cada estágio compreende um subproblema em geral de menor complexidade, e que utiliza uma relação recursiva que liga dinamicamente os diferentes estágios do problema de maneira que a solução ótima viável de cada estágio também é ótima e viável para o problema inicial (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Segundo Silva, Valladão e Homem-De-Mello (2019), a PD oferece vantagens em relação a outras técnicas de otimização, podendo tratar funções descontínuas, não diferenciáveis, não convexas, determinísticas ou estocásticas (CAMPELLO, 2002).

Hillier e Lieberman (2013) apresentam duas variações para a PD, sendo a programação dinâmica para problemas determinísticos (PDD) e a programação para problemas estocásticos (PDE). A PDD tem como objetivo determinar um valor para o estágio seguinte através do estado e método de decisão do estágio atual. Já a PDE, utiliza um coeficiente de probabilidade para o estado e o método de decisão, para calcular o estágio seguinte.

ABDULLAH et al. (2018), em seu trabalho, tenta resolver o problema de estoque de uma biblioteca. O método utilizado para resolução envolve a PDD como base de cálculo. Já Zhang et al. (2013) propõe uma programação dinâmica determinística e um outro algoritmo

para resolver o problema de otimização da operação do reservatório, que envolve muitos objetivos e restrições conflitantes.

Farahvash e Altiok (2011) utilizaram um modelo de programação dinâmica estocástica combinado com simulação para resolver um problema de inventário de vários períodos com compras de matéria-prima realizadas por meio de leilão reverso. Já Kim, Wu e Huang (2014) formulam um modelo de programação dinâmica estocástica e vários estágios para otimizar o custo logístico total de produtos perecíveis.

A empresa PERFIL Group, que desenvolve soluções integradas para processos térmicos em Joinville e atende diversos setores econômicos em suas operações, tem um sistema de controle de estoque baseado nas experiências dos gestores. Neste sentido, neste trabalho será considerado uma metodologia de estudo de caso para propor um método de controle de estoque para minimizar o custo total do processo de armazenagem e pedido, baseado em programação dinâmica determinística, utilizando uma implementação em linguagem C++.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em muitos setores da indústria, o estoque representa um dos maiores custos na cadeia de suprimentos (SIMCHI-LEVI et al., 2010). Como é o caso do custo de manutenção de estoques de uma empresa, que segundo Ballou (2006) pode representar de 20 a 40% do seu valor anualmente.

Simchi-Levi et al. (2010) ressaltam que, independentemente dos pontos positivos e negativos da presença do estoque em uma empresa, o objetivo da gestão de estoques eficiente na cadeia de suprimentos é ter o estoque certo no local certo para minimizar os custos do sistema ao mesmo tempo em que as necessidades dos clientes são satisfeitas. Por esta razão, administrar cuidadosamente o nível dos estoques é economicamente sensato para o bom desempenho de qualquer empresa (BALLOU, 2006).

Muitas soluções de gestão de estoques se preocupam em utilizar dados para otimizar determinados processos, como por exemplo minimizar a soma de um dado conjunto de custos. Estes dados, entretanto, não são contestados, apesar de poderem ser alterados em diversas situações. Um programa de melhoria contínua, por exemplo, poderia reduzir os custos logísticos, trazendo melhores resultados do que a simples otimização desses custos sem uma prévia contestação de seus valores (GARCIA et al., 2006).

As tecnologias digitais, advindas da Indústria 4.0, de um ponto de vista operacional, são propostas para reduzir o tempo de processamento, resultando em maior produtividade dos

processos produtivos e da quantidade de dados que é processada (DALENOGARE et al., 2018). No entanto, há falta de estudos que forneçam evidências empíricas sobre a forma como a implementação efetiva das tecnologias da Indústria 4.0 são adotadas nas empresas (FRANK et al, 2019).

Porém, um estoque muitas vezes conta com uma quantidade grande de dados e a aplicação de ferramentas convencionais para a aplicação da programação dinâmica neste problema pode se tratar de um trabalho árduo. Sendo assim, como forma de resolver um problema de gestão de estoques em uma empresa, utilizando a programação dinâmica determinística, será implementando um modelo em linguagem C++, com o intuito de automatizar etapas pelo uso ótimo de memória.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um algoritmo em linguagem C++ utilizando um método de programação dinâmica determinística para resolver o problema de gestão de estoque.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definir um horizonte de planejamento;
- Identificar as restrições do problema;
- Prever a demanda de cada período;
- Determinar a quantidade ideal a ser comprada e quando ser comprada em cada período;
- Aplicar conceito de estoque de segurança no problema proposto pela empresa;
- Reduzir o tempo de aplicação do modelo de programação dinâmica determinística;
- Definir uma fórmula de recorrência para calcular o estoque dinamicamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo trata-se assuntos relacionados à compreensão do tema deste trabalho, ressaltando a gestão de estoques dentro da logística e da cadeia de suprimentos, abrangendo o conhecimento sobre as ferramentas utilizadas para a gestão de estoque e aprofundando o conhecimento sobre programação dinâmica determinística e seus processos.

2.1 LOGÍSTICA

A logística teve seus primeiros indícios na Grécia Antiga, devido à distância das lutas, onde era necessário realizar uma espécie de estudo do abastecimento das tropas em relação aos armamentos, alimentos e medicamentos (GOMES; RIBEIRO, 2014). Para Novaes (2007), esse tipo de sistema foi utilizado em empresas durante um bom tempo, devido a alguns processos semelhantes que uma indústria precisa desempenhar, como transportar seus produtos das fábricas para os depósitos ou lojas e também providenciar e armazenar matéria-prima suficiente.

Essa visão mais antiga da logística se concentra apenas no transporte e na distribuição física, porém, atualmente ela pode envolver métodos e modelos que permitem localizar estruturas físicas (fábricas, depósitos, armazéns e centros de distribuição), gestão dos materiais e dos suprimentos e o planejamento, a programação e o controle da produção, além das atividades de distribuição (MARTINS; LAUGENI, 2005).

O conceito de logística segundo Gomes e Ribeiro (2014) é:

[...] o processo de gerenciar estrategicamente a aquisição, a movimentação e o armazenamento de materiais, peças e produtos acabados (e os fluxos de informação correlatos) por meio da organização e dos seus canais de marketing, de modo a poder maximizar as lucratividades presentes e futuras com o atendimento dos pedidos a baixo custo. (p.1).

Ballou (2006) afirma que a logística é responsável por tratar, além de bens materiais, com o fluxo de materiais, uma área que tende a receber oportunidades de melhorias. Essa definição constatada pelo autor sugere que a logística é parte do processo da cadeia de suprimentos, e não do processo inteiro, pois faz parte das atividades importantes para a disponibilização de bens e serviços aos consumidores quando e onde estes quiserem adquiri-los.

A logística é em essência uma orientação e uma estrutura de planejamento que visam criar um único plano para o fluxo de produtos e informações por meio de um negócio. A gestão da cadeia de suprimentos baseia-se nessa estrutura e busca conquistar articulação e coordenação entre os processos de outras entidades em consideração, ou seja, fornecedores, clientes e a organização em si (CHRISTOPHER, 2018).

Simchi-Levi et al. (2010) afirma que os mercados globais são responsáveis por fortalecer a competição, causada pelo aparecimento de produtos com ciclo de vida curtos e pelo aumento da expectativa dos clientes. Novaes (2007) explica que de um lado, os produtos vão se aprimorando ao longo do tempo, incorporando novos elementos e novas tecnologias, numa dinâmica nunca antes constatada na oferta de produtos.

Essa situação força as empresas do setor de produção a investir e concentrar esforços no planejamento da cadeia de suprimentos (SIMCHI-LEVI et al., 2010). Se planejamento e controle é o processo de conciliar demanda e suprimento, então a natureza das decisões tomadas para planejar e controlar uma operação produtiva dependerão tanto da natureza da demanda quanto da natureza do suprimento dessa operação (SLACK et al., 2009).

Ballou (2006, p. 29) define a Cadeia de Suprimentos como: “[...] um conjunto de atividades funcionais (transportes, controle de estoques, etc.) que se repetem inúmeras vezes ao longo do canal pelo qual matérias-primas vão sendo convertidas em produtos acabados, aos quais se agrega valor ao consumidor”.

Garcia et al. (2006) cita que as empresas vêm buscando métodos para realizar a gestão de estoque, com o intuito de obter vantagens competitivas no mercado. Ballou (2006) afirma que as atividades de estocagem e de manuseio de materiais representam 25% das despesas logísticas, delas excluídos os custos de manutenção dos estoques. Essas informações evidenciam a importância da análise dos estoques em uma cadeia de suprimentos.

2.1.1 Estoques

O estoque é definido como a acumulação armazenada de recursos materiais em um sistema de transformação, que pode ser descrito como qualquer recurso armazenado (SLACK et al., 2009). Segundo Martins e Alt (2009) o estoque é visto como um recurso produtivo que no final da cadeia de suprimentos criará valor para o consumidor final.

Para Wanke (2011) o estoque aparece na cadeia de suprimentos sob diversos formatos, sendo denominados matérias-primas, produtos semiacabados e produtos acabados. Podem

apresentar também diferentes atributos que são normalmente denominados de características do produto e da demanda.

2.1.1.1 Tipos de estoque

O desequilíbrio entre as taxas de fornecimento e de demanda em diferentes pontos de qualquer operação leva a diferentes tipos de estoque (SLACK et al., 2009). Devido aos estoques constituírem uma parcela considerável dos ativos da empresa, eles recebem um tratamento minucioso em relação a seus custos (MARTINS; ALT, 2009).

Dias (2010) sintetiza os principais tipos de estoques encontrados em uma empresa industrial em matérias-primas, produtos em processo, produtos acabados, peças de manutenção e materiais auxiliares. Já Wanke (2011) cita que em uma fábrica, matérias primas, produtos em processamento, embalagens, produtos acabados, peças de reposição e materiais de escritório são exemplos de produtos que podem ser estocados. Para Ballou (2006) existem cinco categorias distintas em relação aos tipos de estoques, sendo eles os estoques no canal, estoque de especulação, estoque cíclico, estoque de segurança e o estoque obsoleto.

Os estoques de canal, para Ballou (2006), são o estoque de itens em trânsito entre os elos do canal de suprimentos, onde a movimentação é lenta ou as distâncias entre os elos são longas. Esse estoque existe pois não é possível realizar o transporte instantâneo do material entre o ponto de fornecimento e o ponto de demanda (SLACK et al., 2009).

O estoque de especulação tem como função armazenar produtos que tenham preços variáveis durante o ano, com intuito de utilizá-los o ano todo (BALLOU, 2006). Também é conhecido como estoque de antecipação e tem foco na demanda sazonal, ou seja, quando as flutuações da demanda são significativas, mas relativamente previsíveis (SLACK et al., 2009).

O estoque cíclico, segundo Ballou (2006), são os estoques necessários para suprir a demanda média durante o tempo transcorrido entre sucessivos reabastecimentos.

O estoque de segurança é utilizado para suprir a variabilidade na demanda e nos prazos de reposição, pelo acréscimo do estoque normal necessário para suprir as condições da demanda média e do prazo de entrega médio (BALLOU, 2006). Slack et al. (2009) completa que o estoque de segurança existe pelo fato de que em uma determinada operação, nunca é possível prever perfeitamente a demanda, mesmo quando tenha boa ideia de seu nível mais provável.

E por fim, existe o estoque obsoleto, que é caracterizado por aqueles produtos que durante os processos da cadeia de suprimentos se deterioram, ficam ultrapassados ou acabam

sendo perdidos ou avariados. Segundo Ballou (2006) é indispensável a adoção de precauções especiais para minimizar o seu volume.

2.1.1.2 Análise sobre o uso de estoques

Uma das principais discussões entre diversos autores quando se trata de estoques são os benefícios e desvantagens da utilização de estoque. Wanke (2011) cita que as empresas tem buscado cada vez mais garantir uma disponibilidade de produto com o menor nível de estoque possível.

Para Slack et al. (2009) o uso de itens mantidos em estoque pode ser arriscado devido ao custo que eles causam pelo capital estagnado do produto parado, pelo risco de deterioração e de se tornar obsoleto e também pelo espaço valioso que ocupam na produção. Por outro lado, eles proporcionam certa segurança em um ambiente complexo e incerto, e assim, ser uma garantia para o caso de consumidores ou programas de produção os demandarem.

Garcia et al. (2006) cita que baixos níveis de estoque podem causar perdas de economias de escala e altos custos de falta de produtos, porém o uso dos estoques também representa diversos custos operacionais. Por outro lado, críticos contestam o uso de estoques, por se tratar de um desperdício em relação a absorção de capital que poderia ser utilizado para incrementar a produtividade e competitividade (BALLOU, 2006).

Ballou (2006) também aborda os benefícios do estoque de melhorar o serviço do cliente, em relação a disponibilidade dos produtos ou serviços e também discute que embora a manutenção de estoques implique em custos adicionais, sua utilização acaba indiretamente reduzindo os custos operacionais em outras atividades do canal de suprimentos de tal modo que compensar os custos de manutenção.

Ao analisar os níveis de estoque, é possível identificar semelhanças em relação às vantagens e desvantagens da utilização de estoque. O ponto principal abordado nas literaturas estudadas é em relação aos problemas relacionados a custos que podem prejudicar a gestão de estoques.

2.1.1.3 Custos de estoques

Em uma empresa, grande parte das operações da cadeia de suprimentos tem interesse em manter seus custos baixos o quanto for possível, desde que compatíveis com os níveis de qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade que seus consumidores demandam

(SLACK et al., 2009). Simchi-Levi et al. (2010) completa que em muitos setores da cadeia de suprimentos, o estoque é um dos maiores custos logísticos. Por esta razão, é notável o interesse das empresas em diminuir os custos dentro dos estoques.

Na tomada de decisão de quanto comprar, os gerentes de produção tentam identificar os tipos de custos que serão afetados por sua decisão (SLACK et al., 2009). Desta forma busca-se inicialmente caracterizar os tipos de custo de estoque. Ballou (2006) organiza em três classes gerais de custos que são importantes para a determinação da política de estoque:

- os custos de aquisição, que são relacionados a reposição de estoque, sendo eles os custos de processamento, preparação, transmissão, manutenção e ao pedido de compra;
- os custos de manutenção, que são aqueles resultantes do armazenamento durante um determinado período, sendo subdivididos em custos de espaço, custo de capital, custo de serviço e custos de risco de estoque;
- os custos de falta de estoques, que ocorrem quando um pedido não pode ser atendido por um determinado estoque que normalmente é encaminhado, podendo ser classificados como vendas perdidas e pedidos atrasados.

Já Slack et al. (2009) caracteriza os custos de estoque em custo de alocação de pedido, custo de desconto de preços, custos de falta de estoque, custo de capital de giro, custos de armazenagem, custos de obsolescência e os custos de ineficiência de produção.

Para Dias (2010) todo e qualquer armazenamento de material gera algum tipo de custo. Existem duas variáveis principais que aumentam esses custos, que são a quantidade em estoque e o tempo de permanência em estoque. A movimentação de grandes quantidades de estoque é afetada, sendo necessária um maior uso de pessoas, ou então, com o uso de equipamentos, que tem por consequência a elevação deste custo. E conforme o volume de estoque for menor, este efeito é exatamente ao contrário, com ressalvas ao uso de materiais com grandes dimensões.

2.1.1.3.1 Custos de Armazenagem

Entre os tipos de custos que afetam de perto a rentabilidade, está o custo decorrente da estocagem e armazenamento dos materiais que, para Dias (2010), merece atenção. A alta competitividade veio confirmar a importância da estocagem, e isso se pode demonstrar, com relações aos diversos aspectos do problema.

Para fazer o cálculo do custo de armazenagem de um determinado produto, será utilizado os métodos propostos por Dias (2010) na Equação (1), em que Q é a quantidade de material em estoque no tempo considerado, P é o preço por unidade do material, I a taxa de armazenagem, que normalmente é expressa em porcentagem do custo de cada unidade. E por fim, T é o tempo considerado de armazenagem.

$$\text{Custo de armazenagem} = \frac{Q}{2} \times T \times P \times I \quad (1)$$

2.1.1.4 Gestão de estoques

A gestão de estoque segundo Wanke (2011) tem se tornado cada vez mais importante para a logística e o gerenciamento da cadeia de suprimentos nos meios acadêmicos e empresariais. Sua gestão em ambientes complexos, normalmente os meios empresariais, pode não ser um processo trivial, e assim pode acarretar impactos significativos nos níveis de serviço ao cliente e nos custos totais.

O principal objetivo da gestão de estoque eficiente em uma cadeia de suprimentos, segundo Simchi-Levi et al. (2010), é ter o estoque certo no local certo para minimizar os custos do sistema ao mesmo tempo em que as necessidades dos clientes são satisfeitas. Já para Martins e Alt (2009), o estoque transportado no momento e na quantidade desejada, é facilitado por meio de uma administração eficaz dos estoques.

Os estoques devem estar de acordo com seu próprio mecanismo ou abordagem de controle. Infelizmente, a definição destes mecanismos é difícil, porque as estratégias de produção distribuição e controle de estoques que reduzem os custos globais do sistema e melhoram o nível de serviço precisam considerar as interações entre os diversos níveis da cadeia de suprimentos. Contudo, as vantagens de determinar esses mecanismos de controle de estoque podem ser muitas (SIMCHI-LEVI et al., 2010).

2.1.2 *Métodos e ferramentas de gestão de estoque*

Um modelo de gestão de estoque engloba uma quantidade de decisões com o intuito de coordenar a demanda existente, em questão de tempo e espaço, com a oferta de produtos ou materiais, de modo que os objetivos de custo e nível de serviço sejam alcançados. A escolha de

um modelo é feita empiricamente, que pode envolver, por exemplo, o uso de simulações, análises de cenários e de custos (WANKE, 2011).

Para Gomes e Ribeiro (2014) o controle de estoques deve ser realizado em conjunto com a administração de transportes e armazéns e deve-se optar pela redução dos níveis de estoques devido a diversos fatores. Por esta razão, serão apresentados na próxima seção, ferramentas e/ou métodos de gestão de estoque, como: previsão de demanda; curva ABC; avaliação de estoque; giro e cobertura de estoque; níveis de estoque; tecnologia da informação; pesquisa operacional; e programação dinâmica.

2.1.2.1 Giro e cobertura de estoque

O giro de estoque, também denominado de rotatividade de estoque, é a relação entre o consumo anual e o estoque médio do item (CHIAVANETO, 2006). Para medir a rotatividade de giro, é utilizado o índice de rotatividade (IR), mostrado na Equação (15).

$$IR = \frac{\textit{Consumo médio no período}}{\textit{Estoque médio}} \quad (15)$$

Chiavaneto (2006) define que o IR representa o número de vezes que o estoque gira no período considerado em relação ao consumo médio do item. Esse período pode ser um dia, um mês ou um ano. Oliveira e Melo (2015) afirma que este dado é muito importante para a tomada de decisões relacionadas a estoques e estratégia de venda, pois permite ao gestor saber em quais produtos deve-se aumentar ou diminuir os investimentos.

Chiavaneto (2006) também mostra que invertendo a equação para o cálculo do IR, pode-se obter a chamada taxa de cobertura, que indica o número de unidades de tempo, em dias, meses ou anos, que o estoque médio será suficiente para cobrir a demanda média. A fórmula da cobertura de estoques é mostrada na Equação (16).

$$\textit{Taxa de cobertura} = \frac{\textit{Estoque médio}}{\textit{Consumo médio no período}} \quad (16)$$

A partir do resultado da Equação (16) será possível saber em quanto tempo o estoque deixará de atender a demanda e assim avaliar se a empresa terá capacidade de atender a determinada meta (OLIVEIRA; MELO, 2015). Segundo Ballou (2006), a utilização do giro de

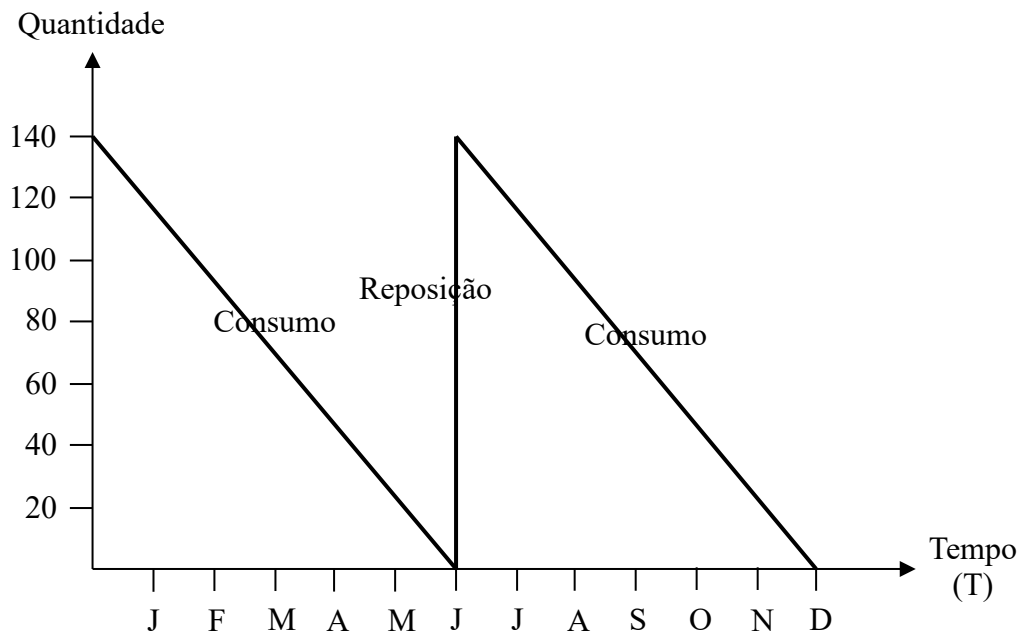
estoques faz com que os estoques variem diretamente com as vendas. Isto constitui uma desvantagem, uma vez que normalmente esperamos que os estoques aumentem a uma taxa decrescente em função de economias de escala.

2.1.2.2 Níveis de estoque

O dimensionamento do estoque depende da previsão de consumo do material. Ao dimensionar o estoque pretende-se atender a uma parte do consumo previsto e não à sua totalidade, pois o consumo não ocorre de uma só vez, mas ao longo de um período de tempo. Assim, existe uma quantidade necessária e uma quantidade mínima atendida pelo estoque. Daí ser preciso uma certa rotatividade ou de estoque (CHIAVANETO, 2006).

A representação de entrada e saída de um item dentro de um sistema de estoque pode ser representada por um gráfico, em que relaciona um período de tempo, expressa pela variável T e a quantidade em unidades desta peça em estoque no intervalo de tempo (DIAS, 2010). Este tipo de gráfico é conhecido como gráfico dente de serra, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Representação do gráfico dente de serra



Fonte: Adaptado Wanke (2011, p. 157).

O gráfico de dente de serra tende a ser cíclico se não houver alterações em relação ao consumo durante um período de tempo T ; falhas administrativas que possam provocar falha ao

solicitar compra; atraso de peças por parte do fornecedor; rejeição de entregas do fornecedor por parte do setor de qualidade. Porém, essas quatro premissas em ambientes reais não ocorrem com frequência (DIAS, 2010).

Dias (2010) diz que se estas ocorrências tendem a acontecer no ambiente empresarial, deve-se criar um sistema que absorva essas eventualidades, para diminuir o risco de zerar o estoque durante esse período de tempo. Sendo assim, diversas empresas acabam adotando o estoque de segurança em sua gestão de estoque.

2.1.2.2.1 *Estoque de segurança*

O estoque de segurança, pela definição de Dias (2010), é a quantidade mínima que deve existir em estoque, que se destina a cobrir eventuais atrasos no ressuprimento ou demandas não previstas. O estabelecimento de uma margem de segurança ou estoque mínimo é o risco que a companhia está disposta a assumir com relação à ocorrência de falta de estoque.

Em operações que envolvam múltiplos períodos, “a determinação dos estoques de segurança deve considerar, além da probabilidade ótima de não faltar produto, a variabilidade (desvio-padrão) da demanda no tempo de resposta e a distribuição de probabilidade da demanda no tempo de resposta.” (WANKE, 2011, p. 156).

Martins e Laugeni (2005) definem que a função dos estoques de segurança é proteger o sistema quando a demanda e o tempo de reposição variam ao longo do tempo, e ainda, apresentam um método para o cálculo do estoque de segurança, para problemas que envolvem tempo de reposição de estoque fixo e para uma demanda que apresente uma distribuição normal de dados.

O estoque de segurança é definido na Equação (17), em que Z é o coeficiente da distribuição normal em função do nível de serviço desejado, que segue os valores da Tabela 1, L é o *lead time* do pedido, ou seja, o tempo de reposição do produto, σ_d é a variância do desvio padrão da demanda em relação ao um determinado período L .

$$\text{Estoque de segurança} = Z \times \sigma_d \times \sqrt{L} \quad (17)$$

Tabela 1 - Fator de serviço em relação ao nível de serviço (%)

Nível de Serviço	Fator de Serviço (Z)
50%	-
60%	0,254
70%	0,525
80%	0,842
85%	1,037
90%	1,282
95%	1,645
96%	1,751
97%	1,880
98%	2,055
99%	2,325
99,9%	3,100
99,99%	3,620

Fonte: Adaptado de Martins e Laugeni (2005, p. 276).

Martins e Laugeni (2005) definem na Equação (18) como é feito o cálculo do desvio padrão em relação a um determinado período L , em que D_i é a demanda de um determinado item no período i , \bar{D} é o valor da demanda média e n é o número de períodos a serem calculados.

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum(D_i - \bar{D})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

Martins e Laugeni (2005) também sugerem uma aplicação do estoque de segurança em casos onde a demanda e o *lead time* de reposição dos itens são variáveis, possibilitando aplicar o estoque de segurança para problemas onde o *lead time* do pedido pode variar de período a período. Para isso, é utilizar um novo parâmetro, sendo o desvio padrão do *lead time*.

2.2 PREVISÃO DE DEMANDA

Prover a capacidade produtiva para atender a demanda atual e futura é uma responsabilidade fundamental da administração da produção. Para Slack et al. (2009) obter o equilíbrio adequado entre capacidade e demanda gerará satisfação para clientes de forma eficaz em custo. Obtendo o equilíbrio errado, deixará de atender a demanda e terá custos excessivos.

A previsão logística, ou a previsão de demanda abrange tanto a natureza espacial quanto a natureza temporal da demanda, a extensão de sua variabilidade e seu grau de aleatoriedade (BALLOU, 2006). Para Dias (2010) a previsão de consumo ou da demanda

permite estabelecer estimativas futuras dos produtos, estabelecendo, portanto, quais produtos, quanto desses produtos e quando serão comprados pelos clientes.

Devido ao seu caráter de previsão, que pode ser aplicada aos estoques, Oliveira e Melo (2015) comentam que uma organização não deve investir todo o seu capital em materiais apenas para garantir a continuidade do processo, tampouco, deve deixar que eles faltem.

Dias (2010) classifica as técnicas de previsão de demanda em três grupos:

- a Projeção, que são aquelas que admitem que o futuro será repetição do passado ou as vendas evoluirão no tempo futuro da mesma forma do que no passado;
- a Explicação, que procuram explicar as vendas do passado mediante leis que relacionem as mesmas com outras variáveis cuja evolução é conhecida ou previsível; e por fim;
- a Predileção, que permite que funcionários experientes e conhecedores de fatores influentes nas vendas e no mercado estabelecem a evolução das vendas futuras.

O objetivo do especialista em previsão, segundo Krajewski, Ritzman e Malhorta (2009), é desenvolver previsões úteis a partir de informações disponíveis, com a técnica que é apropriada para os diferentes padrões de demanda. Dois tipos gerais de técnicas de previsão usados para prever a demanda são métodos qualitativos e métodos quantitativos.

No que se refere ao método quantitativo, Martins e Werner (2014) apud Albrecht et al. (2019) explicam que é necessário o registro de dados passados para realizar a previsão da demanda, quando examinam o comportamento da demanda ao longo de um determinado tempo a fim de identificar seu comportamento futuro.

Segundo Krajewski et al. (2009), quando o método quantitativo trata de análise de séries temporais históricas, destacam-se os métodos para previsão de demanda: de média móvel simples; média móvel ponderada; suavização exponencial e suavização exponencial com tendência, descritas a seguir. Também será descrito alguns métodos de cálculo de erro de previsão, para futuras análises de desempenho da aplicação.

2.2.1 Média móvel simples

Krajewski et al. (2009) apresenta o método da média móvel simples (MMS) como o modelo “usado para estimar a média de uma série temporal de demanda e, dessa forma, remove os efeitos da flutuação aleatória”. (p. 444). A cada período, a observação mais antiga é

substituída pela mais recente, calculando-se então uma nova média (MORETTIN; TOLOI, 2006).

A técnica, segundo Morettin e Toloi (2006), consiste em calcular a média aritmética das n observações mais recentes, e depois usá-lo como previsão para o próximo período. E para Krajewski et al. (2009), como demonstrado no cálculo da Equação (2), o cálculo do próximo período, depois que a demanda for conhecida, a demanda mais antiga da média anterior é substituída pela demanda mais recente, e a média é recalculada, de modo que, a média se mova em relação aos períodos de tempo.

$$F_{t+1} = \frac{\text{soma das últimas } n \text{ demandas}}{n} = \frac{D_t + D_{t-1} + D_{t-2} + \dots + D_{t-(n+1)}}{n} \quad (2)$$

Em que D_t é o valor da demanda real no período t , n o número total de períodos da média e F_{t+1} a previsão para o período $t + 1$.

Com o método da média móvel, a previsão da demanda do próximo período é igual à média calculada no fim do período atual.

Para qualquer método de previsão, é importante medir a precisão das previsões, que para este caso é a diferença entre a demanda real no período t e a previsão no período t , demonstrado na Equação (3) (KRAJEWSKI et al., 2009).

$$E_t = D_t - F_t \quad (3)$$

Morettin e Toloi (2006) cita que o método da MMS apresenta vantagens em relação a sua aplicação simples, e podendo ser utilizada para um número pequeno de observações. Porém, apresenta desvantagens em relação a que só se deve ser aplicada para prever séries estacionárias e ter a necessidade de armazenar pelo menos n observações.

2.2.2 Média móvel ponderada

No método de média móvel ponderada (MMP), cada demanda histórica da média pode ter seu próprio peso, sendo a soma dos pesos igual a 1 (KRAJEWSKI et al., 2009). Para calcular uma MMP de três períodos, sendo atribuído aos períodos pesos diferentes p_1 , p_2 e p_3 , sendo que a soma dos pesos deve ser igual a 1, conforme a Equação (4), e a média é obtida multiplicando os pesos pelo valor do período correspondente, segundo a Equação (5).

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (4)$$

$$F_{t+1} = p_1 D_t + p_2 D_{t-1} + p_3 D_{t-2} \quad (5)$$

A vantagem do método de média móvel ponderada é a possibilidade de enfatizar certos períodos em relação aos outros, sendo mais responsiva a alterações da média básica da série de demanda que a previsão média de média móvel simples (KRAJEWSKI et al., 2009).

Krajewski et al. (2009) cita que “O método de média móvel ponderada tem as mesmas deficiências que o método de média móvel simples: os dados devem ser retidos por n períodos de demanda para permitir o cálculo da média para cada período.” (p. 446). O modelo na prática, segundo Morettin e Tolo (2006), não é utilizado frequentemente, pois o método da Suavização Exponencial Simples descrito a seguir, apresenta as vantagens da média móvel e outras, o que o torna mais atraente.

2.2.3 Suavização exponencial simples

Krajewski et al. (2009) defini o modelo de Suavização Exponencial Simples (SES) como um método sofisticado de média móvel ponderada que calcula a média de uma série temporal dando às demandas recentes mais peso que às anteriores. Morettin e Tolo (2006) explica que, pela particularidade de o modelo dar mais peso as demandas recentes, ele acaba eliminando uma das desvantagens vistas no método da MMS.

Ao contrário do método de média móvel ponderada, que requer n períodos, de demanda anterior e n pesos, a suavização exponencial requer apenas três variáveis: D_t , que é a demanda anterior e n pesos, a suavização exponencial requer apenas três variáveis: D_t , que é a demanda para esse período; F_t , que é a previsão do último período; e um parâmetro suavizador α , que tem um valor entre 0 e 1. Esses dados estão expressos na Equação (6) (KRAJEWSKI et al., 2009).

$$F_{t+1} = F_t + \alpha(D_t - F_t) \quad (6)$$

Valores de α mais altos, segundo Krajewski et al. (2009), enfatizam níveis recentes de demanda e têm como resultado previsões mais responsivas a alterações na média básica. Morettin e Tolo (2006) completa que quanto menor for o valor de α , mais estáveis serão as previsões finais, uma vez que a utilização de baixo valor de α implica que pesos maiores às

observações passadas. Em geral, quanto mais aleatória for a série estudada, menores serão os valores da constante de suavização.

A suavização exponencial requer uma previsão inicial para ser iniciada. Pode ser obtida pela demanda do último período ou, se há alguns dados históricos disponíveis, calcular a média de vários períodos de demanda recentes (KRAJEWSKI et al., 2009). Já Brown (1962) explica que “um procedimento mais objetivo é selecionar o valor que fornece a ‘melhor previsão’ das observações obtidas [...]” (apud MORETTIN; TOLOI, 2006, p 91).

O método apresenta vantagens em relação à facilidade de aplicação e pela flexibilidade permitida pela variação da constante de suavização α . Porém, a principal desvantagem encontrada com a aplicação do modelo é determinar o valor mais apropriado para α (MORETTIN; TOLOI, 2006).

2.2.4 Suavização exponencial com tendência

As técnicas vistas anteriormente não são adequadas para analisar séries temporais que apresentam tendências. A tendência em uma série temporal, segundo Krajewski et al. (2009), é um acréscimo ou decréscimo sistemático na média da série ao longo do tempo. O cálculo da estimativa atual de tendência é feito pela diferença entre a média da série calculada no período corrente e a média calculada no período anterior, sendo que para tendências de longo prazo, pode-se calcular a média das estimativas atuais.

O método de SES, quando aplicado a uma série que apresenta tendência, fornece previsões que interferem continuamente nos valores reais de previsão. Sendo assim, o método da Suavização Exponencial com Tendência (SET) pode evitar esse erro sistemático (MORRETIN, 2004). Krajewski et al. (2009) aponta que as estimativas, tanto para a média como para a tendência, são suavizadas, o que requer duas constantes de suavização e para cada período, é calculado a média e a tendência, como mostrado nas equações.

$$A_t = \alpha D_t + (1 - \alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad (7)$$

$$T_t = \beta(A_t - A_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (8)$$

$$F_{t+1} = A_t + T_t \quad (9)$$

A Equação (7) representa o valor da média suavizada exponencialmente A_t da série no período t . A Equação (8) representa a média suavizada exponencialmente da tendência T_t no período t . E por fim, a Equação (9) representa a previsão F_{t+1} para o período $t + 1$. Destaca-

se que: α é o parâmetro de suavização para a média, com um valor de 0 e 1; β é o parâmetro de suavização para a tendência, com um valor de 0 e 1; e D_t , com já visto anteriormente, representa a demanda para o período t (KRAJEWSKI et al., 2009).

Krajewski et al. (2009) propõe uma previsão para períodos além do período seguinte, feita pela multiplicação da estimativa de tendência T_t , pelo número de períodos adicionais a serem previstos, e depois, somar com o resultado da média corrente A_t . O método para encontrar as constantes de suavização α e β é análogo ao realizado anteriormente pela SES (MORETTIN; TOLOI, 2006).

O método de suavização exponencial ajustado à tendência tem a vantagem de poder ajustar a previsão a alterações na tendência. Entretanto, quando a tendência é variável, quanto mais adiante projetamos a estimativa de tendência, mais frágil a previsão se torna (KRAJEWSKI et al., 2009). Outra desvantagem é a dificuldade em relação ao cálculo das duas constantes de suavização α e β (MORETTIN; TOLOI, 2006).

2.2.5 Métodos de cálculo de erro de previsão

Quando diversas metodologias são aplicadas para encontrar um resultado de um problema, aplicar modelos analíticos podem auxiliar na escolha do resultado mais satisfatório para um determinado cenário. O uso de indicadores para medir o desempenho de uma previsão de demanda, segundo Staudt (2011), é indicado para gestores que queriam mensurar sua eficácia. A acuracidade da previsão é obtida através dos erros de previsão.

Obter a melhor medida de erro pode depender da situação em que se está inserido o processo de previsão e também do número de séries temporais analisadas. A utilização de diferentes medidas de acurácia é uma alternativa para compensar os defeitos das diferentes medidas. A acuracidade da previsão é obtida através dos erros de previsão, e para isso, Staudt (2011) destaca 4 métodos em seu estudo para o cálculo desses erros, que são descritos como: erro médio; erro médio absoluto; erro médio quadrado; e erro percentual absoluto médio.

Primeiramente, deve-se entender do que se trata matematicamente o erro da previsão de demanda. O erro em uma previsão se dá pela diferença entre o valor previsto em determinado período (P_t) em relação ao valor observado (O_t), que também pode ser descrito como o valor real. A Equação (10) expressa esta relação, sendo que se o valor do erro for positivo, o valor da previsão foi maior que o real, se for negativo, menor que o real.

$$Erro = P_t - O_t \quad (10)$$

O método de cálculo de acurácia do erro médio (ME), é obtido através da média da soma dos erros em todos os períodos de previsão, conforme a Equação (11). Como visto anteriormente no cálculo da Equação (10), o erro pode ter tanto caráter negativo quanto positivo. Sendo assim, ao fazer o somatório destes valores, muitos destes erros acabam se cancelando, e isso implica em um valor menor, porém não tão útil para a avaliação de diferentes métodos.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t - O_t) \quad (11)$$

Em contra partida, o erro médio absoluto (MAD) utiliza o mesmo método da Equação (10), mas também, calcula a média do valor absoluto do erro, conforme a Equação (12). A partir dela é possível analisar qual foi a discrepância atingida para erros maiores ou menor em relação ao valor observado.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |P_t - O_t| \quad (12)$$

O erro médio quadrado (MSE) utiliza do valor quadrado dos erros de previsão, conforme Equação (10), para evitar o cancelamento causado pelos números negativos e positivos, pois um número elevado ao quadrado sempre vai ser positivo. Sendo assim, a média é calcula pelo erro ao quadrado, conforme a Equação (13).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t - O_t)^2 \quad (13)$$

E por fim, o erro percentual médio absoluto (MAPE) este modelo segue a neutralização propostas pelas Equações (12) e (13), porém, utiliza-se do valor final de erro em porcentagem, através da divisão pelo valor observado (O_t). O valor em unidades de porcentagem facilita a comparação com os outros métodos, pela facilidade de interpretação do erro em valores percentuais. Porém, se os valores de previsão forem iguais a zero, o erro fica inviável, tendendo ao infinito, conforme a Equação (14).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{P_t - O_t}{O_t} \right| \quad \text{para } O_t \neq 0 \quad (14)$$

2.3 TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

A tecnologia da informação, segundo Bertaglia (2016), é importante em atividades e funções pertinentes da cadeia de abastecimento pois permite a integração de processos, dados e aplicações com clientes e fornecedores. É utilizada para melhorar o desempenho das atividades da empresa, e por consequência, apoiar a reengenharia dos processos empresariais (BAZZOTTI; GARCIA, 2006).

Bazzotti e Garcia (2006) citam que a tecnologia da informação oferece recursos tecnológicos e computacionais para a geração de informações. Existem no mercado ferramentas sofisticadas para lidar com a redução de custos na cadeia de produção, seja na estratégia e nas capacidades de produção, níveis de estoque e fluxo de processos, sendo que a aplicação destas ferramentas não está apenas vinculada a funções apenas operacionais (BERTAGLIA, 2016).

Portanto, a tecnologia da informação serve para designar o conjunto de recursos tecnológicos e computacionais para a geração e uso da informação e está fundamentada em componentes como hardware, software, sistemas de telecomunicações e gestão de dados e informações (BESSA; CARVALHO, 2005).

Segundo Bowersox (2001) apud Bessa e Carvalho (2005), os sistemas de informações funcionam como uma ligação entre atividades criando uma integração entre processos. E sendo a tomada de decisão um nível de funcionalidade deste processo, diversos modelos matemáticos podem ser utilizados para analisar de forma rigorosa os processos de tomada de decisão, tanto em níveis estratégico, tático ou operacional (RAYMUNDO; GONÇALVES; RIBEIRO, 2015).

2.3.1 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional (PO), segundo Raymundo et al. (2015) é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas. A PO tenta solucionar os conflitos de interesses entre as unidades da organização da

maneira que seja a melhor solução (ou solução otimizada) para a organização como um todo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Os estudos da Pesquisa Operacional abrangem conceitos relacionados a modelagem de problemas e métodos de solução. Hillier e Lieberman (2013) abordam vários métodos de resolver modelos matemáticos de otimização, sendo os mais pertinentes à tomada de decisões relacionadas à gestão de estoques a programação linear, programação não linear, programação inteira e programação dinâmica (PD).

2.3.2 Programação dinâmica

Ahrens (1992) define a programação dinâmica como:

[...] um procedimento computacional numérico que permite a identificação do ‘melhor’ sequenciamento de decisões, durante um determinado horizonte de planejamento, através da decomposição de um problema complexo e de grandes dimensões, em subproblemas menores, interrelacionados e interdependentes, organizados em múltiplos estágios. (p. 64).

Um problema de programação dinâmica, segundo Kligerman (1992), é dividido em estágios, onde se busca a melhor decisão em cada estágio, através da otimização em cada etapa baseado no conhecimento prévio de todas as possibilidades futuras. Sendo assim, para este método funcionar, é necessário que seja estudado do sentido contrário, do último estágio ao primeiro. Ahrens (1992) explica que se “faz uso de um procedimento numérico de análise objetivando a identificação da estratégia ótima a ser utilizada, maximizando ou minimizando uma função-objetivo previamente elaborada.” (p. 64).

O método, segundo Campello (2002), é baseado no Princípio de Otimalidade de Richard Bellman, que explica as propriedades de uma trajetória ótima: “quaisquer que tenham sido os passos anteriores, a trajetória remanescente deverá ser uma trajetória ótima com respeito ao estado resultante dos passos anteriores [...]” (p. 9).

Este método tem a particularidade de não ser definido em apenas um único algoritmo. Hillier e Lieberman (2013) citam que ao contrário da programação linear, não existe uma formulação matemática padrão do problema de programação dinâmica. Já Ahrens (1992), explica que é necessário que sua modelagem seja específica para a natureza, estrutura e características peculiares de um problema específico.

Hillier e Lieberman (2013) definem as características básicas que esboçam os problemas de programação dinâmica, sendo:

- Estágios: o problema pode ser dividido em estágios, nos quais uma decisão sobre a política a ser adotada é necessária a cada estágio;
- Estados: cada estágio apresenta estados associados ao início desse estágio;
- Decisão sobre a política a ser adotada: o efeito da decisão sobre a política a ser adotada a cada estágio é de transformar o estado atual em um estado associado ao início do estágio seguinte;
- Procedimento de resolução: O procedimento de resolução é desenhado para encontrar uma política ótima para o problema como um todo, isto é, estender a fórmula de decisão sobre a política ótima em cada estágio para cada um dos estados possíveis;
- Princípio da otimalidade: a decisão imediata ótima depende somente do estado atual e não de como se chegou lá, definindo uma independência de decisão em cada estágio;
- Início da resolução: o procedimento de resolução começa encontrando a política ótima para o último estágio;
- Recursividade: há uma relação recursiva que identifica a política ótima entre estágios;
- Análise: quando a relação recursiva é utilizada, o procedimento de resolução começa no final e vai voltando para trás, estágio por estágio, cada vez encontrando a política ótima para determinado estágio, até ela encontrar a política ótima começando no estágio inicial.

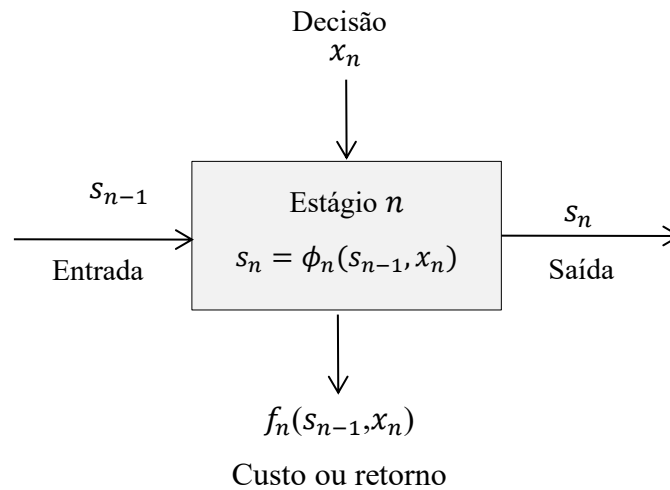
Hillier e Lieberman (2013) também definem uma notação para as variáveis (Figura 2) que serão levadas em consideração para a explicação dos modelos seguintes, sendo:

- N : número de estágios;
- n : identificação do estágio atual;
- s_n : estado atual para o estágio n ;
- x_n : variável de decisão para o estágio n ;
- x_n^* : valor ótimo de x_n para dado s_n ;
- $f_n(s_n, x_n)$: contribuição (retorno ou custo) dos estágios $n = 1, 2, \dots, N$ à função objetivo que mede a eficiência com que as entradas (s_{n-1}, x_n) são transformadas em saídas;

- $\phi_n(s_{n-1}, x_n)$: é a transformação (ou função de recorrência) do estágio n no estágio $n + 1$, que expressa as saídas s_n como uma função de entradas s_{n-1} . Ou seja $s_n = \phi_n(s_{n-1}, x_n)$;
- $f_n^*(s_n)$: apresenta equivalência com a expressão $f_n(s_n, x_n^*)$, ou seja, contribuição ótima no estágio n quando a decisão imediata é decisão ótima x_n^* .

A Figura 2, apresenta esquematicamente as variáveis e parâmetros descritas acima em forma de fluxograma.

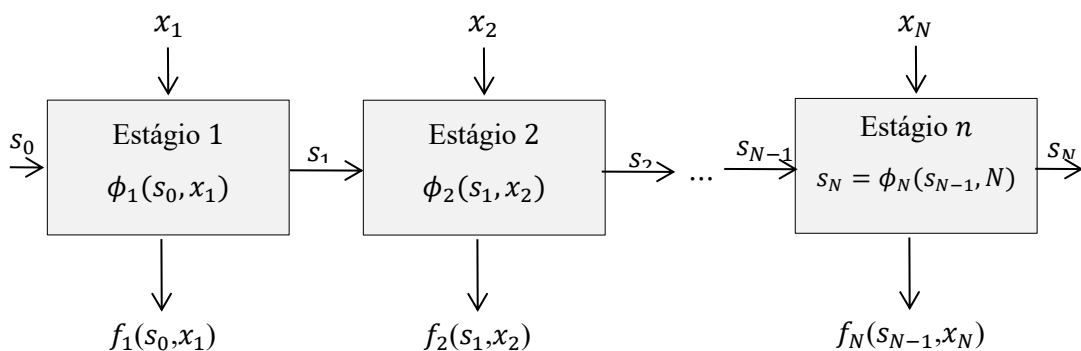
Figura 2 – Esquema caso genérico de um estágio n



Fonte: Adaptado de Colin (2015, p. 239).

A Figura 3 apresenta a generalização do conceito para o caso de N estágios de decisão discretos em série.

Figura 3 - Esquema caso genérico de N estágios



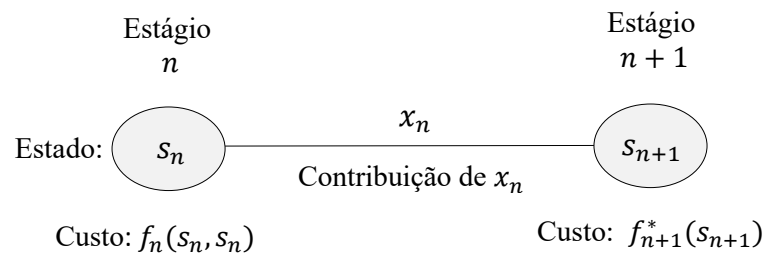
Fonte: Adaptado de Colin (2015, p. 239).

A programação dinâmica, segundo Campello (2002) pode tratar funções descontínuas, não diferenciáveis, não convexas, determinísticas ou estocásticas (probabilística). Tendo em vista as características básicas e as notações dos problemas de programação dinâmica, serão discutidas a aplicação para modelos de programação dinâmica determinísticas e estocásticos.

2.3.2.1 Programação dinâmica determinística

A programação dinâmica para problemas determinísticos (PDD) tem como objetivo determinar o estado do estágio seguinte pelo estado e decisão sobre a política a ser adotada do estágio atual. Hillier e Lieberman (2013) descrevem este processo na forma de diagrama, conforme ilustrado na Figura 4. Tendo em vista que, no estágio n , o processo se encontra no estado s_n , e que, a partir da contribuição x_n , o processo se transforma em um estado $s_n + 1$ no estágio $n + 1$.

Figura 4 - Estrutura básica para a programação dinâmica determinística



Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013, p. 432).

A função objetivo do estágio $n + 1$, depois de recebido a contribuição de x_n , sob uma política ótima, foi calculada como $f_{n+1}^*(s_{n+1})$. A decisão sobre a política x_n também influencia em relação a contribuição à função objetivo. A combinação dessas duas quantidades fornece $f_n(s_n, x_n)$ em relação a contribuição dos estágios n em diante. A partir disso, $f_n^*(s_n) = f_n(s_n, x_n^*)$ é encontrado a partir da otimização de x_n , e então, os valores de x_n^* e $f_n^*(s_n)$ podem ser encontrados para cada valor possível de s_n , e por fim, o procedimento de resolução está pronto para retroceder um estágio (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Deve-se destacar que qualquer estado s_t depende unicamente do estado inicial s_0 e das variáveis de decisão que precederam os estados atuais. E a formulação genérica de um problema de PDD pode então ser formalizado pela figura 5.

Figura 5 - Formulação genérica de um problema de PPD

$$Z^* = \frac{\text{Min}}{\text{Max}_{x_t, t=1, \dots, N}} \left\{ \sum_{i=1}^N f_t(s_{t-1}, x_t) \right\}$$

Sujeito à:

$$s_t = \phi_t(s_{t-1}, x_t), \quad t = 1, \dots, N - 1$$

s_0 é um parâmetro conhecido

$f_{N+1}^*(s_N)$ é um parâmetro conhecido

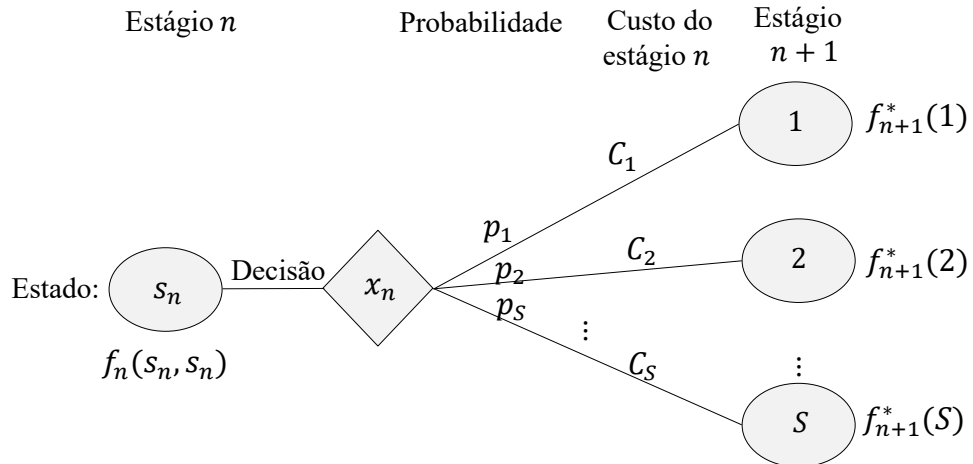
Fonte: O Autor (2022).

2.3.2.2 Programação dinâmica estocástica

Hillier e Lieberman (2013) diferem a programação dinâmica estocástica (PDE) da programação dinâmica determinística pelo fato de que o estado seguinte não é determinado totalmente pelo estado e pela decisão sobre a política a ser adotada no estágio atual. É aplicada uma variável probabilística em relação a qual seja o estoque seguinte, sendo que essa variável é completamente determinada pelo estado e pela decisão sobre a política a ser adotada do estágio atual.

A partir do diagrama, conforme a Figura 6, é possível observar distribuição probabilística atuando em um problema de PDE. Considerando-se S o número de estados possíveis em $n + 1$ e que o sistema vai para o estado i com probabilidade p_i ($i = 1, 2, \dots, S$) dado o estado s_n e a decisão x_n no estágio n . Se o sistema seguir para o estado i , C_i será a contribuição do estágio n à função objetivo.

Figura 6 – Estrutura básica para a programação dinâmica probabilística



Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013, p. 450).

Uma política (ou estratégia) ótima tem a propriedade de que, para um dado estado, em um dado estágio t , a solução ótima do restante do problema nos estágios $t, t + 1, \dots, T$ é independente das decisões feitas nos estágios anteriores $1, 2, \dots, t - 1$.

3 METODOLOGIA

A escolha do método adequado para o desenvolvimento de um trabalho científico, segundo Branksi, Franco e Lima Junior (2010) depende da proposta e das questões que se queira responder, visando uma contribuição para o avanço do conhecimento humano (PRODANOV; FREITAS, 2013).

O trabalho científico, para Prodanov e Freitas (2013), visa absorver cientificamente um ou mais aspectos de determinado assunto. Para tanto, deve ser sistemático, metódico e crítico. Esse método é classificado quanto à natureza, aos objetivos e aos procedimentos técnicos.

No que se refere ao ponto de vista da natureza, este trabalho se caracteriza como uma pesquisa aplicada, pois foca na resolução de problemas específicos, através da geração de conhecimento para aplicação prática.

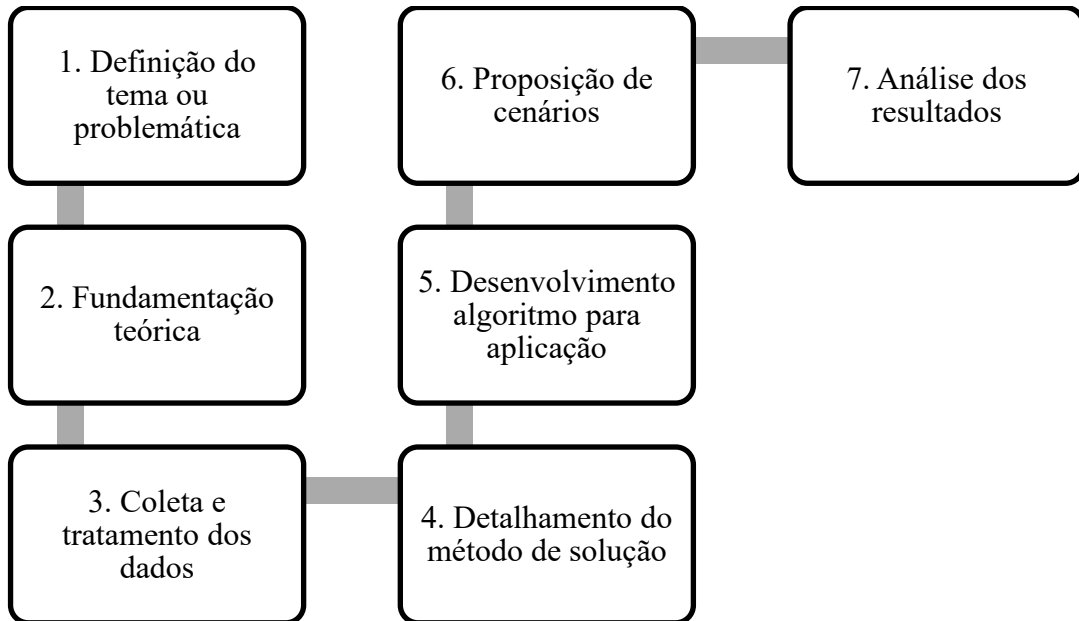
Quanto aos objetivos, este trabalho tem cunho explicativo, que segundo Prodanov e Freitas (2013) visa explicar os porquês das coisas e suas causas, identificando os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, por meio do registro, da análise, da classificação e da interpretação dos fenômenos observados.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, Prodanov e Freitas (2013) citam diversas metodologias de pesquisa, porém o método utilizado neste trabalho será o de estudo de caso.

O estudo de caso é um método de pesquisa que utiliza, geralmente, dados qualitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar, explorar ou descrever fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto (BRANSKI; FRANCO; LIMA JUNIOR, 2010). É caracterizado por ser um estudo detalhado e exaustivo de poucos, ou mesmo de um único objeto, fornecendo conhecimentos profundos (YIN, 2009).

O estudo de caso, segundo Yin (2009), é útil para investigar novos conceitos, bem como para verificar como são aplicados e utilizados na prática elementos de uma teoria. Branksi, Franco e Lima Junior (2010) apresentam as cinco etapas que são necessárias para desenvolver uma pesquisa utilizando o método do estudo de caso: delineamento da pesquisa; desenho da pesquisa; preparação e coleta dos dados; análise dos casos e entre os casos; e elaboração dos relatórios. A partir desse conceito, a metodologia de desenvolvimento deste trabalho foi dividida em sete partes, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Etapas para desenvolvimento do trabalho



Fonte: O Autor (2022).

A primeira parte do desenvolvimento consiste na definição do problema, que é feita conforme a necessidade da empresa estudada de aprimorar a gestão de estoque, tendo em vista os problemas em se prever a demanda. Nesta etapa, é apresentada a empresa, qual mercado ela atua, em que local, quais itens são desenvolvidos e comercializados, como são suas plantas e processo produtivo.

Na segunda parte do desenvolvimento, a fundamentação teórica, busca-se referências para embasamento teórico e técnico livros, artigos e periódicos, a respeito de gestão de estoques, previsão de demanda e programação dinâmica, para formulação do sistema de resolução do problema, definido na primeira parte do desenvolvimento do trabalho.

Na terceira parte, a coleta e tratamento dos dados, detalha-se as informações e dados disponibilizados pela Perfil Group em relação ao processo de fornecimento de um item. Estes dados foram enviados através de planilhas de Excel e são padronizados de forma a utilizar as mesmas unidades de medida de volume, tempo e peso para facilitar a aplicação dos dados no algoritmo.

A quarta parte é o detalhamento do método de solução, onde apresenta-se o modelo de programação dinâmica determinística aplicado e o porquê de sua escolha, trazendo referências estudadas na fundamentação teórica e explica-se a necessidade da utilização de um método mais robusto para aplicação.

Na quinta parte, o desenvolvimento do algoritmo em linguagem C++ para resolução do problema, explica-se o funcionamento do modelo de programação desenvolvido para a resolução do problema, através dos métodos estudados na fundamentação teórica, que simule a previsão de demanda utilizando programação dinâmica determinística, que apresente as respostas necessária para o item 1 do desenvolvimento.

Na sexta parte, o desenvolvimento dos cenários, aplica-se os dados tratados no algoritmo proposto, e propõe-se novas variações do problema encontrado para a empresa estudada, através de alterações em algumas premissas da definição dos cenários. Os cenários são desenvolvidos principalmente onde são encontradas oportunidades dentro do problema proposto.

Na sétima e última parte, a análise dos resultados, analisa-se os resultados obtidos pela aplicação do método, de forma a concluir a acurácia do método. Nesta etapa também se propõe, através da aplicação nos cenários, a viabilidade deste modelo para outros problemas, buscando a generalização do método.

As etapas 1, 3, 4 e 5 serão detalhadas no capítulo 4, já as etapas 6 e 7 serão expostas no capítulo 5. A etapa 2 já foi exposta no capítulo 2.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ESTUDADA

A empresa fornecedora dos dados para este estudo de caso é a Perfil Group, fundada em 1982, e desenvolve soluções integradas para processos térmicos, do projeto à manutenção, em segmentos variados. Atua no mercado brasileiro nas cidades de Joinville e Curitiba, e no mercado exterior, nos Estados Unidos, em Deerfield Beach, na Flórida, com um portfólio de mais de 400 produtos.

Atualmente, a empresa é dividida em três operacionais, que atendem mais de 300 clientes por ano, agindo em diversos setores econômicos, incluindo indústrias de produção e processamento de metais ferrosos e não ferrosos, fundição, metalurgia, siderurgia, petroquímica, química, agronegócio, alimentos, madeira, celulose, papel, cerâmica, vidros entre outros. São elas: Perfil Térmico, TERMICA Solutions e TERMIA Technology.

O segmento Perfil Térmico oferece produtos para isolamento térmico e aquecimento industrial, atendendo diversos setores e segmentos de mercado, que compreendem indústrias de produção e processamento de metais ferrosos e não ferrosos, química e petroquímica, eletrodomésticos, derivados de petróleo, geração de energia, cerâmica, vidros, entre outros.

A TERMICA Solutions produz soluções focadas em produtividade, agilidade e controle de qualidade, com garantia de resultado, facilidade de utilização e interfaces intuitivas. As áreas de atuação envolvem o desenvolvimento, implantação e integração de softwares e hardwares para a digitalização de equipamentos e processos industriais, tornando-os 4.0, de tal forma que possam interagir com pessoas e outras máquinas inteligentes melhorando a eficiência e eficácia destes processos.

A TERMIA Technology é especializada em projetos e execuções de equipamentos térmicos, tais como fornos, aquecedores e calhas de transporte. Conta com profissionais com mais de 30 anos no mercado térmico internacional. As premissas de alta eficiência energética e a utilização de técnicas inovadoras são seus principais fundamentos. Tendo parcerias com projetistas e fabricantes de vários países, a TERMIA se utiliza da experiência de especialistas nas mais diversas áreas a fim de oferecer ao mercado equipamentos viáveis, porém com alta tecnologia embarcada.

Tendo em vista um portfólio de 400 itens que são desenvolvidos pela empresa, o processo de produção de alguns itens é iniciado através da importação, em países como

Alemanha e China. O processo de compra dos itens engloba diversos custos, tais como custo do material, custo de frete, despesas de importação e custo de estoque.

O custo do material é o valor negociado com o fornecedor do país no qual queira se importar o produto. A moeda utilizada para este processo pode variar.

O frete do material pode apresentar variações em relação ao *lead time* de entrega do item, conforme a escolha do modal de transporte, que pode ser feito por avião ou navio, principalmente em trajetos continentais. Outro fator é o tipo de produto, que pode ter a necessidade de ser transportado na horizontal, vertical, em câmaras frias, etc. A dimensão é outro fator que é levado em consideração, pois em alguns casos, adquirir maiores quantidades de produtos, podem significar um menor valor de frete proporcional.

As despesas de importação dos materiais englobam diversos custos ao valor final de venda do produto, conforme as leis de importação brasileiras. Essas taxas podem incluir o processo de frete interno dos itens, armazenagem, taxas de incentivo nacionais, taxas estatais, de serviço e expediente, liberação e variam em relação ao pedido, ao volume e ao valor do frete.

Os materiais que não são utilizados diretamente quando chegam no Brasil, são armazenados em depósitos terceirizados, que dispõe um espaço para estocar determinados volumes de materiais ou itens, pelo pagamento de uma taxa mensal. Essa taxa de armazenagem de estoque engloba todo o processo físico de recebimento e organização na empresa, rotulagem e identificação dos materiais e o seguro do material.

4.2 PROBLEMÁTICA E ESCOPO DO TRABALHO

A Perfil Group está inserida no cenário de empresas 4.0 que tem como objetivo melhorar diversos aspectos em todo o seu processo logístico, com o objetivo final de reduzir alguns destes custos e melhorar o nível de serviço do produto final. Sendo assim, a empresa tem foco em aprimorar a sua gestão de estoque, tendo um foco em relação ao planejamento de ressuprimento de seu estoque.

O estudo para alteração de todo o planejamento de ressuprimento, para todos os materiais de uma empresa, pode ser um pouco árduo inicialmente. Sendo assim, o estudo pontual, em itens que a empresa julgue ser chave, pode trazer inicialmente melhorias para a empresa, que se forem replicadas, ou sofrerem algumas adaptações para outros produtos no futuro, podem trazer pontos satisfatórios em relação ao objetivo da empresa.

Tendo em vista toda a gama de itens comercializadas pela empresa, foi escolhido um item, que é um isolante termoelétrico, onde sua matéria prima é importada da China, e todo o

processo de transporte do material leva, da realização de pedido à chegada do material na empresa, em média, 90 dias.

O item foi escolhido pela empresa para o estudo pois se trata de um projeto piloto, de um material importado, que apresenta um consumo relativamente regular. Sendo assim, para fins de estudo, foi reduzido as variáveis de interferência relacionados ao processo de importação.

Para uma gestão de estoque da cadeia de suprimentos aprimorada, ou seja, mais eficiente, o principal ponto é ter o estoque certo no local certo para minimizar os custos do sistema. Sendo assim, as principais questões levantadas por um gestor de estoque, e conseqüentemente, as dúvidas encontradas pela empresa são em relação à:

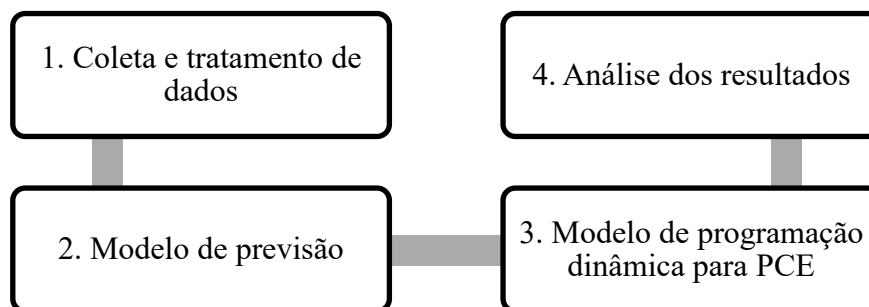
- quando o pedido deve ser feito, para que não falte matéria prima para produção do item;
- quanto deve ser comprado, para que o custo de armazenagem e o custo do frete seja otimizado de forma a reduzir o custo do processo final.

O passo inicial é desenvolver um método de tomada de decisão que considere uma modelagem que englobe os pontos propostos pela empresa e possibilite soluções otimizadas para a gestão do estoque. Sendo assim, a obtenção de dados reais da empresa pode auxiliar na tomada de decisão de escolha ou aprimoramento do método escolhido.

4.3 ETAPAS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO

As etapas do método de solução foram desenvolvidas para separar as etapas de desenvolvimento do método de resolução do problema da empresa Perfil Group, conforme mostrado na Figura 8. Estas etapas serão discutidas nas seções posteriores.

Figura 8 – Etapas do método de solução



Fonte: O Autor (2022).

4.3.1 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

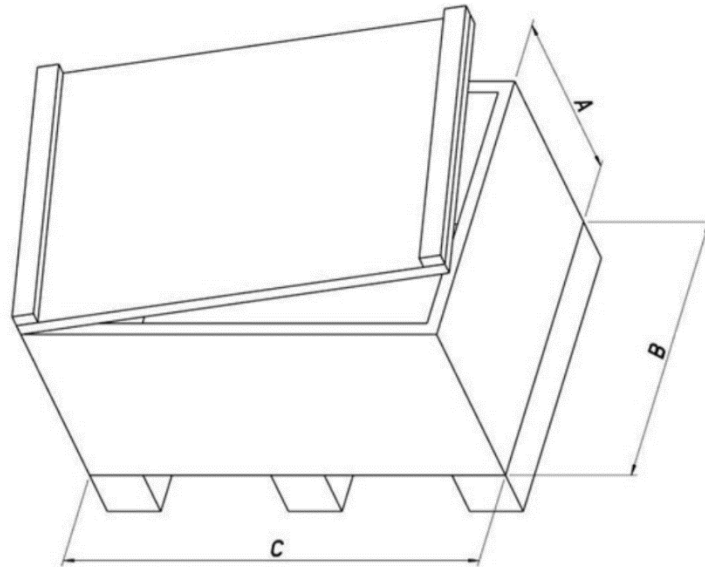
A indústria 4.0, por englobar algumas tecnologias para automação, utiliza de uma grande quantidade de dados relacionados aos seus processos para possibilitar, de alguma forma, prever o que deve ser feito de forma a melhorar o desempenho da empresa. Sendo assim, a utilização de dados nos dias atuais e, conseqüentemente para aplicação no problema da Perfil Group, é fundamental.

A Perfil Group disponibilizou informações em relação a diversos aspectos da cadeia logística do item considerado neste estudo que podem vir a ser pertinentes para criação do modelo de resolução do problema. Desta forma, com as informações disponibilizadas pela empresa, aplicaram-se métodos de tratamentos de dados para obter os dados necessários para o estudo, descritos nas próximas seções. Os principais dados considerados foram: custo e característica do material; demanda do item; taxa de armazenagem; frete da carga; e despesas de importação.

4.3.1.1 Custo e característica do material

O item proposto pela empresa para fazer o planejamento do ponto de ressuprimento é produzido utilizando uma matéria prima que é comprada da China. O material é vendido em unidades de rolos, sendo que cada um apresenta 30 m² de área, sendo assim, um rolo será o padrão de unidade de medida adotado neste trabalho para dimensionar o material.

Figura 9 – Caixa de madeira utilizada no transporte



Fonte: O Autor (2022).

O item é disponibilizado pelo fornecedor da empresa em caixas que comportam 12 e 16 rolos, como ilustrado na Figura 9, com dimensões das caixas de madeira dadas por A o comprimento, B a largura e C a altura.

A caixa de 12 rolos e 16 rolos apresentam o mesmo comprimento (A) de 1180 mm e largura (B) de 1120 mm, só apresentando diferenças na altura (C), que para a caixa de 12 são 960 mm e para a caixa de 16 rolos são 1240 mm.

O fornecedor só vende o produto por caixas, sendo de 12 ou de 16 rolos. Porém, o valor do material é proporcional ao número de rolos, sendo que não apresenta desconto se for comprado a caixa com mais quantidade de material.

O custo do material é de 6,06 dólares por m^2 , sendo que para um rolo de 30 m^2 , conforme a unidade medida padrão utilizada neste estudo, o valor é de 181,80 dólares. O custo do material é calculado em dólares por se tratar de comércio internacional e ser o acordado entre as duas partes no processo do fornecimento.

4.3.1.2 Demanda do item

A empresa começou a vender o item em estudo em agosto de 2019, e continua oferecendo o produto em seu portfólio (considerando essa informação até a data de conclusão deste estudo). Foram recebidos dados de 29 meses referentes às saídas de materiais como venda (Tabela 2) e compras de matéria prima (Tabela 3).

Tabela 2 - Saída de materiais para vendas em rolos

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2019	0	0	0	0	0	0	0	45	47	61	28	32
2020	38	56	26	13	45	25	30	34	40	59	43	53
2021	59	34	50	50	72	45	50	46	34	33	55	55

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 3 - Entrada de matéria prima em rolos

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	220
2020	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0	0	220
2021	0	0	0	0	240	0	0	0	0	280	0	0

Fonte: O Autor (2022).

Através das Tabelas 2 e 3, é possível calcular a quantidade de material atual que a empresa tem estocada na empresa terceira de armazenagem. Fazendo a soma da quantidade de material que entrou, e diminuindo pela quantidade de material que saiu para venda, encontra-se uma quantidade de 203 rolos em estoque para o estoque inicial que será utilizado no mês de janeiro de 2022.

O método de ressuprimento anterior utilizado pela empresa é realizado observando quando o nível do estoque começa a abaixar. Observou-se também que, devido ao *lead time* da matéria prima ser de 3 meses, a definição ponto de ressuprimento deve ser pensado com bastante antecedência.

4.3.1.3 Taxa de armazenagem

A Perfil Group não possui sistema de armazenamento de material próprio. Sendo assim, ela utiliza uma empresa terceirizada para armazenar suas matérias primas e produtos. Desta forma, será mostrado os custos cobrados pela empresa terceira e tratados estes dados em relação a unidade de medida em rolos. A empresa terceira cobra em 4 segmentos: recebimento; rotulagem; armazenagem; e seguro de armazenagem.

O recebimento varia de acordo com a quantidade de material a ser descarregadas, variando o tamanho do container de 20 ou 40 pés ou em unidades recebidas. A rotulagem é feita para identificação do material no estoque, sendo cobrado um valor para cada unidade etiquetada e um valor diferente se o material a ser etiquetado for frágil.

A armazenagem é feita pela empresa através da unidade de medida de posição pallet (PP) para cobrar em relação ao volume disponibilizado.

E por fim, o seguro de armazenagem é cobrado em relação ao valor da nota fiscal de entrada dos materiais. Os valores cobrados pela empresa e unidades são mostrados na Tabela 4.

Os dados obtidos pela empresa terceira foram tratados, com a finalidade de apresentar uma taxa de armazenagem mensal cobrado pela empresa em unidade de medida de reais por rolo, tanto por dia, quanto por mês. Essa variação será considerada, para se futuramente for necessário, facilitar a aplicação do modelo nas devidas proporções.

Tabela 4 - Valores da taxa de armazenagem disponibilizados pela empresa terceira

Tipo	Descrição	Unidade	Valor
Recebimento	Descarga do container de 20 pés	unidade	R\$ 328,00
	Descarga do container de 40 pés	unidade	R\$ 527,00
	Unidades recebidas	unidade	R\$ 0,53
Rotulagem	Unidades etiquetadas (800 ×400 mm)	unidade	R\$ 0,23
	Etiqueta frágil	unidade	R\$ 0,37
Armazenagem	Posição Pallet 1550×1650×800 mm	PP/dia	R\$ 1,10
Seguro de Armazenagem	Sobre o valor da nota fiscal de entrada	valor nota fiscal	0,11%

Fonte: O Autor (2022).

Observou-se com a análise dos dados disponibilizados pela empresa na Tabela 4 que no mês de maio de 2021, havia 305 posições pallets armazenados de material na empresa terceira. Considerando o mês tendo 30 dias e o preço da posição pallet por dia sendo 1,10 reais, observa-se que através da multiplicação destes valores, juntamente com a quantidade de posição pallets do mês, o custo de armazenamento do mês foi de 10.065,00 reais. Tendo em vista um custo adicional de despesas de 5.578,00 reais, disponibilizado pela empresa, os quais consideram o descarregamento de um container, rotulagem e seguro em relação a nota fiscal. O valor total que foi pago pela empresa Perfil Group no mês de maio de 2021 foi de 15.643,00 reais.

Considerando-se o valor total de armazenamento cobrado pela empresa terceira no mês de maio de 2021, é possível encontrar o valor em função de posições pallets por dia e por mês. O valor total dividido pelas 305 posições pallets é de 51,29 reais a posição pallet por mês. Dividindo este valor por 30, encontra-se um o valor da posição pallet por dia, que é de 1,71

reais. Se dividir o custo da PP por mês pela quantidade de 16 rolos, encontra-se um custo de 3,20 reais por rolo por mês.

4.3.1.4 Frete de carga

O deslocamento do item do fornecedor na China até a empresa terceira responsável pela estocagem do material apresenta mais de um método de ser transportado. O transporte é feito por navio, sendo que a carga vem dentro de containers, que podem variar de tamanho, tipo e preço.

Segundo as informações disponibilizadas pela Perfil Group em maio de 2021, a empresa pode utilizar dois tipos de containers, sendo eles o container seco de 20 pés e o container seco de 40 pés. A Tabela 5 apresenta as características de dimensões, volume e o custo do transporte para cada tipo de container.

Tabela 5 - Dimensional e custo dos containers de 20 e 40 pés

Tipo	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Volume (m³)	Valor (dólar)
20 pés	5.900,00	2.350,00	2.393,00	33,18	\$ 9.400,00
40 pés	12.032,00	2.350,00	2.392,00	67,63	\$ 10.000,00

Fonte: O Autor (2022).

O fornecedor da matéria prima utiliza estes dois tipos de containers, porém, em um container de 20 pés, são armazenadas no máximo 10 caixas com 16 rolos e 10 caixas de 12 rolos, conforme as Tabelas 6 e 7. Isso ocorre para maximizar o espaço ocupado dentro do container por parte das caixas de madeiras, que variam entre caixas de 12 e 16 rolos.

Tabela 6 – Dados material container de 20 pés

Rolos por caixa	Caixas (unidade)	Material (m²)	Volume (m³)
16 rolos	10	4800	16,39
12 rolos	10	3600	12,69
Total	20	8400	29,08

Fonte: O Autor (2022).

Em sequência, apresenta-se através da Tabela 7 as diferenças entre quantidade de caixas, material e volume para um container de 40 pés.

Tabela 7 – Dados material container de 40 pés

Rolos por caixa	Caixas (unidade)	Material (m²)	Volume (m³)
16 rolos	20	9600	32,78
12 rolos	20	7200	25,37
Total	40	16800	58,15

Fonte: O Autor (2022).

4.3.1.5 Despesas de importação

As despesas de importação são compostas por diversas taxas que são cobradas em relação ao tipo de importação durante todo o processo desde a saída do item do remetente ao destinatário. Desta forma, considerando os dados disponibilizados pela empresa, foi possível caracterizar estas taxas em três tipos, sendo elas: pelo número de containers; por pedido; e pelo tipo de container.

Em relação ao número de containers, as taxas cobradas são devidas aos processos oriundos do transporte interno, armazenagem, devolução de container e as despesas portuárias referentes à movimentação do contêiner no terminal portuário (THC). Quanto maior for o número de containers, mais atividades serão necessárias, e conseqüentemente, maior o custo cobrado pela transportadora.

As taxas por pedido são principalmente aquelas cobradas apenas uma vez, para qualquer quantidade de material. Consideram o serviço e o expediente prestados pelos funcionários da empresa de transporte de carga, as taxas de desconsolidação da carga, seguro da carga (ISPS), comprovante assinado pelo comandante do navio, taxas de imposto sobre operações de câmbio (IOF), a taxa cobrada pelo manuseio da documentação na importação (TRS) e a taxa pelo aluguel do espaço deixado pelo container vazio (*Drop off*).

A última taxa, caracterizada pelo tipo de containers, é a adicional ao frete para renovação da marinha mercante (AFRMM), que conseqüentemente varia de acordo com a quantidade de containers que é utilizada no processo e é debitada proporcionalmente ao valor de custo do frete do container, sendo para um ou mais tipos. Os valores de custos dos três tipos de taxas de importação estão relacionados na Tabela 8.

Tabela 8 – Custo das taxas de importação

Tipo de taxa	Valor
Frete Interno	R\$ 1.400,00
Armazenagem	R\$ 1.000,00
Devolução do container	R\$ 150,00
Despesa portuária (THC)	R\$ 1.000,00
Serviços empresa transporte	R\$ 760,00
Expediente empresa transporte	R\$ 150,00
Desconsolidação de carga	R\$ 208,80
Seguro de carga (ISPS)	R\$ 65,00
Liberação comandante	R\$ 390,00
Imposto (IOF)	R\$ 86,98
<i>Dropp off</i> (25% do frete internacional)	R\$ 783,00
Documentação (TRS)	R\$ 104,40
AFRMM (25% do valor do frete)	25%

Fonte: O Autor (2022).

Com os dados tratados, é possível observar com mais clareza quais problemas a empresa enfrenta e as informações que possui. É possível também observar quais modelos podem ser aplicados para resolver os pontos discutidos na problemática da empresa. Sendo assim, no próximo capítulo, será apresentado o modelo de previsão desenvolvido neste estudo.

4.3.2 MODELO DE PREVISÃO DE DEMANDA

A resolução de problemas práticos em empresas que utilizam de uma grande gama de dados e necessitam de um estudo de longa data, com uma quantidade de estágios, envolvem métodos como algoritmos e heurísticas, que são utilizados para resolvê-los de forma mais satisfatória. Sendo assim, o método de resolução do problema do ponto de ressuprimento da Perfil Group foi dividido em duas etapas para melhor entendimento do modelo. O modelo das duas etapas busca identificar: definição da quantidade a ser comprada; e definição de quando comprar, que serão detalhados nas próximas seções.

4.3.2.1 Definição da quantidade a ser comprada

Quantificar uma demanda ou fazer uma previsão de demanda é um processo que, como mencionado anteriormente, possui diversos métodos, que utilizam quase majoritariamente uma base com dados de demanda passados, ou seja, dados históricos recolhidos em determinadas

períodos de tempo pelas empresas, e a partir deles, estes dados são modificados de forma a encontrar uma melhor previsão para cada tipo de empresa.

A partir dos dados fornecidos pela empresa, é necessário identificar o modelo de previsão de demanda que apresenta a menor taxa de erro possível. Para este estudo, os modelos considerados para aplicação foram a média móvel simples para 3, 6 e 12 variações, suavização exponencial simples e suavização exponencial com tendência. Estes modelos foram escolhidos devido ao problema ter uma quantidade de dados pequena.

A partir dos métodos aplicados, deve-se identificar o método que ocasionou uma menor taxa de erro para escolher o melhor método de previsão para os dados considerados. Os métodos considerados para cálculo da taxa de erro foram o erro médio, erro médio absoluto, erro médio quadrado e erro percentual médio absoluto, vistas no capítulo 2.2.1.5. Estes métodos serão calculados na seção 4.5.1.2.

Porém, devido a previsão de demanda ser algo incerto no mercado global, podendo existir diversas variáveis que podem influenciar no processo, existem certas ferramentas que podem auxiliar na gestão de estoque, sendo: o estoque de segurança; e métodos de previsão de demanda.

4.3.2.1.1 *Aplicação do estoque de segurança*

A empresa, para ter mais segurança em relação a uma possível falta de materiais, pode utilizar uma metodologia de estoque de segurança. Para encontrar o estoque de segurança adequado para cada gestão de estoque, é necessário levar em consideração qual nível de serviço a empresa quer alcançar. Visto que este valor pode variar dentro da empresa, em relação a diferentes estratégias para cada produto, calcular diferentes valores de estoque de segurança pode auxiliar no planejamento do produto.

Sendo assim, calculou-se o estoque de segurança, a partir da Equação (17) e (18), para os diversos níveis de serviços, conforme o coeficiente da distribuição normal (Z), propostos na Tabela 1, conforme a Tabela 9. O *lead time* do pedido (L) utilizado foi um valor fixo de 3 (meses), equivalente a 90 dias, que é o *lead time* médio do pedido até a matéria prima chegar em estoque, que foi disponibilizado pela empresa. Ao calcular o desvio padrão médio (σ_d), obteve-se valor 13,47.

Tabela 9 - Estoque de segurança para diferentes níveis de serviço

Nível de serviço (%)	Fator de serviço (Z)	Estoque de segurança (rolos)	Estoque de segurança (≈)
50%	0	0	0
60%	0,254	4,01	4
70%	0,525	8,28	8
80%	0,842	13,29	12
85%	1,037	16,36	16
90%	1,282	20,23	20
95%	1,645	25,96	24
96%	1,751	27,63	28
97%	1,88	29,67	32
98%	2,055	32,43	32
99%	2,325	36,69	36
99,9%	3,1	48,92	48
99,99%	3,62	57,13	56

Fonte: O Autor (2022).

A primeira coluna da tabela é representada pela porcentagem que a empresa tem necessidade de alcançar como nível de serviço. A segunda coluna apresenta o fator de serviço (Z). Na terceira coluna encontra-se o cálculo de estoque de segurança em número de rolos, sem arredondamento. E por fim, a quarta coluna apresenta a o estoque de segurança em relação ao MDC, com valores que mais se aproximam do múltiplo 4.

4.3.2.1.2 Métodos de previsão de demanda

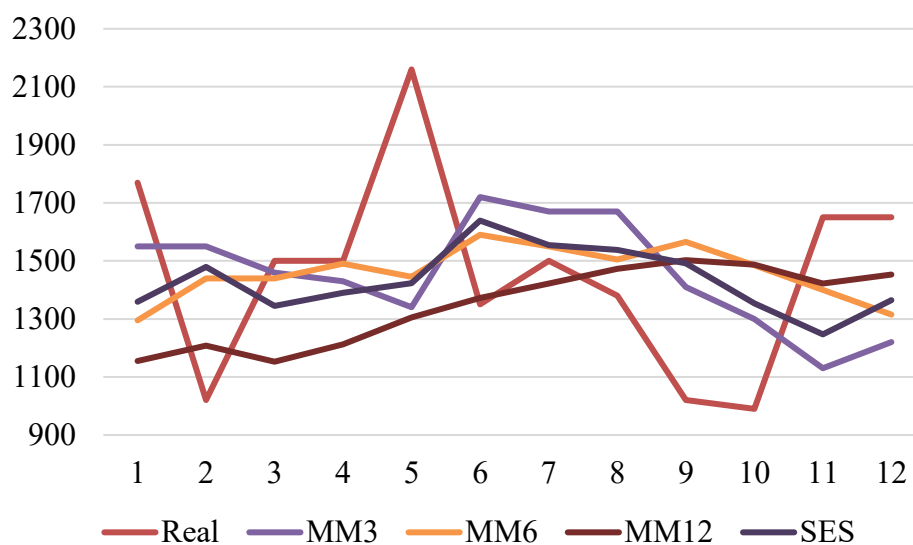
Os métodos propostos para identificar qual terá a melhor eficiência para este estudo serão a média móvel simples (MMS), para 3, 6 e 12 valores e o método da suavização exponencial simples (SES). Para encontrar o método com o menor erro, será aplicado o modelo de previsão para um período passado, definido como a previsão Real, que já se tem a informação sobre a saídas, e então, será possível identificar analiticamente a qualidade do modelo para estes dados.

O período escolhido para a previsão foi de um ano a partir da última data de demanda recebida pela empresa, no caso entre janeiro e dezembro de 2021. Sendo assim, foi utilizado os meses do ano de 2020 para serem aplicados os modelos de previsão. Foi escolhido um período de um ano para a previsão pois não existe muitos dados da demanda histórica de saída do item, devido ao item ser novo e ser vendido desde junho de 2019.

Para encontrar o valor de α para o método da SES, foi utilizado a função Solver do Excel, com foco em minimizar o erro encontrado pelo método.

Sendo assim, foi calculado os quatro métodos de previsão, e seus dados foram disponibilizados como um gráfico, na Figura 10. É possível observar a variação das curvas dos pontos da previsão, representadas por cores, em relação ao gráfico real dos dados da empresa. O eixo horizontal do gráfico é representado pelos períodos de tempo e o eixo vertical é representado pela saída de estoque do produto em m^2 .

Figura 10 - Previsão de janeiro a dezembro de 2021



Fonte: O Autor (2022).

A partir destes pontos, é possível calcular o erro, e a partir deles encontrar qual das curvas teve maior proporcionalidade de erro à curva Real. Estes cálculos serão disponibilizados na Tabela 10, sendo erro médio (ME), erro médio absoluto (MAD), erro médio quadrado (MSE) e erro percentual médio absoluto (MAPE).

Tabela 10 - Erros de previsão de demanda

Método	ME	MAD	MSE	MAPE
MM3	-3,33	346,67	163.466,7	24,71%
MM6	-5,83	318,33	148.870,8	23,49%
MM12	-110,42	324,17	161.163,5	22,66%
SES	-25,40	324,78	139.159,9	23,44%

Fonte: O Autor (2022).

A partir da Tabela 10, observa-se que as diferenças do MAPE para a MM6, MM12 e SES foram baixas, em torno de 1%, sendo uma diferença baixa para escolher apenas o menor. A MM6 apresentou menor erro em relação ao MAD, o segundo menor erro em relação ao ME e MSE, e o terceiro menor erro em relação ao MAPE, porém como comentado anteriormente, tendo um valor muito próximo ao primeiro e segundo menor erro. Sendo assim, o MM6 será o método utilizado para calcular a previsão de demanda no algoritmo.

A partir destes dados sobre a demanda futura, será possível identificar a quantidade de material que deverá ser comprado em todo o processo de previsão.

4.3.2.2 Quando deve ser comprado

A pesquisa operacional é um método utilizado amplamente para modelagem de problemas reais. Ao analisar diretamente o problema do ponto de ressuprimento em relação à quando deve ser comprado o material, é possível trazer alguns aspectos do problema à tona e transformá-los em variáveis.

O planejamento de compra de material para um o horizonte de planejamento definido envolve compras periódicas e sequenciais, sendo que essas decisões impactam nas decisões seguintes, aplicar um método de tomada de decisão que considera uma metodologia de tomada de decisão sequencial em estágios pode ser uma boa maneira de encontrar um resultado otimizado ou satisfatório. O método da programação dinâmica utiliza desta premissa, onde busca-se otimizar cada etapa a cada estágio, se baseando do conhecimento prévio dos estágios anteriores.

Sendo assim, para o horizonte de planejamento considerado, pode-se ter uma divisão em n estágios, dependendo de até quando a empresa queira fazer seu planejamento. E em cada estágio, é possível identificar o custo otimizado para diferentes quantidades de material comprado, e a partir disso este modelo ser aplicado sequencialmente (ou dinamicamente) para otimizar o custo total da gestão do estoque, e identificando, em cada estágio, quanto deve ser comprado do material considerado no estudo.

Com mencionado na seção 2.2.8, a programação dinâmica pode considerar modelos determinísticos e probabilísticos, dependendo do contexto, variáveis e informações disponíveis. Como a problemática tratada neste trabalho envolve um processo que já vem sendo realizado há alguns anos pela empresa, e como os dados das operações estão todos disponíveis, optou-se por considerar um modelo de programação dinâmica determinística para resolução do problema.

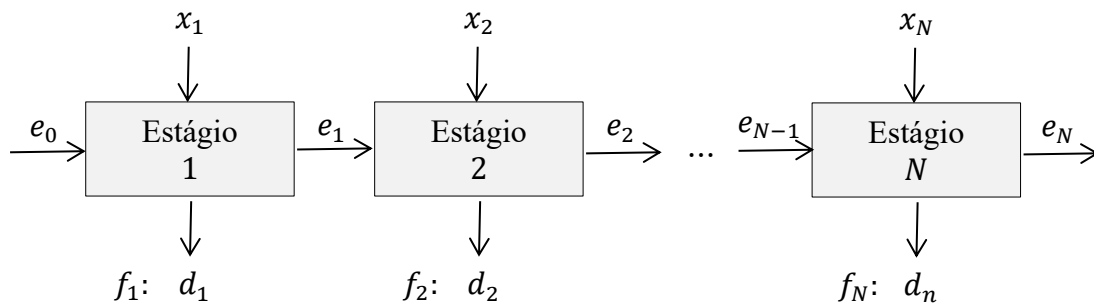
Sendo assim, utilizando as bases do modelo de programação dinâmica determinística (PDD), desenvolveu-se um método que a partir da quantidade de estoque atual em relação à anterior, encontra-se a quantidade de material que deve ser comprada em cada estágio, como detalhado a seguir.

4.3.3 MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA O PCE

O modelo deve determinar a quantidade de estoque a ser mantida para o cada período de tempo, levando em consideração os custos de armazenamento de estoque, quantidade de produtos ou matéria prima que devem ser compradas, de forma que seja obtido o menor custo para este processo.

A Figura 11 ilustra um fluxograma geral que representa esquematicamente o método de PDD aplicado ao problema de controle de estoque (PCE) enfrentado pela Perfil Group para um horizonte de planejamento finito de N períodos (estágios).

Figura 11 - Modelo de PD determinística para controle de estoque em N estágios



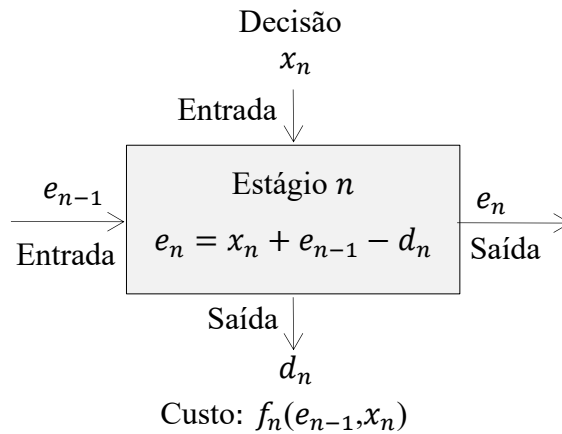
Fonte: O Autor (2022).

No fluxograma serial ilustrado na Figura 11 é possível observar que pode-se considerar N períodos, que são definidos como os estágios ($n = 1, \dots, N$) e que em cada período (estágio), tem-se uma variável de decisão x_n , que indica a quantidade a ser comprada no estágio n , a quantidade de demanda d_n relativa ao período n , a quantidade de estoque e_n no período de tempo n , e o custo f_n da gestão do estoque no estágio n .

Cada estágio representa então um período de tempo no horizonte de planejamento finito N , que para o problema considerado, foi expressado pela unidade de tempo de um mês, e existe variação na quantidade de material no estoque.

Destaca-se que, por estar sendo considerado que em cada estágio n tem-se uma entrada de estoque e_{n-1} , o qual é definido como estado anterior, uma entrada defendida pela quantidade comprada x_n (estado atual), uma saída e_n que vai para o estoque no estágio seguinte, e uma saída devido ao atendimento da demanda d_n , e que deverá haver um equilíbrio de fluxo que entram e que saem do estoque, como ilustrado na Figura 12, é possível obter uma equação de equilíbrio de estoque, definida pela Equação (19).

Figura 12 - Definição da equação de recorrência para o PCE



Fonte: O Autor (2022).

Na Equação (19) define-se a equação de recorrência utilizada no modelo de PD considerado.

$$e_n = x_n + e_{n-1} - d_n \quad (19)$$

Como o modelo de programação dinâmica em geral é resolvido de forma inversa, ou seja, do último estágio para o primeiro, todos os valores de custos, tanto de estoque quanto de compra no último estágio precisam ser conhecidos e considerados durante o decorrer dos estágios para a determinação do valor ótimo de menor custo. Assim, definidos:

- CE : a capacidade máxima do estoque;
- E_0 : o estoque inicial;
- E_n : o estoque final;
- $f_n(e_{n-1}, x_n)$: o custo de atendimento da demanda no estágio n , $n + 1, \dots, N$;
- $f_n^*(e_{n-1}, x_n) = \min f_n(e_{n-1}, x_n)$: o custo mínimo total da política ótima, o modelo determinístico completo de PD pode então ser formulado como ilustrado na Figura 13, sendo que a solução ótima será dada então, ao se determinar f_1^* .

Figura 13 - Modelo determinístico de PD

$$f_n^* = \underset{x_n}{\text{Min}} \{ f_n(e_{n-1}, x_n) + f_{n+1}^*(e_n) \}$$

Sujeito à

$$x_n = e_n - e_{n-1} + d_n, n = 1, \dots, N$$

$$e_n \leq CE, n = 1, \dots, N$$

$$e_0 = E_0$$

$$e_n = E_n$$

$$f_N^*(e_N) = 0$$

Fonte: O Autor (2022).

Porém, na problemática considerada pela empresa, outras restrições relacionadas à compra deverão ser acrescentadas ao Modelo da Figura 13. O modelo será expressado em uma planilha para organizar as equações e variáveis do problema, para futuramente ser aplicado e resolvido. Ressalta-se que, tendo modelado o PD como na Figura 13, conhecidos os custos futuros do último estágio, tem-se a garantia do Princípio da otimalidade de Bellman.

4.3.3.1 Modelo na planilha de programação dinâmica para o PCE

Nesta seção será ilustrado em uma planilha o funcionamento do método. Para isso, a planilha é organizada em dez etapas de cálculo, expressas por variáveis e equações consideradas no modelo PDD proposto. Sendo assim, cada etapa será representada como a seguir:

1. estoque passado: e_{n-1}
2. demanda: d_n ;
3. estoque atual: e_n ;
4. quantidade a ser comprada no estágio atual: x_n ;
5. custo de estoque CE_n ;
6. custo de compra: CP_n ;
7. custo mínimo estágios posteriores: $f_{n+1}^*(e_n, e_{n+1})$;
8. custo total: $CustoTotal_n$;
9. menor custo do estágio atual: $f_n^*(e_{n-1}, e_n)$;
10. quantidade comprada ótima: x_n^* .

Este modelo ainda segue como base a fórmula de recorrência dada pela Equação (19), sendo as quatro primeiras variáveis referentes às utilizadas na equação. Estoque passado pode ser escrito como e_{n-1} , demanda como d_n , estoque atual como e_n e a quantidade a ser comprada como x_n . As outras seis variáveis irão representar o custo para cada combinação de estoque e matéria prima comprada no período, e a partir da soma delas será possível identificar o valor ótimo para cada combinação e período.

A variável de custo de estoque (CE_n) se altera de acordo com a quantidade de rolos estocadas, representada pela variável de estoque atual (e_n). Sendo correspondida pela quantidade de rolos no estoque atual, multiplicadas pelo custo de estoque mensal por rolo da empresa terceira, vista na seção 4.4.3.

O custo de compra (CP_n) do material no estágio n varia em relação da quantidade de material comprada (x_n) e pelo frete, de acordo com a quantidade de containers que foram necessários para transportar todo o material, mais as taxas de importação, conforme representada na Equação (20). Destaca-se que os custos do frete e das taxas de importação variam com a dimensão do container utilizado.

$$CP_n = \text{taxas de importação} + \text{custo frete} + x_n \cdot \text{custo do material} \quad (20)$$

A variável custo mínimo dos estágios posteriores, $f_{n+1}^*(e_n, e_{n+1})$, é obtida através da busca pelo menor custo no estágio posterior, devido a particularidade do método da programação dinâmica de ser aplicada de forma inversa, em relação à quantidade de estoque atual (e_n) (otimização do estágio posterior ou futuro).

A variável $CustoTotal_n$ é composta pela soma do custo de estoque, custo de compra e custo mínimo dos estágios posteriores, como descrito na Equação (21). A partir dela é possível encontrar a variável de menor custo.

$$CustoTotal_n = CE_n + CP_n + f_n^*(e_{n-1}, e_n) \quad (21)$$

A variável custo mínimo do estágio atual, $f_n^*(e_{n-1}, e_n)$, é obtida ao comparar todos os custos totais do estoque passado (e_{n-1}) de cada estado possível, de forma a identificar o estado que possibilita menor valor de custo total entre eles. Identificado então o custo mínimo do estágio atual, é possível identificar qual o valor de compra ótimo (x_n^*) para cada estado possível do estágio anterior (estoque passado).

Depois de todas as variáveis serem calculadas e organizadas em uma planilha, é possível analisar as informações, estágio a estágio de forma recursiva inversa, e obter o valor de quantidade ótima a ser comprada em cada estágio. A Tabela 11 ilustra um exemplo de como a planilha é elaborada.

Tabela 11 - Exemplo de planilha com todas as etapas utilizadas na PD

Estágio n									
e_{n-1}	d_n	e_n	x_n	CE_n	CP_n	$f_{n+1}^*(e_n, e_{n+1})$	$CustoTotal$	$f_n^*(e_{n-1}, e_n)$	x_n^*
0	200	0	200	0	1.100	110	1.210		200
0	200	100	300	0	1.150	110	1.260		
0	200	200	400	0	1.200	110	1.310	1.210	
100	200	0	100	1	1.050	110	1.161		100
100	200	100	200	1	1.100	110	1.211		
100	200	200	300	1	1.150	110	1.261	1.161	
200	200	0	0	2	0	110	112		0
200	200	100	100	2	1.050	110	1.162		
200	200	200	200	2	1.100	110	1.212	112	
300	200	0	-100	Falha		110			
300	200	100	0	3	0	110	113		0
300	200	200	100	3	1.050	110	1.163	113	
400	200	200	0	4	0	110	114	114	0

Fonte: O Autor (2022).

Segundo a Tabela 11, observa-se que a demanda para o estágio n é de 200 unidades, pois se trata da demanda prevista para o período. O estoque passado varia até que, através da Equação (14) isolado em relação a variável de unidades a serem compradas (x_n), exista uma combinação que o valor de x_n seja maior que zero, pois caso contrário, como é visto quando e_{n-1} é igual a 300, e d_n é igual a 200, tem-se $x_n = -100$, sendo que é impossível fazer uma compra negativa. Sendo assim, todos os valores subsequentes desta linha serão caracterizados como “Falha”.

A variável de estoque passado (e_{n-1}) e estoque atual (e_n) não apresentam valores definidos, porém apresentam estimativas de valores, que podem ser definidos como mínimos e máximos. Os valores mínimos são zero quantidade de rolo em estoque, pois é a menor quantidade possível de material que possa existir em estoque. E o valor máximo seria em função da quantidade máxima de material que foi limitada pela empresa ou pedido. Para este estudo será delimitado uma quantidade máxima de material que podem ser comprados por pedido.

Tendo em vista o valor máximo de rolos que podem ser comprados, em função do número de containers, é possível encontrar os valores de estoque passado e estoque futuro, através da combinação destas duas variáveis. Pois, partindo do pressuposto que o estoque passado tem uma quantidade de 12 rolos em estoque, pode ser feito um pedido de n rolos, que façam com que o estoque chegue até a quantidade máxima de rolos estabelecida por pedido.

Sendo assim, teria uma série de combinações (estados possíveis) de e_n para 12 rolos de e_{n-1} , e posteriormente, teria uma série de combinações de e_n para um e_{n-1} de 13 rolos, 14 rolos, etc. A quantidade de combinações, tem caráter exponencial de n^2 , sendo n a quantidade máxima de rolos estabelecida por pedido. De forma a diminuir a quantidade máxima de rolos estabelecida por pedido n , considerou-se a metodologia explicada na próxima seção.

4.3.3.1.1 Tratamento de dados utilizados para a combinação de valores possíveis

As possíveis combinações de quantidade, para estados possíveis, apresentam uma característica, que é de que só podem ser compradas pelo número múltiplo da quantidade de rolos por caixas, sendo 12 ou 16, ou pela composição dos dois valores. Sendo assim, a composição destes dois valores pode ser encontrada pelo mínimo divisor comum (MDC) entre a quantidade de rolos por caixa. Através do cálculo do MDC, encontra-se o valor 4.

Tendo em vista que o MDC é 4, é possível encontrar os valores possíveis, partindo de zero, para o caso de não precisar comprar nenhum rolo, para 12, 16, 24, 28, 32 até o máximo de rolos que podem caber no maior container, de 40 pés, totalizando 560 rolos. Nota-se que não é possível comprar 4, 8 e 20 rolos, pois não são combinação de múltiplos de 12 ou 16 rolos para tais valores.

Sendo assim, devido a característica de rolos variarem quase que de forma geral por múltiplos de 4, será aplicado um divisor por 4 a todos os valores de rolos comprados, para que a quantidade solicitada no pedido seja múltipla do número de rolos que tem em uma caixa. Esse processo irá diminuir em quatro vezes a quantidade de valores possíveis para o processamento do algoritmo

Os dados históricos de rolos vendidos são utilizados para a o cálculo da previsão de demanda. Estes dados foram disponibilizados pela empresa, em m^2 , conforme a primeira coluna da Tabela 12. Já na segunda coluna da tabela, encontra-se este valor em rolo, porém, fora do conjunto MDC.

Sendo assim, como explicado anteriormente, o valor de cada linha da segunda coluna foi arredondado para o próximo múltiplo de 4 existente, conforme a terceira coluna da tabela,

que foi representada pelo símbolo “ \approx ”, representando aproximadamente. Devido a este arredondamento alterar a quantidade exata dos dados, calculou-se o erro de arredondamento para o conjunto de dados, de forma a analisar se este erro poderia ser pertinente.

Tabela 12 - Erro histórico de rolos comprados

Estoque (m²)	Estoque (rolos)	\approx (rolos)	\approx (m²)	Erro (m²)	Total (%)
1350	45	48	1440	90	-
1410	47	48	1440	30	-
1830	61	64	1920	90	-
840	28	28	840	0	-
960	32	32	960	0	-
1140	38	40	1200	60	-
1680	56	56	1680	0	-
780	26	28	840	60	-
390	13	16	480	90	-
1350	45	48	1440	90	-
750	25	28	840	90	-
900	30	32	960	60	-
1020	34	36	1080	60	-
1200	40	40	1200	0	-
1770	59	60	1800	30	-
1290	43	44	1320	30	-
1590	53	56	1680	90	-
1770	59	60	1800	30	-
1020	34	36	1080	60	-
1500	50	52	1560	60	-
1500	50	52	1560	60	-
2160	72	72	2160	0	-
1350	45	48	1440	90	-
1500	50	52	1560	60	-
1380	46	48	1440	60	-
32430	1081	1124	33720	1290	3,83%

Fonte: O Autor (2022).

Para isso, foi calculado o valor de rolos total para os valores arredondados, observado na quarta coluna, através da multiplicação da quantidade de m² por rolo (30) e da quantidade de rolos arredondados. A partir disso, foi feita a diferença do número de rolos pelo número de rolos arredondados e armazenados na quinta coluna. Com a soma da quantidade de rolos de erro e a soma da quantidade de rolos arredondadas total, foi possível dividir o erro pelo arredondamento total, encontrando uma porcentagem de erro de 3,83% para o histórico de rolos comprados.

Devido a essa grande quantidade de dados, que para uma planilha implicaria uma linha para cada estado possível, em cada estágio, e por consequência, uma quantidade grande de linhas, o ato de imputar os dados na planilha de forma manual através de um software de planilhas como o Excel é inviável. Para este tipo de problema, o uso de algoritmos que computam estes dados de forma automática pré-estabelecida auxilia na aplicação e resolução de forma mais robusta. Sendo assim, para este problema, desenvolveu-se um algoritmo em linguagem C++ para aplicação do modelo e resolução.

4.3.3.2 Detalhamento do algoritmo de programação dinâmica para o PCE

O desenvolvimento de um algoritmo pode ser feito de muitas formas, sendo em linguagens diferentes, sistemas operacionais diferentes ou *softwares* diferentes. Para este trabalho, escolheu-se que o desenvolvimento do algoritmo seria na linguagem de C++, no Windows e no *software* Visual Studio Code, devido a familiarização com estes serviços.

Figura 14 - Algoritmo de PD considerado para o PCE.

1. Definição dos estágios, variáveis de decisão e os estados do problema em consideração;
2. Realização da previsão de demanda nos dados, obtendo d_n ;
3. Início laço de repetição do algoritmo:
 - 3.1. Alocação de memória para a matriz 3D;
 - 3.2. Geração de dados para as variáveis e_n e e_{n-1} ;
 - 3.3. Aplica as funções para encontrar os custos de armazenagem, de compra do material e dos estágios anteriores;
 - 3.4. Encontre f_n^* (custo ótimo do estágio N) como uma função de x_n para o valor conhecido do último estoque e_n ;
 - 3.5. Faça $f_n^*(e) = \min_{x_n} f_n(e, x_n)$, em que $f_n(e, x_n) = \text{Custo atual (estágio } n) + \text{Custo futuro mínimo (estágios } n + 1 \text{ em diante)}$;
 - 3.6. Repita o passo 3 para os outros estágios até que o primeiro estágio seja analisado;
4. Aplicação método de resolução, para encontrar a quantidade a ser comprada para cada item, custo total de armazenagem, pedido e de material e menor custo de todo o processo.

Fonte: Baseado em (Hillier, 2013).

O algoritmo de programação dinâmica determinística foi desenvolvido seguindo as etapas descritas na Figura 14, e foi elaborado para considerar diferentes valores de entrada de

parâmetros, com intuito de deixar o algoritmo mais genérico. Sendo assim, é possível definir a quantidade de tempo, definido em períodos ou estágio, que seja necessária para certa aplicação.

A base do algoritmo é uma matriz de três dimensões (Matriz 3D), que se trata de uma forma de facilitar o encontro dos dados através de coordenadas. Nesta matriz, são armazenados todos os dados calculados, e são compostos por:

- colunas, formadas pelas dez variáveis mostradas nas dez etapas pelo modelo da planilha;
- linhas, que são todas séries de combinações de demanda passada e atual necessárias, juntamente com os cálculos de custos e os valores ótimos encontrados;
- e estágios, que é formada pela quantidade de períodos da previsão.

A primeira etapa do algoritmo, que se inicia com a importação dos dados, que são divididas pelas variáveis que podem ser setadas na própria implementação, e pelos dados que são obtidos pela extração de arquivos de texto. As variáveis que podem ser setadas na própria implementação podem sofrer alterações conforme a necessidade da empresa, aplicação ou cenário. Estas variáveis, que podem ser alteradas manualmente, são:

- a quantidade de estágios;
- o custo do câmbio do dólar
- metro quadrado por rolo.
- o valor do estoque final ou estoque de segurança;
- o estoque inicial ou estoque disponível;
- a taxa de armazenagem;
- o custo da unidade;
- o custo do container de 20 pés;
- o custo do container de 40 pés;
- e o custo do pedido;
- ajuste de demanda;
- nível de serviço.

A variável de ajuste de demanda é inserida para multiplicar a demanda histórica dos itens por uma variável, de modo a suprir possíveis variações na carteira da empresa, seja ao perder ou ganhar clientes. Já a variável de nível de serviço, que será determinada pela empresa, irá influenciar diretamente na quantidade de estoque de segurança que a empresa irá precisar.

A importação dos dados por arquivos de texto é composta por dois tipos de dados, sendo as possíveis combinações de quantidade de rolos que podem ser comprados e o histórico de rolos comprados. Estas variáveis são armazenadas em vetores e são utilizadas durante o processamento do algoritmo.

Para transformar os dados da combinação de quantidade de rolos para o método MDC, conforme visto na seção 4.6.1.1, foi desenvolvido duas funções, que realizam a previsão de demanda, através da média móvel, e a função para valores arredondados. A função da média móvel utilizada será a de 6 valores, conforme visto na seção 4.5.1.2. Se o horizonte de previsão for menor que 6 períodos, será aplicada uma média móvel com o valor da quantidade de estágios da previsão. A partir disso, é possível iniciar o mecanismo de funcionamento do programa.

O código funciona através de um laço de repetição principal, conforme detalhado na Figura 14, que varia de acordo com o número de estágios, de forma inversa, do último para o primeiro. Para cada repetição do laço, é alocada a memória necessária na matriz e aplicada uma sequência de funções, criadas para facilitar a aplicação e generalização do algoritmo. As funções desenvolvidas foram: combinação de valores; custos; procurar em colunas; completa zero; soma custos; mínimo valor; quantidade ótima; e imprime.

A função de combinação de valores é responsável por aplicar nas três primeiras colunas da Matriz 3D os dados sobre estoque passado, demanda e estoque atual, referentes às variáveis 1, 2 e 3 da Tabela 11. Esses valores são gerados de três maneiras, para o primeiro estágio, para os estágios do meio e para o último estágio. O primeiro estágio depende da quantidade de estoque já disponível na empresa e o último estágio depende do estoque de segurança.

A função de custos é utilizada para calcular a quantidade de rolos compradas (x_n), o custo de estoque (CE_n) e o custo de compra (CP_n). Nesta função, também é incluída uma condição onde se a quantidade de rolos a ser comprada for menor que zero, é atribuído a este custo uma variável falha, onde ela não é mostrada e a linha que tiver essa variável, não é levada em consideração para o resto dos cálculos do algoritmo.

A função de procura em colunas é baseada em um algoritmo de busca, onde encontra-se o custo mínimo do estágio posterior ($f_{n+1}^*(e_n, e_{n+1})$). Esta função atua sob a premissa de que se o estoque atual é igual ao estoque posterior, o custo ótimo desta linha é adotado como custo do estágio posterior. A função de completa zeros é utilizada junto com a função de procura em colunas, sendo que ela é aplicada apenas para o último estágio do método, pois no lugar do custo do estágio posterior é completado com valores zero, pois não possui nenhum estágio posterior.

A função de soma custos é responsável por fazer a soma do custo de estoque, custo de compra e custo do estágio posterior. Essa soma de custos é referente ao $CustoTotal_n$ e é composto apenas por uma soma de três valores.

Já a função de mínimo valor é responsável por encontrar o menor custo ao conjunto de valores relacionados a variável de estoque passado, ou seja, entre um conjunto de valores de estoque passado n , existe uma menor soma de custos para um tal número de rolos comprados, e a partir desta função, é possível definir qual o menor custo ($f_n^*(e_{n-1}, e_n)$) para cada conjunto de estoque passado n .

A função de quantidade ótima é utilizada para encontrar no conjunto de colunas, a quantidade de rolos a serem comprados segundo o menor custo encontrado (x_n^*), tratando-se apenas de uma associação das variáveis das colunas anteriores. E por fim, a função imprime é utilizada para mostrar os dados na tela, de modo a parecer com a planilha da Tabela 9.

Depois das funções serem aplicadas, estes dados são alocados na Matriz 3D, onde é possível então reiniciar o laço de repetição e continuar a rodar os dados no decorrer dos próximos estágios, até que seja suprido a quantidade de períodos propostos. Com a Matriz 3D completa com todas as combinações de estoque atual e passado pertinentes, é possível analisar quando e quanto deve se comprar.

Porém, em algumas aplicações, podem haver dezenas de milhares de linha no código, inviabilizando a procura manual dos códigos. Sendo assim, desenvolveu-se um algoritmo que faz a leitura de toda a Matriz 3D e mostra na tela quanto deve-se comprar, em qual estágio que as compras devem ser feitas e o custo total de toda a operação, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Informações da saída do programa

Deve-se comprar	200.00	produtos no estagio	1 e ficado com	148.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	2 e ficado com	92.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	3 e ficado com	44.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	4 e ficado com	200.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	5 e ficado com	156.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	6 e ficado com	108.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	7 e ficado com	60.00	rolos.
Deve-se comprar	0.00	produtos no estagio	8 e ficado com	32.00	rolos.
O custo de armazenagem eh de R\$3392.00.					
O custo de compras eh de R\$189072.00.					
O custo dos pedidos eh de R\$67200.00.					
O menor valor de estoque eh de R\$259254.40					

Fonte: O Autor (2022).

A partir da saída do algoritmo, é possível identificar certos pontos que serão necessários para discutir os resultados do estudo. Observa-se os valores de previsão de estoque para cada estágio, a quantidade a ser comprada em cada estágio, a quantidade que ficará estocada em cada período, a soma do custo que será gasto em todos os períodos calculados, determinado como menor valor de estoque, junto com os custos de cada parte, divididos pelo tipo de custo, sendo de custo do material, custo de armazenagem e custo dos pedidos.

Na Figura 15 também é possível observar que se deve comprar 200 rolos no primeiro estágio. Porém, observa-se também que a quantidade de material estocado neste período é de 148 unidades, o que pode parecer um erro pois o valor não é maior que 200. Destaca-se que as datas de compra definidas na saída do modelo devem levar em consideração o lead time de 3 meses, ou seja, deve-se fazer as compras na data $n - 3$.

Com essa saída, é possível analisar diretamente cada dado, e principalmente, qual será a movimentação do estoque com o passar dos estágios. Essas informações também podem ser utilizadas para propor certos cenários, abrangendo ainda mais as possíveis aplicações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da problemática oriunda da empresa do estudo, do método proposto, do algoritmo desenvolvido e das informações coletadas e tratadas da empresa, é possível aplicá-los para obter os resultados e, posteriormente, discuti-los, de forma a entender o comportamento do algoritmo. Sendo assim, será feita uma gestão de estoque utilizando os dados históricos da empresa comparando com o algoritmo, e também, será proposto cenários que poderão servir para outras aplicações, empresas ou produtos.

5.1 CUSTO TOTAL DA GESTÃO DE ESTOQUE

A principal forma de identificar se o algoritmo apresenta uma redução no custo total do processo da gestão de estoque é comparar os resultados obtidos com o praticado pela empresa. Sendo assim, escolheu-se um período, sendo os 12 meses do ano de 2021, para analisar quais foram os gastos totais de gestão de estoque da empresa segundo seu planejamento e o método de PDD aplicado através do algoritmo.

Utilizou-se os dados reais, disponibilizados pela empresa conforme as Tabelas 2 e 3, para os dois métodos, com o objetivo de padronizar a aplicação e observar analiticamente suas diferenças. O fator de nível de estoque utilizado proposto pela empresa foi de 0,97. Para o cálculo do método empírico utilizado pela empresa, foi desenvolvido uma tabela com as quantidades atuais de estoque, em rolos, para o cálculo de taxa de armazenagem. Também foram adicionados os dados de 2021 sobre entradas e saídas de material em estoque, que também estão contidos nas Tabelas 2 e 3. Estes dados foram alocados na Tabela 13.

Tabela 13 – Gestão de estoque de 2021

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
e_n	148	112	64	12	180	136	84	40	4	252	196	140
d_n	60	36	52	52	72	48	52	48	36	36	56	56
x_n	0	0	0	0	240	0	0	0	0	280	0	0
Custos Totais												R\$468.652,32

Fonte: O Autor (2022).

A primeira linha apresenta a quantidade de material em estoque (e_n). A segunda linha apresenta a quantidade de rolos que vão ser demandados por estágio (d_n). E a terceira linha ilustra quantidade de material adquirido pela empresa em cada estágio (x_n).

Ao se multiplicar a soma de todos os valores de e_n pelo custo de taxa de armazenagem por rolo por mês, obteve-se um custo de armazenagem de 4.390,40 reais. A empresa comprou no ano de 2021, 240 rolos no mês de abril e 280 rolos no mês de outubro, sendo assim, foram necessários dois pedidos de containers de 20 pés, obtendo um custo de 134.400,00 reais.

Para calcular o custo total da compra do material, será utilizado um valor de conversão de 5,20 reais para cada dólar, referente a cotação do dia 14 de fevereiro de 2022, e que será utilizada para o resto do estudo. Sendo assim, ao multiplicar a quantidade comprada de 280 mais 240 rolos pelo câmbio do dólar e pelo custo de cada rolo, que é de 181,80 dólares, obteve-se um custo de 491.587,20 reais. Ao fazer a soma dos custos de armazenagem, pedido e compra, o custo total da empresa no período de 2021 através do método empírico foi de 630.377,60 reais, sendo que 140 rolos ficaram armazenados em estoque no final do período de previsão.

Ao aplicar estes dados da Tabela 13 no método com o algoritmo, observou-se que foi feito apenas a compra de material no estágio 4, sendo uma quantidade de 412 rolos. O estoque final de material estocado para ser utilizado no próximo período de planejamento foi de 32 rolos. Sendo assim, foi necessário apenas um container de 40 pés, com custo total do pedido de 71.100,00 reais. O custo de armazenagem foi de 8.064,00 reais e o custo de compra de material foi de 389.488,32 reais. A soma do custo total do período considerado pelo método do algoritmo foi de 468.652,32 reais, como ilustrado na última linha da Tabela 13.

5.2 CENÁRIOS PROPOSTOS PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO

O primeiro cenário será nomeado como cenário base e engloba o problema enfrentado pela Perfil Group, através das informações reais disponibilizadas pela empresa. O problema da empresa servirá de base para o desenvolvimento dos parâmetros que serão alterados para construir novos cenários. Sendo assim, será primeiro descrito os parâmetros utilizados para o problema da empresa, e depois, será proposto novas alternativas, explicando para cada um o porquê de sua escolha e qual poderia ser sua aplicação.

Os principais pontos observados no problema da empresa envolvem o custo do material em relação ao custo da taxa armazenagem, o custo do frete do container, a demanda maior de itens e o nível de serviço. Para cada um destes fatores será proposto um cenário. Todos os cenários irão ser comparados com o Cenário 1 e ver se o custo total do processo será maior ou menor, e em qual porcentagem.

O primeiro cenário contemplará o custo do material e o custo da taxa de armazenagem. Se o custo de armazenagem fosse similar ao custo do material, ou apenas aumentado em

algumas vezes em relação ao próprio valor, seria necessário ter mais pedidos, em diferentes estágios, em relação ao cenário 1?

O segundo cenário abordará o custo de compra do material do fornecedor da China. Se o item a ser comprado tiver um custo menor, isso influenciaria em relação aos custos de pedido, frete e taxa de armazenagem?

O terceiro cenário é relacionado ao custo do frete do container. Através de informações disponibilizadas pela empresa sobre o cenário global de transporte e frete, os custos de frete de containers de 20 e 40 pés da China para o Brasil são parecidos, em torno de 6% de diferença. Porém, estes mesmos containers, vindos da Alemanha, tem diferença em torno de 35%. Sendo assim, se o material viesse da Alemanha, com a diferença de custo do frete mais proporcional, quais seriam os resultados obtidos?

O quarto cenário envolve a quantidade de demanda dos itens. Se fosse proposto um aumento significativo na demanda para os próximos períodos, tendo em vista um tamanho máximo por pedido da quantidade de rolos para um container de 40 pés, o que isso afetaria em relação ao Cenário 1? A quantidade de pedidos seria maior? Uma maior ou menor quantidade de produtos armazenados?

O quinto cenário será em relação ao nível de serviço que a empresa pode preferir adotar. O nível de serviço irá influenciar na quantidade de rolos no estoque de segurança. Devido a esta quantidade de estoque mínimo maior ou menor, o que acontecerá com a quantidade de pedidos feitos?

Tabela 14 - Variáveis que sofrerão alteração para os cenários

Cenário	Taxa de armazenagem [R\$]	Custo material [\$]	Container 20" [\$]	Container 40" [\$]	Ajuste demanda [%]	Nível serviço [%]
Base	3,20	181,80	9400,00	10000,00	100%	97,00%
1	64,00	181,80	9400,00	10000,00	100%	97,00%
2	3,20	60,60	9400,00	10000,00	100%	97,00%
3	3,20	181,80	7400,00	10000,00	100%	97,00%
4	3,20	181,80	9400,00	10000,00	200%	97,00%
5	3,20	181,80	9400,00	10000,00	100%	99,99%

Fonte: O Autor (2022).

Na primeira linha da Tabela 14 são expostas as variáveis utilizadas no cenário base, que servirão de referência para os próximos cenários. Na tabela também são ilustrados quais

dados serão aplicados no algoritmo para cada cenário. Todos os cenários utilizaram um horizonte de previsão de 6, 12 e 18 meses (estágios).

Tendo em vista os cenários propostos, será feita a aplicação das informações no algoritmo de forma a comparar os resultados e encontrar possíveis melhorias para esta e outras aplicações.

5.3 APLICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO NOS CENÁRIOS

Nesta etapa será mostrado os resultados obtidos nos cenários através da aplicação dos dados no algoritmo. As variáveis fixas, que serão utilizadas para todos os cenários são o custo por pedido, que será de 6100 reais, a variável de conversão do dólar e o estoque inicial, ou estoque disponível, que será de 204 rolos, conforme observado na seção 4.4.2.

Para cada cenário, será observado 3 diferentes períodos de previsão, sendo para 6, 12 e 18 meses (estágios). Também será observado qual foi o custo total mínimo de todo o processo naquele período, quando e quanto foi comprado, e por fim, o custo total mínimo dividido por tipo de custo, sendo o custo de armazenagem, custo de compra de material e custo do pedido, que inclui o frete.

5.3.1 *Cenário base*

Ao aplicar as informações da Tabela 14 no cenário base, para os períodos de tempo de 6, 12 e 18 meses, identificou-se os custos que estão inseridos na Tabela 15. Para uma previsão de 6 meses, a empresa deverá adquirir 104 rolos no período 4, de forma a minimizar o custo e não faltar estoque em todo o processo. Para um período de 12 meses, a empresa precisa comprar 396 rolos no estágio 4. E para 18 meses, a empresa precisa fazer a compra de 268 rolos no estágio 4 e 416 rolos no estágio 10.

Tabela 15 - Custos da aplicação para o cenário base

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 2.227,20	R\$ 98.317,44	R\$ 67.200,00	R\$ 167.744,64
12	R\$ 7.616,00	R\$ 374.363,00	R\$ 71.100,00	R\$ 453.079,00
18	R\$ 10.457,60	R\$ 646.626,24	R\$ 138.300,00	R\$ 795.383,84

Fonte: O Autor (2022).

5.3.2 Cenário 1 – Taxa de armazenagem

Com os dados da Tabela 14, foi aplicado o cenário 1 e os dados obtidos foram armazenados na Tabela 16. Para uma previsão de 6 meses, a empresa deverá comprar 104 rolos no estágio 4. Para 12 meses, a empresa precisa comprar 396 rolos no estágio 4. E para 18 meses, a empresa precisa comprar 268 rolos no estágio 4 e 416 rolos no estágio 10.

Tabela 16 - Custos da aplicação para o cenário 1

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 44.544,00	R\$ 98.317,44	R\$ 67.200,00	R\$ 210.061,44
12	R\$ 152.320,00	R\$ 374.362,56	R\$ 71.100,00	R\$ 597.782,56
18	R\$ 209.152,00	R\$ 646.626,24	R\$ 138.300,00	R\$ 994.078,24

Fonte: O Autor (2022).

Para este cenário, observou-se também que se houver um aumento no custo da taxa de armazenagem, a ponto de ficar parelha em relação ao custo do material e o custo do frete, pode alterar o comportamento do algoritmo em relação a quantidade a ser comprado e os estágios que devem ser feitos os pedidos.

Ao aumentar o valor de taxa de armazenagem por rolo por mês para 100,2 reais, tendo em vista que o valor real é de 3,2 reais, os custos resultantes são mostrados na Tabela 17. Para 6 meses de previsão, quanto e quando comprar continua o mesmo do cenário base e do cenário 1. Porém, para 12 meses, é necessário que seja feito a compra de 172 rolos no Estágio 4 e 224 rolos no estágio 8. E para 18 meses, deverá ser comprado 220 rolos no estágio 4, 244 rolos no estágio 9 e 220 rolos no estágio 14.

Tabela 17 - Nova proposta para os custos da aplicação para o cenário 1

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 69.739,20	R\$ 98.317,44	R\$ 67.200,00	R\$ 235.256,64
12	R\$ 148.696,80	R\$ 374.362,56	R\$ 134.400,00	R\$ 657.459,36
18	R\$ 234.868,80	R\$ 646.626,24	R\$ 201.600,00	R\$ 1.083.095,04

Fonte: O Autor (2022).

5.3.3 Cenário 2 – Custo do material

Ao aplicar as informações da Tabela 14 para o cenário 2, obteve-se os dados obtidos na Tabela 18. As quantidades de rolo comprados foram iguais ao cenário base, sendo para 6 meses, 104 rolos comprados no estágio 4, para 12 meses, 396 rolos no estágio 4, e para 18 meses, 268 rolos no estágio 4 e 416 rolos no estágio 10.

Tabela 18 - Custos da aplicação para o cenário 2

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 2.227,20	R\$ 32.772,48	R\$ 67.200,00	R\$ 102.199,68
12	R\$ 7.616,00	R\$ 124.787,52	R\$ 71.100,00	R\$ 203.503,52
18	R\$ 10.457,60	R\$ 215.542,08	R\$ 138.300,00	R\$ 364.299,68

Fonte: O Autor (2022).

5.3.4 Cenário 3 – Custo container

A aplicação do cenário 3 foi feita como nos outros cenários, através dos dados da Tabela 14, e os resultados foram alocados na Tabela 19. Novamente as quantidades a serem compradas e em qual estágio comprar foram iguais ao cenário base e cenário 2.

Tabela 19 - Custos da aplicação para o cenário 3

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 2.227,20	R\$ 98.317,44	R\$ 54.200,00	R\$ 154.744,64
12	R\$ 7.616,00	R\$ 374.362,56	R\$ 71.100,00	R\$ 453.078,56
18	R\$ 10.457,60	R\$ 646.626,24	R\$ 125.300,00	R\$ 782.383,84

Fonte: O Autor (2022).

5.3.5 Cenário 4 – Ajuste da demanda

Com os dados da Tabela 14, foi aplicado no algoritmo, e os resultados obtidos foram armazenados na Tabela 20. Para uma previsão de 6 meses, deve-se comprar 400 rolos no estágio 2. Para uma previsão de 18 meses, deve-se fazer a compra dos rolos em 3 períodos diferentes, sendo 512 rolos no estágio 2, 492 rolos no estágio 8 e 556 rolos no estágio 13.

Ao aplicar o cenário 4 para um período de 12 meses segundo os dados da Tabela 14 obteve um problema no processamento do algoritmo. Ocorreu um problema de falha de segmentação, onde não foi possível identificar os resultados.

Tabela 20 - Custos da aplicação para o cenário 4

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 4.326,40	R\$ 378.144,00	R\$ 71.100,00	R\$ 453.570,40
12	-	-	-	-
18	R\$ 14.694,40	R\$ 1.474.761,60	R\$ 213.300,00	R\$ 1.702.756,00

Fonte: O Autor (2022).

5.3.6 Cenário 5 – Nível de serviço

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos ao aplicar as informações da Tabela 14 no cenário 5. Para uma previsão de 6 meses, deverá ser feito a compra de 128 rolos no estágio 3. Para 12 meses, deverá ser feito a compra de 420 rolos no estágio 3. E para 18 meses, deverá ser feito a compra de 224 rolos no estágio 3 e 464 rolos no estágio 9.

Tabela 21 - Custos da aplicação para o cenário 5

Estágios	Custo de armazenagem	Custo de compra do material	Custo do pedido	Menor custo total do processo
6	R\$ 2.790,40	R\$ 121.006,08	R\$ 67.200,00	R\$ 190.996,48
12	R\$ 9.574,00	R\$ 397.051,20	R\$ 71.100,00	R\$ 477.725,20
18	R\$ 12.876,80	R\$ 669.314,88	R\$ 138.300,00	R\$ 820.491,68

Fonte: O Autor (2022).

5.3.7 Informações sobre o processamento do algoritmo

A partir do funcionamento do algoritmo, é possível identificar algumas informações referentes ao processamento e quantidade de dados que são gerados ao rodar o algoritmo. A principal delas é em relação a quantidade de linhas geradas de informação, compostas por dez dados em cada linha, como ilustrado na Tabela 11, do modelo de PDD em planilha.

O código quando processado possui linhas de código bruto, que são todas as linhas processadas, incluindo as linhas com valores de compra impossível (menor que zero) e as linhas com valores de compra zero ou positivo, e também, as linhas de código útil, que contém apenas as linhas com valores de compra zero ou positivo.

Sendo assim, ao rodar o cenário base, com um modelo de previsão para 6 estágios, o algoritmo utiliza 78.478 linhas de código bruto em processamento, e mostra na tela 43.915 linhas de código útil. Ao rodar o algoritmo para 12 estágios, ele gera 196.078 linhas de código bruto e 109.869 linhas de código útil. E para 18 estágios, 313.678 linhas de código bruto e 175.701 linhas de código útil.

A partir de dos dados obtidos nas Tabelas 15 a 21 e no processamento do algoritmo, é possível discutir o comportamento de cada cenário, através das comparações entre os resultados. A partir destas discussões, será possível propor melhorias ou identificar erros durante o processo.

5.4 DISCUSSÕES

Ao analisar os dados oriundos da aplicação com os dados históricos e compará-los os custos totais resultantes do modelo empírico com o modelo do algoritmo, nota-se inicialmente que o método do algoritmo teve um custo 35% menor. Porém, essa análise acaba sendo um pouco defasada devido a quantidade de material que fica em estoque que poderá ser utilizada nas próximas previsões pela empresa, pois a empresa continuará exercendo os processos de importação e venda do item.

Então, de forma a corrigir esta discrepância, será feito a diferença entre a quantidade de material comprado entre os dois modelos, e esta quantidade de rolos a mais será decrescido em forma de custo de compra de material do método empírico, que apresenta uma quantidade final de estoque maior. Sendo assim, a diferença de rolos é de 108 unidades, que multiplicadas pelo custo do item e pela variável de câmbio do dólar, chega em um valor de 102.098,88 reais.

Ao diminuir o custo do material excedente pelo custo total do método empírico, é obtido um custo de 528.278,72 reais, e que, teoricamente mantém um estoque final de 32 rolos, tal qual o método do algoritmo. Sendo assim, é possível observar que ao contrapor o custo do método empírico com o custo encontrado de 468.652,32 reais pelo método do algoritmo, notou-se que o método do algoritmo apresentou uma redução de custo de 13% ao utilizar os dados da empresa do ano de 2021.

Ao observar os resultados obtidos pela aplicação do algoritmo nos diferentes cenários, é possível observar algumas tendências para este tipo de problema e dados da empresa. Em todos os casos, mesmo ao aumentar ou diminuir o valor das variáveis para as previsões de 6 e 12 meses, deveria ser comprado a quantidade de rolos que ia satisfazer a demanda até o final da previsão, sobrando apenas a quantidade de rolos do estoque de segurança.

Este comportamento acontece devido ao custo de armazenagem por rolo em comparação ao custo por pedido por rolo. Tendo em vista que o custo total do pedido para um container de 20 pés, que podem até 280 rolos, é de 67.200 reais e o custo de para um container de 40 pés, que comporta até 560 unidades, é de 71.100 reais, é possível calcular um custo de rolo por pedido para cada tipo de container. A partir da divisão encontra um custo de 240 reais por rolo para o container de 20 pés e 126,96 reais para o container de 40 pés.

Ao comparar estes dois custos com o custo mensal de armazenagem por rolo, que é de 3,20 reais, observa-se a discrepância causada. Sempre valerá mais a pena, quando for feito o pedido, comprar o maior número de rolos que forem necessários, conforme a previsão de demanda, mesmo que os rolos tenham que ficar estocados por todo os estágios subsequentes. Um dos principais motivos para esta discrepância é devido à Pandemia de COVID-19, que acarretou no aumento do custo do frete de containers por todo o planeta, o que refletiu nos containers fretados da China.

De forma a tentar deixar o custo de armazenagem mais próximo do custo por pedido, foi desenvolvido uma nova proposta para os custos da aplicação do cenário 1, conforme a Tabela 17. Ao submeter o custo mensal por rolo armazenado pela empresa terceira a um custo de 100,2 reais, o comportamento do algoritmo para as previsões de 12 e 18 meses foram diferentes das obtidas no cenário 1 e conseqüentemente no cenário base.

Para uma previsão de 12 meses, ao invés de comprar 396 rolos em apenas um estágio, tendo que fazer apenas um pedido de um container de 40 pés, a nova proposta de cenário 1 propôs que fossem feitos dois pedidos, particionando a carga em dois containers de 20 pés, um com 172 e o outro com 224 rolos. Isso mostra um cenário onde o custo total do pedido e o custo de armazenagem são próximos, fazendo com que possa ter um universo maior de possibilidades, não só seguindo a tendência dos outros cenários do algoritmo, como visto anteriormente.

Outro ponto observado é que o algoritmo tende a escolher sempre o container de 40 pés, ao invés do container de 20 pés, devido a diferença de custo entre eles ser de 6% e a quantidade de material que pode ser transportado ser o dobro. A escolha do container de 20 pés ocorre quando a previsão de demanda por estágio não supera 280 rolos.

Quando o algoritmo prevê que seja feito mais de um pedido durante a previsão, ou seja, apenas um frete com 560 rolos não seja suficiente, o método tende a fazer um primeiro pedido com menos quantidade de rolos, quando o estoque de segurança é atendido, e faz um segundo ou terceiro pedido com uma quantidade maior. Essa etapa é observada majoritariamente nos cenários com previsão de 18 meses.

Nos cenários 1, 2 e 3 foram indicadas as mesmas quantidades de rolos para serem compradas e nos mesmos estágios, tal qual o cenário base. Este fator mostra que as alterações propostas por estes três cenários não influenciaram na tendência do algoritmo. Porém, os cenários 4 e 5 apresentaram certas diferenças em relação ao cenário base. Essas diferenças são observadas pois ambos os cenários propõem fatores relacionados ao aumento de demanda ou o aumento da quantidade de rolos no estoque de segurança, e faça com que seja necessário fazer mais pedidos, adquirindo mais material e mais cedo nos estágios.

6 CONCLUSÃO

Tecnologias da informação aplicadas a modelos de armazenamento de dados são cruciais na tomada de decisão estratégica das organizações quando seu objetivo é desenvolver vantagens competitivas. O principal objetivo da gestão de estoque eficiente em uma cadeia de suprimentos, é ter o estoque certo no local certo para minimizar os custos do sistema ao mesmo tempo em que as necessidades dos clientes são satisfeitas. Este tipo de problema pode ser encontrado em diversas empresas, como é o caso da Perfil Group.

Este trabalho considerou o problema de gestão de estoques da empresa Perfil Group de um item que apresenta um *lead time* alto em seu processo de importação. A principal dificuldade enfrentada pela empresa é definir quando uma determinada quantidade deste material precisa ser comprada, para que a demanda seja atendida e não falte material, o que causaria um problema de confiabilidade para os clientes.

Para a solução do problema foi proposto um algoritmo que utiliza o método de programação dinâmica determinística, o qual considera os custos em relação à armazenagem do item em uma empresa terceira, o custo de compra do material e sua conversão para o câmbio do real, o custo da importação do item e o frete. Em relação a estes custos, o algoritmo gera, atendendo as restrições impostas pela empresa, várias combinações possíveis, às quais após serem analisadas pode-se identificar a combinação de menor custo do processo, ou seja, em qual momento deve ser feita a compra e em que quantidade.

O método da programação dinâmica determinística para fazer a gestão de estoque de empresas é em geral utilizado em forma de planilhas. Porém, a sua aplicação através destes meios acarreta em um trabalho árduo, quando se considera problemas que envolvem muitos dados e estágios. O desenvolvimento de um algoritmo que automatiza esta etapa de construção dos dados para análise, faz com que seja possível realizar a aplicação deste método para diversos cenários de forma rápida.

Uma das desvantagens que a tendência do método em comprar a maior quantidade de material possível nos primeiros estágios para estocar é para as empresas que não possuem uma capacidade de investimento inicial, para adquirir a quantidade de itens para todo o período de previsão logo nos primeiros estágios. Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se considerar restrições de limitante para investimento fixo ou variável em cada um dos estágios considerados no horizonte de planejamento, de modo a contornar essa adversidade e generalizar ainda mais a aplicação do algoritmo.

Outra sugestão para trabalhos futuros é aplicar um método no algoritmo onde o *lead time* do pedido é variável. Com o lead time do pedido variável, e não máximo, como utilizado no estudo, o problema fica mais próximo da realidade, e pode-se também, apresentar mais melhorias com intuito de otimizar o custo total do processo de previsão.

O algoritmo de programação dinâmica determinística em linguagem C++ foi capaz de auxiliar na gestão de estoque da empresa Perfil Group, ao obter uma redução de custo em torno de 13% quando comparado, em um período de um ano, ao sistema empírico que a empresa utilizava para fazer a previsão de demanda.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, D. et al. Application of Web Based Book Calculation using Deterministic Dynamic Programming Algorithm. **Journal of Physics Conference Series**. Kuching, 2017. p. 25–2.
- AHRENS, S. **A seleção simultânea do ótimo regime de desbastes e da idade de rotação, para povoamentos de *Pinus taeda* L., através de um modelo de programação dinâmica**. 1992. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.
- ALBRECHT, D. L. et al. Modelo de previsão por séries temporais: uma aplicação para serviços comerciais em uma concessionária de energia elétrica. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis v. 11, n. 21, p. 14-29, 2019.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2006.
- BAZZOTTI, C.; GARCIA, E. A importância do sistema de informação gerencial na gestão empresarial para tomada de decisões. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, Marechal Cândido Rondon, v. 6, n. 11, p. 1-18, 2006.
- BERTAGLIA, P. R. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento**. 3. ed. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2016.
- BESSA, M. J. C.; CARVALHO, T. M. X. B. de. Tecnologia da informação aplicada à logística. **Revista ciências administrativas**, Fortaleza, v. 13, n. especial, p. 120-127, 2005.
- BRANSKI, R. M.; FRANCO, R. A. C.; LIMA JUNIOR, O. F. Metodologia de estudo de casos aplicada à logística. **XXIV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte**. 2010. p. 2023-10.
- CAMPELLO, R. E. **Programação Dinâmica Determinística e Estocástica**. Rio de Janeiro: XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2002.
- CHIAVANETO, I. **Administração de Materiais: Uma abordagem introdutória**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Cengage, 2018.
- DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.
- DIAS, M. A. P. **Administração de materiais: Uma abordagem logística**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GARCIA, E. et al. **Gestão de estoques: otimizando a logística e a cadeia de suprimentos**. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006.

GHADGE, A. et al. The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**. v. 31, n. 4, p. 669-686, 2020.

GOMES, C. F. S.; RIBEIRO, P. C. C. **Gestão da cadeia de suprimentos integrada à tecnologia da informação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Senac Rio, 2014.

FARAHVASH, P.; ALTIOK, T. A multi-period inventory model with multi-dimensional procurement bidding. **Annals of Operations Research**, New Jersey, v. 186, n. 1, p. 101-118, 2011.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. Ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2013.

KIM, G.; WU, K.; HUANG, E. Optimal inventory control in a multi-period newsvendor problem with non-stationary demand. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 1, p. 139-145, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2014.12.002>. Acesso em 30 abr. 2021.

KLIGERMAN, A. S. **Operação ótima de subsistemas hidrotérmicos interligados utilizando programação dinâmica estocástica dual**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MARTINEZ, J. M.; SANTOS, S. A. Métodos computacionais de otimização. **Colóquio Brasileiro de Matemática**. Apostilas, v. 20, 1995.

MARTINS, P. G.; ALT, P. R. C. **Administração de Materiais e Recursos Patrimoniais**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2009.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M.C. **Análise de séries temporais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2006.

NOVAES, A. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OLIVEIRA, R. E.; MELO, J. A. M. A relevância das ferramentas de gestão de estoques: um estudo de caso em uma empresa do mercado gráfico. **Negócios em Projeção**, v. 6, n. 1, p. 69-90, 2015. Disponível em: <http://revista.faculdadeprojecao.edu.br/index.php/Projecao1/article/view/444>. Acesso em 30 abr. 2021.

PAURA, G. L. **Fundamentos da logística**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2012.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Nova Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

RAYMUNDO, E. A.; GONÇALVES, L. W. N.; RIBEIRO, N. S. Pesquisa operacional na tomada de decisão: modelo de otimização de produção e maximização do lucro. **Revista de Gestão & Tecnologia**, v. 3, n. 1, 2015. Disponível em: <http://www.revista.unisal.br/lo/index.php/reget/article/view/169>. Acesso em 30 abr. 2021.

SILVA, T.; VALLADÃO, D.; HOMEM-DE-MELLO, T. **A Data-Driven Approach for a Class of Stochastic Dynamic Optimization Problems**. Optimization Online, 2019.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudos de caso**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

STAUDT, F. H. **Estudo de métodos de previsão de demanda com incorporação de julgamentos**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 169p.

WANKE, P. **Gestão de Estoques na Cadeia de Suprimentos: Decisões e Modelos Quantitativos**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

YIN, R. K. Case study research: Design and methods. Ebook. Sage, 2009.

ZHANG, Z. et al. Use of parallel deterministic dynamic programming and hierarchical adaptive genetic algorithm for reservoir operation optimization. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 2, p. 310-321, 2013.

