



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GEISIANE OLIVEIRA DOS SANTOS

**ESTUDO DE GESTÃO INTEGRADA DE MANUTENÇÃO E
SPARE PARTS: uma abordagem de simulação dinâmica**

Caruaru

2020

GEISIANE OLIVEIRA DOS SANTOS

**ESTUDO DE GESTÃO INTEGRADA DE MANUTENÇÃO E
SPARE PARTS: uma abordagem de simulação dinâmica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes.

Caruaru
2020

Catálogo na fonte:
Bibliotecário – Raul César de Melo - CRB/4 - 1735

S237e Santos, Geisiane Oliveira dos.
Estudo de gestão integrada de manutenção e spare parts: uma abordagem de simulação dinâmica / Geisiane Oliveira dos Santos. – 2020.
149 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências.

1. Administração de material. 2. Controle de estoque. 3. Programas de computador. 4. Simulação (Computadores). I. Lopes, Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2020-049)

GEISIANE OLIVEIRA DOS SANTOS

**ESTUDO DE GESTÃO INTEGRADA DE MANUTENÇÃO E
SPARE PARTS: uma abordagem de simulação dinâmica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 28/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Lucimário Góis de Oliveira Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Thiago Poletto (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, a Deus, por me permitir chegar até aqui, estando comigo sempre, incessantemente. Sem ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, por terem me dado a vida e estarem ao meu lado em todos os momentos e por terem batalhado para que eu me tornasse o que sou hoje.

Aos meus irmãos, por serem meu porto seguro, em especial a Samuel, por além de ser meu irmão ser também o melhor companheiro.

Aos meus amigos e funcionários do mestrado, pela convivência e amizade. Em especial a Thiago, Dani, Thayse e Hélder.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela minha formação.

À FACEPE, pelo auxílio financeiro.

Ao meu orientador, Rodrigo Sampaio, por conduzir e orientar a pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor a gestão conjunta entre *Spare Parts (SP)* e Manutenção, em uma cadeia de suprimentos, por meio de um modelo de simulação de sistema dinâmico. O modelo proposto, baseado no pensamento sistêmico, é desenvolvido para modelar as relações complexas entre o controle de estoque de *SP* e as políticas de manutenção, mensurando o impacto da gestão conjunta dessas decisões sobre o desempenho da cadeia de suprimentos. Uma aplicação numérica foi realizada, combinando diferentes parâmetros das políticas de estocagem e das ações de manutenção, gerando 4.344 cenários. Como resultado, a política *Review Period, Order Up to Level (R,S)* apresentou maior eficiência em termos de custo e atendimento de pedido, contudo ao reduzir a taxa de falha a política *Order Point, Order Quantity (s,Q)* foi apontada como melhor escolha, identificando que a taxa de falha é o principal fator determinante na escolha da política de estocagem devido aos impactos diretos na quantidade de equipamentos em reparo e a necessidade de *SP*. Definiu-se também o percentual de disponibilidade mínima que cada elo deve possuir para assegurar o máximo atendimento de pedidos, por meio dimensionamento adequado das ações de manutenção a serem realizadas. O trabalho fornece uma ferramenta que auxilia o gestor avaliar as possíveis estratégias a serem seguidas, antes de implementá-las de fato, fornecendo uma visão do padrão comportamental que o sistema real pode assumir ao tomar uma decisão, antecipando os possíveis ganhos e consequências oriundos de cada escolha e, conseqüentemente, acarretando uma série de vantagens competitivas às organizações.

Palavras-chave: Gestão da Manutenção. *Spare Parts*. Gerenciamento de Estoque. Coordenação Conjunta. Sistema dinâmico. Simulação.

ABSTRACT

This paper aims to propose a dynamic system simulation model for joint management of spare parts (*SP*) and maintenance within a supply chain environment. This model, which is based on systemic thinking, is developed to model the complex relationship between the *SP* inventory control and maintenance policy, measuring the effect of those joint management decisions on the supply chain's performance. A numeric implementation combining different stock policy parameters and maintenance actions was performed, resulting in an amount of 4,344 scenarios. Hence, the policy *Period Order Up to Level (R, S)* reported greater efficiency in terms of cost and order fulfillment accuracy. However, with a lower failure rate, the policy *Order Point, Order Quantity (s,Q)* reported the best results. In the final analysis, these results indicate the failure rate as the main factor to determine the proper stock policy due to the direct impacts it has on the number of equipments under maintenance and the number of *SP* required. Additionally, through a proper maintenance actions planning, it was identified the minimum availability rate of each supply chain link to ensure maximum order fulfillment accuracy. In summary, this paper provides a tool to support managers to evaluate possible maintenance strategies for their systems by providing a holistic preview of conceivable gains and losses their systems would assume under a different set of decisions, which is designed to improve competitive advantages.

Keywords: Maintenance Management. Spare Parts. Inventory management. Joint Coordination. Dynamic system. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Diagrama 1-	Metodologia de Pesquisa.....	15
Figura 1 -	Custos de Estoque.....	22
Diagrama 2-	Manutenção preventiva versus Manutenção corretiva.....	24
Figura 2 -	Gerenciamento integrado de <i>Spare Parts</i>	26
Diagrama 3-	Exemplo Diagrama de <i>Loop Causal</i>	28
Figura 3 -	Elementos chaves para notação de CLDs.....	28
Quadro 1 -	Artigos revisados (Sistema dinâmico).....	34
Diagrama 4-	Notação do <i>Stock-Flow diagram</i>	39
Quadro 2 -	Artigos revisados (Manutenção e simulação).....	42
Gráfico 1 -	Número de publicações anual de Simulação e Manutenção (2009-2019).....	48
Gráfico 2-	Percentual de publicação, por país, de simulação aplicada à manutenção.....	48
Gráfico 3 -	Journals com maior frequência de publicações de simulação aplicada à manutenção.....	49
Gráfico 4-	Estratégias de manutenção mais abordadas entre os artigos avaliados.....	50
Gráfico 5 -	Técnicas de simulação mais utilizadas nos artigos avaliados..	50
Gráfico 6-	Tipos de problemática de otimização nos artigos avaliados....	51
Gráfico 7 -	Objetivos de decisão mais citados nos artigos avaliados.....	51
Gráfico 8-	Variáveis de decisão mais reportadas nos artigos avaliados....	52
Quadro 3 -	Artigos revisados (<i>Spare Parts</i>).....	59
Gráfico 9 -	Número de publicações por ano (<i>SP</i>) (2009-2019).....	63
Gráfico 10-	Percentual de publicação (<i>SP</i>) por país.....	63
Gráfico 11-	Número de publicações (<i>SP</i>) por Journals.....	64
Figura 4-	Dados e técnicas dos artigos revisados (<i>SP</i>).....	64
Figura 5 -	Objetivos de estudo dos artigos avaliados (<i>SP</i>).....	65
Gráfico 12 -	Objetivos de decisão mais frequentes nos artigos avaliados (<i>SP</i>).....	66
Quadro 4 -	Artigos revisados (Manutenção e <i>Spare Parts</i>).....	73
Gráfico 13-	Artigos de otimização conjunta avaliados durante o período (2009-2019).....	78
Gráfico 14 -	Percentual de publicação de otimização conjunta, por país....	78

Gráfico 15-	Jornais mais frequentes entre as publicações de otimização conjunta revisadas.....	79
Gráfico 16 -	Estratégias e políticas de manutenção presente em estudos de otimização conjunta.....	79
Gráfico 17-	Variáveis de decisão frequentes na otimização conjunta.....	80
Gráfico 18 -	Tipo de objetivo de decisão nos artigos de otimização conjunta, revisados.....	81
Figura 6-	Diagrama de Loop causal do modelo proposto.....	89
Figura 7 -	CLD - Módulo 1 (Gestão da Manutenção).....	90
Diagrama 5-	Diagrama de transição (sistema de manutenção).....	90
Figura 8 -	CLD gerenciamento de <i>Spare Parts</i>	93
Figura 9 -	SD sistema de produção elo 2.....	100
Figura 10-	SD sistema de produção elo 1.....	100
Figura 11 -	Disponibilidade do sistema Elo 1, Política (R,S).....	103
Figura 12-	Disponibilidade do sistema Elo 2 ($\lambda=0,15$), Política (R, S)....	104
Figura 13 -	Número de pedidos por períodos (R) distintos (R,S), em semanas.....	105
Figura 14-	Nível superior de estoque para cenário (2;0.5;R) no elo 1.....	106
Figura 15 -	Nível de estoque agregado cenário(2;0.5,R) no elo 1.....	106
Figura 16-	Número de <i>Stockout SP</i> cenário (2;0;2;3;0.5;4) elo 2.....	107
Figura 17 -	Disponibilidade do sistema Elo 2 ($\lambda=0,10$), Política (R,S).....	109
Figura 18-	Número de pedidos de <i>SP</i> elo 1 (2;0;Q;4;0.5;Q).....	114
Figura 19 -	Número de pedidos de <i>SP</i> elo 2 (2;0;Q1;4;0.5;Q2).....	115
Figura 20-	Níveis de estoque agregado (s,Q) ($\lambda=0,15$).....	115
Figura 21 -	Quantidade de Pedidos de emergência (s,Q) ($\lambda=0,15$).....	116
Figura 22-	Número de pedidos elo 1 (1;0;Q;1;0;Q) ($\lambda=0,15$).....	120
Figura 23 -	Número de pedidos elo 1 (1;0.5; Q;1;0.5; Q) ($\lambda=0,15$).....	120
Figura 24 -	Nível superior de estoque elo 1 (1;0; Q;1;0;Q) ($\lambda=0,15$).....	121
Figura 25 -	Nível superior de estoque elo 1 (1;0.5; Q;1;0.5;Q) ($\lambda=0,15$)...	121
Figura 26 -	Nível de estoque agregado elo 1 ($\lambda=0,15$).....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Notação para os modelos da cadeia de suprimentos.....	84
Tabela 2 -	Inputs para aplicação numérica do modelo proposto.....	102
Tabela 3 -	<i>Stockout</i> de produção elo 2 ($\lambda=0,15$).....	108
Tabela 4 -	<i>Stockout</i> de produção elo 1 ($\lambda=0,15$).....	109
Tabela 5 -	<i>Stockout</i> de produção elo 2 ($\lambda=0,10$).....	110
Tabela 6 -	<i>Stockout</i> de produção elo 1 ($\lambda=0,10$).....	110
Tabela 7 -	Melhores cenários para política (R,s) mín. custo - $\lambda=0,15$	111
Tabela 8 -	Melhores cenários para política (R,s) máx atendimento - $\lambda=0,15$	111
Tabela 9 -	Melhores cenários para política (R,s) mín custo - $\lambda=0,10$	113
Tabela 10 -	Melhores cenários para política (R,s) máx atendimento - $\lambda=0,10$	113
Tabela 11 -	Melhores cenários para política (s,Q) - $\lambda=0,15$	118
Tabela 12 -	Melhores cenários para política (s,Q) - $\lambda=0,10$	119
Tabela 13 -	Número de <i>Stockout</i> de produção (s,S) ($\lambda=0,15$).....	123
Tabela 14 -	Cenários potenciais para política (s,S) ($\lambda=0,15$).....	124
Tabela 15 -	Cenários potenciais para política (s,S) ($\lambda=0,10$).....	124
Tabela 16 -	Melhores resultados para as três políticas de reposição de estoque avaliadas.....	125

LISTA DE SIGLAS

A	<i>Availability</i>
CD	Centro de Distribuição
CLD	<i>Causal loop diagram</i>
MP	Manutenção Preventiva
MC	Manutenção Corretiva
SP	<i>Spare Parts</i>
SD	Sistema dinâmico
SFD	<i>Stock-flow diagram</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	<i>Objetivos.....</i>	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	<i>Justificativa.....</i>	15
1.3	<i>Metodologia de pesquisa.....</i>	15
1.4	<i>Estrutura da dissertação.....</i>	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	<i>Cadeia de suprimentos e decisões de manutenção.....</i>	18
2.2	<i>Gestão da manutenção.....</i>	29
2.2.1	Estratégias da manutenção.....	20
2.3	<i>Gestão de estoques.....</i>	21
2.3.1	Demanda independente e Demanda dependente.....	22
2.3.2	Custos associados ao Estoque.....	22
2.4	<i>Gestão de estoque de Spare Parts.....</i>	23
2.5	<i>Sistema dinâmico.....</i>	26
2.6	<i>Causal loop diagram (CLD).....</i>	28
2.7	<i>Stock-flow diagram (SFD).....</i>	29
2.8	<i>Coordenação conjunta.....</i>	30
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	32
3.1	<i>Sistema dinâmico aplicado à cadeia de suprimentos.....</i>	32
3.2	<i>Técnicas de simulação aplicadas à manutenção.....</i>	36
3.2.1	Visão geral dos artigos relacionados a técnicas de simulação aplicados à manutenção.....	48
3.3	<i>Spare Parts (SP).....</i>	52
3.3.1	Visão geral dos artigos relacionados à <i>Spare Parts</i>	63
3.4	<i>Otimização conjunta entre Manutenção e Spare Parts.....</i>	67
3.4.1	Visão geral dos artigos relacionados à otimização conjunta entre manutenção e <i>Spare Parts</i>	78
3.5	<i>Discussão da literatura.....</i>	81
4	DESCRIÇÃO DO MODELO.....	83
4.1	<i>Suposições chaves.....</i>	86

4.2	<i>Modelo de simulação de sistema dinâmico</i>	87
4.2.1	<i>Causal loop diagram (CLD)</i>	87
4.2.1.1	<i>Gestão da manutenção – Módulo 1</i>	90
4.2.1.2	<i>Gerenciamento de Spare Parts – Módulo 2</i>	93
4.2.1.3	<i>Sistema de Produção – Módulo 3</i>	99
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	102
5.1	<i>Review Period, Order Up to Level (R,S)</i>	103
5.1.1	Impacto do gerenciamento da manutenção.....	103
5.1.2	Impacto do gerenciamento de estoque de <i>Spare Parts</i>	105
5.1.3	Gestão da manutenção x Sistema de produção.....	108
5.2	<i>Order Point, Order Quantity (s,Q)</i>	114
5.3	<i>Order Point, Order Up to Level (s,S)</i>	120
5.4	<i>Implicações gerenciais do modelo</i>	125
6	CONCLUSÕES	129
	REFERÊNCIAS	130

1 INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos equipamentos e da competitividade do mercado, destacam o papel fundamental do acesso à manutenção profissional, pois, o gerenciamento da manutenção apoia as empresas a manterem alta produtividade de seus ativos (MEHMETI; MEHMETI e SEJDIU, 2018), enfatizando que, a visão estratégica da manutenção torna-se necessária para se destacar no mercado e aumentar a produtividade.

A eficiência do sistema de produção reduz-se ao longo do tempo devido ao desgaste dos equipamentos, resultando em maiores custos para a organização em detrimento da substituição e reparo de peças e despesas devidas atrasos no processo de produção (LINNÉUSSON; AMOS e ASLAM, 2017). Portanto, a seleção adequada das estratégias de manutenção reduz os impactos causados por essa perda de eficiência, por meio da restauração do sistema, mantendo-o sob as condições regulares pré-estabelecidas

O papel estratégico da manutenção está associado à definição da política de manutenção a ser adotada, estabelecendo a forma como as atividades serão desempenhadas, em qual período serão realizadas e como os recursos serão alocados, de modo a apoiar as decisões estratégicas e direcionar o desempenho à um nível aceitável. A disponibilidade do sistema depende do tempo de reparo e do nível de estoque de *Spare Parts (SP)* associado, segundo Bounou; Barkany e Biyaali (2017).

Gu; Zhang e Li (2015) afirmam que altos níveis de estoque de *SP* resultam em altos custos de estocagem e maior risco de custos de obsolescência, enquanto que a escassez leva a baixos níveis de serviço e falta de confiabilidade. A gestão de estoque de *SP* é um grande desafio para as organizações devido suas características singulares impostas pelo comportamento da demanda, que é governada pelas ações de manutenção preventiva ou substituição corretiva (KENNEDY; PATTERSON, W.; FREDENDALL, 2002; PANAGIOTIDOU, 2014; WANG, 2012; ZAHEDI; SCARF; SYNTETOS, 2017). Com o avanço tecnológico e o aumento da complexidade dos equipamentos, diferentes estratégias de manutenção são adotadas, dificultando a identificação de do padrão de consumo de *SP*.

Sterman (2000) enfatiza a necessidade do desenvolvimento de um pensamento sistêmico onde todos os elementos estão interligados, abrangendo diferentes partes interessadas e demonstrando como elas interagem. Baseado na abordagem do pensamento sistêmico, o sistema dinâmico desenvolvido por Forrester (1958) como uma metodologia de modelagem e simulação para a análise e tomada de decisões de longo prazo em problemas de gerenciamento,

permite a análise da relação de causa e efeito entre fatores decisivos em cada estágio do modelo (KEILHACKER; e MINNER, 2017; REBS; BRANDENBURG; SEURING, 2019).

Visto que as decisões de manutenção e *SP* estão interligadas, um modelo de simulação de sistema dinâmico foi desenvolvido para avaliar o desempenho de uma cadeia de suprimentos composta por dois elos, que separadamente possuem seus próprios sistemas de gerenciamentos de manutenção e *SP*, propondo a integração entre os elos e se destacando por ser um modelo inovador, que considera a tomada de decisão conjunta entre manutenção e *SP*, temas que na maioria das vezes são tratados isoladamente na literatura.

Embora haja um grande desafio em se gerir as *SP* o modelo pode auxiliar o gerente a reduzir a complexidade do problema, possibilitando a compreensão e análise das variáveis envolvidas e das possíveis medidas de ações a serem tomadas. Assim, tem-se como contribuição a definição da política de reabastecimento de estoque de *SP* na gestão conjunta com o planejamento das ações de manutenção, avaliando três possíveis políticas de estocagem e fornecendo *insights* sobre as particularidades de cada política e o impacto na cadeia de suprimentos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Tem-se por objetivo geral avaliar o impacto causado pela gestão conjunta das ações estratégicas das atividades de manutenção e das políticas de reabastecimento de *SP* em uma cadeia de suprimentos, propondo uma ferramenta de apoio a decisão, por meio da aplicação de um modelo de simulação de sistema dinâmico.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Construir um modelo que auxilie na tomada decisão, através da coordenação conjunta entre políticas de manutenção e políticas de reabastecimento de estoque de *SP*;
- Validar o modelo proposto através da aplicação numérica e simulação de cenários;
- Comparar três políticas de reabastecimento de *Spare Parts*, $(s, Q); (R, S)$ e (s, S) , em relação as estratégias de manutenção adotadas;
- Analisar todos os cenários obtidos com a simulação, visando maximizar a disponibilidade e minimizar os custos associados.

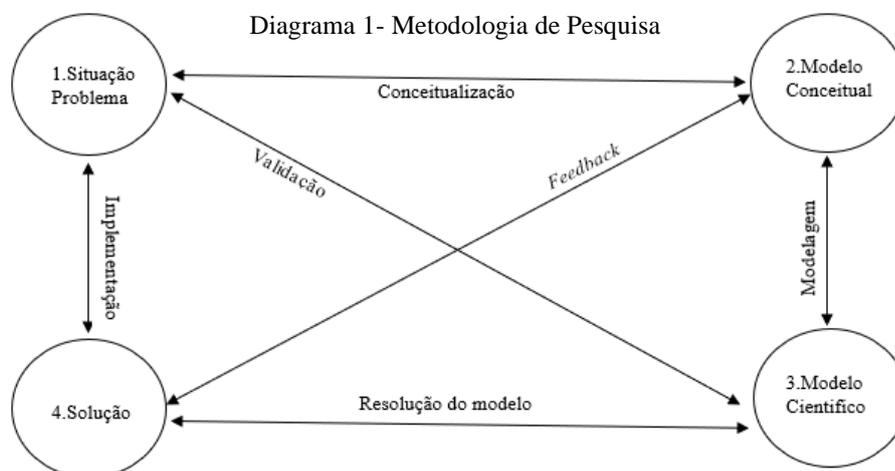
1.2 Justificativa

A maioria dos modelos existentes de gerenciamento de SP tratam a demanda como dada, ignorando, assim, o planejamento de manutenção subjacente, enquanto a maioria das pesquisas sobre manutenção assume um número ilimitado de SP (KEIZER, TEUNTER e VELDMAN, 2017), entretanto a demanda de SP deve ser orientada pelos requisitos operacionais e de manutenção (PANAGIOTIDOU, 2014; WANG, 2012; Zahedi-HOSSEINI et al., 2017) e o planejamento que assume 100% de disponibilidade de SP é ineficiente (ZAHEDI-HOSSEINI et al., 2017).

Para preencher essa lacuna existente na literatura, o presente trabalho propõe avançar os estudos acerca da gestão conjunta entre manutenção e de *Spare Parts*, contribuindo para ciência e para as empresas que lidam com essas decisões em seus planejamentos. A pesquisa apresenta um impacto relevante pois, o modelo proposto considera que as decisões estratégicas em relação aos temas abordados estão interligadas e devem ser consideradas de forma conjunta em uma cadeia de suprimentos, e não tratadas isoladamente, potencializando toda a cadeia e apresentando ganhos em termos de custo e desempenho, diferindo dos demais modelos encontrados na literatura.

1.3 Metodologia de pesquisa

A Metodologia de pesquisa aplicada para estruturação e desenvolvimento deste trabalho, baseou-se na metodologia de resolução de problemas proposto por Mitroff et al. (1974). O modelo proposto indica um meio para estruturação da pesquisa, dividindo-a em quatro etapas interconectadas, descritas como: Situação Problema, Modelo Conceitual, Modelo Científico e Solução, como mostrado no Diagrama 1.



Fonte: Adaptado de Mitroff et al. (1974)

1. Situação Problema

Corresponde a identificação e investigação de uma problemática, dando início a fase de conceitualização do problema, com o objetivo de buscar explicações e conceitos através do apoio científico acerca do problema abordado. Segundo Mitroff (1977), é o "primeiro passo" no processo de solução de problemas, consiste no reconhecimento na sensação de que algo está errado.

Dessa forma, estruturou-se a parte conceitual do problema, onde iniciou-se as pesquisas voltadas ao Gerenciamento de manutenção; Simulação; Sistema dinâmico; Gestão da cadeia de suprimentos e Gestão de *SP*, com o objetivo de encontrar entendimento sobre os conceitos abordados. Uma ampla pesquisa foi realizada e a contextualização da problemática foi elaborada através da revisão da literatura (Capítulo 3) e da fundamentação teórica (Capítulo 2), servindo como base para construção do Modelo Conceitual.

2. Modelo Conceitual

O Modelo Conceitual estabelece a definição fundamental do problema, ele define o problema em termos macro (MITROFF,1977). Esta fase é uma busca por uma analogia apropriada que possa levar a insights sobre toda a gama ou fenômenos correlatos (LEE; 1968).O modelo conceitual é representado através dos diagramas de *loops* causais, ilustrados no Capítulo 5, onde as relações dos elementos que compõe modelo são estabelecidas por meio dos *Links* que explicam as influências causais entre as variáveis.

3. Modelo Científico

Depois que um Modelo Conceitual do problema é formado, um Modelo Científico do problema pode ser construído, através das técnicas usuais de modelagem (MITROFF,1977). O modelo científico traduz o modelo conceitual, por meio de expressões matemáticas, linguagem computacional ou ambos, possibilitando a obtenção de resultados.

O processo de solução de problemas completo só ocorre após a construção e verificação do modelo, para tal, torna-se necessário a mensuração do grau de correspondência entre a realidade e o modelo proposto, para atestar sua veracidade como mencionado por Mitroff (1977). O modelo científico proposto na pesquisa é apresentado no Capítulo 4, a partir de trabalhos realizados na área e validado por meio da simulação, onde, após validação, diversos resultados foram gerados no Capítulo 5.

4. Solução

Para completar o diagrama, o ultimo círculo corresponde a solução obtida através Modelo Científico proposto, com o objetivo de fornecer dados para análises que possam comprovar as

hipóteses realizadas na pesquisa e servir de base para auxílio na tomada de decisão, explanadas nas implicações gerenciais contida no Capítulo 5.

A ligação entre a solução obtida e o Modelo Conceitual, denominada *feedback*, permitem a comparação entre os conceitos e *insights* que norteiam o problema e os resultados obtidos, em busca de conformidade. Já a ligação entre a Solução e a Situação Problema e estabelecida por meio da implementação da solução obtida no problema real, com objetivo de solucionado. Esta fase não foi realizada nesta pesquisa.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em 6 capítulos que estão distribuídos da seguinte forma:

O Capítulo 1 fornece uma breve introdução sobre a proposta do trabalho, descrevendo não só a problemática a ser abordada como também o objetivo geral, os objetivos específicos para alcançar o objetivo geral e a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 encontra-se a fundamentação teórica, composta pelos os conceitos fundamentais para compreensão do presente trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura relacionada ao tema da pesquisa, referente ao sistema dinâmico aplicado à cadeia de suprimentos, técnicas de simulação aplicadas à manutenção, gestão de *SP* e a otimização conjunta entre Gestão da manutenção e Gerenciamento de *SP*.

O Capítulo 4 apresenta os modelos propostos no trabalho.

No Capítulo 5 é desenvolvido a aplicação numérica para cada um dos modelos propostos, com o objetivo de encontrar respostas para os questionamentos e hipóteses que norteiam a pesquisa, além das discussões em tornos dos resultados obtidos são realizadas, para debater sobre as hipóteses e identificar as influencias e efeitos das varáveis abordadas.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, ressaltando as principais contribuições da pesquisa para o meio científico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo discorre sobre os conceitos utilizados no presente trabalho. A fundamentação teórica está subdividida nos temas Gestão da Manutenção, Gestão de *Spare Parts*, Cadeia de Suprimentos, Sistema Dinâmico e Gestão de Estoques.

1.2 Cadeia de suprimentos e decisões de manutenção

As cadeias de suprimentos (CS) são responsáveis por garantir a disponibilidade de produtos e serviços ao consumidor final e, conseqüentemente, o sucesso financeiro de todas as organizações envolvidas (POVOA e PINTO, 2020). Elas são definidas como um sistema complexo composto por várias entidades como fornecedores, fabricantes, armazéns, distribuidores, varejistas e etc., que agregam valor das fontes de recursos originais aos produtos finais, enquanto trocam informações, para que os produtos sejam adquiridos, fabricados e distribuídos nas quantidades, locais e no momento corretos, atendendo os requisitos da demanda à um custo total mínimo do sistema (PÓVOA e PINTO, 2018; ISHII e OHBA, 2018; ISRAEL et al., 2017)

No entanto, os sistemas econômicos globalizados envolvem cadeias de suprimento complexas, devido ao grande fluxo de materiais e informações que circulam na cadeia, bem como os conflitos resultantes das características e objetivos distintos de cada elo (POVOA e PINTO, 2020; REBS, BRANDENBURG e SEURING, 2019).

Devido essa complexidade e as pressões constantes geradas pelos mercados, por soluções inovadoras e reduções de custos, somadas à criação de vantagem competitiva para que as empresas tenham sucesso, o processo de ter uma cadeia de suprimentos integrada torna-se crucial (SOUZA e HADDUD, 2018). A integração dos principais processos de uma cadeia de suprimentos (produção, distribuição, manutenção etc.), por meio de um planejamento otimizado, pode aumentar a confiabilidade e os níveis de qualidade nos fluxos de produtos e informações, bem como melhorar o desempenho global da cadeia (MULA et al., 2010; SOUZA e HADDUD, 2018).

Linnéusson, Amos e Aslam (2018) citam que o impacto de um bom desempenho da manutenção pode se estender além do nível de foco em equipamentos. Com a redução do tempo de inatividade, é possível uma redução potencial nos prazos de entrega e minimização dos estoques locais de produção, obtendo maior nível de serviço, melhor tempo de resposta ao mercado e tornando as cadeias de suprimentos mais enxutas. Além disso, tem-se uma redução

dos custos totais, uma vez que, os custos de manutenção constituem grande parte dos custos de produção.

1.3 Gestão da manutenção

A manutenção é definida pelo *British Standards Institute* como “uma combinação de todas as ações técnicas, administrativas e gerenciais do ciclo de vida de um item destinado a preservá-lo ou restaurá-lo em um estado em que possa cumprir a função requerida” (EN13306, 2010). Esta definição amplia a esfera de manutenção, englobando tarefas além das atividades de Manutenção Corretiva (CM) e Manutenção Preventiva (PM), incorporando ações administrativas e gerenciais, como gestão de mão-de-obra, logística e reabastecimento de *SP* (WAKIRU et al., 2019).

A manutenção efetiva, reconhecida como uma função de impacto significativo, pode desempenhar um papel importante para alcançar a sustentabilidade da organização, ajudando a manter a qualidade do processo, a segurança e apoiando a sustentabilidade da fabricação em uma base tecnológica. As empresas passaram a adotar as melhores práticas de manutenção visando melhorar sua competitividade e obter uma operação sustentável e produtiva dos recursos (MANZINI et al., 2015; YOUNUS, FAHAD e A. KHAN, 2016).

Para Wakiru et al. (2019), as instalações industriais frequentemente sofrem perdas significativas de produção devido a falhas, manutenção sub-ótima, desafios operacionais e de logística de *SP*. Estes, entre outros fatores, afetam diretamente as medidas de desempenho da planta, como: disponibilidade, tempo de reparo e custos.

Já Jasiulewicz-Kaczmarek (2016) afirma que o gerenciamento de manutenção é a direção e organização dos recursos, a fim de controlar a disponibilidade e o desempenho da planta industrial em um determinado nível. Esses recursos normalmente limitam as atividades a serem desenvolvidas para apoiar a produção com a confiabilidade exigida, em decorrência da restrição orçamentária ao departamento, tornando complexa a justificativa e gerenciamento da manutenção, devido ao *tradeoff* entre o custo com as atividades de manutenção na organização e seu efeito na disponibilidade da produção ou no serviço ao clientes, pois, em qualquer mercado competitivo, haverá um limite que os clientes estão dispostos a pagar (LINNÉUSSON et al., 2017).

1.3.1 Estratégias da manutenção

O planejamento da manutenção leva a maximização da eficiência e produtividade, bem como à redução do desperdício no uso de equipamentos e de equipes de manutenção, demonstrando a importância da modelagem da otimização conjunta entre manutenção, estoque e mão de obra (VAN HORENBEEK et al., 2013). Jardine e Tsang (2013) e Wakiru et al. (2019) afirmam que a confiabilidade e produtividade do sistema são influenciadas pelas estratégias de manutenção executadas.

Como visto, a estratégia de manutenção de uma indústria é crucial para a eficácia da fabricação, entretanto, ao contrário de outras funções como manufatura e negócios, a literatura sobre estratégia da manutenção é escassa (JASIULEWICZ-KACZMAREK, 2016). Najim, Ikonen e Daoud (2004) afirmam que uma estratégia de manutenção pode ser definida como uma regra de decisão que estabelece uma sequência de ações a serem realizadas em relação ao estado de operação do sistema considerado. Segundo Linnéusson, Amos e Aslam (2018), o fato da manutenção ter um considerável impacto econômico direto e indireto na organização destaca o seu potencial de melhoria e enfatiza sua importância estratégica, portanto, a manutenção e suas estratégias ocupam um lugar especial em muitas indústrias, principalmente petroquímicas, usinas de energia, petróleo, gás, entre outras (SEITI, HAFEZALKOTOB e FATTAHI, 2018).

Uma estratégia de manutenção bem elaborada constitui a base de um departamento de manutenção, devendo ser tratada como área "chave" ao se formular a estratégia do negócio, para que o departamento possa ser considerado efetivo e contribua como um dos principais impulsionadores operacionais do negócio (DIXON et al., 2016). Os principais desafios enfrentados pelas organizações hoje são escolher as estratégias mais adequadas para melhorar continuamente as capacidades operacionais, reduzir os custos de manutenção e alcançar a competitividade. Portanto, além de formular políticas e estratégias de manutenção para a manutenção de ativos, é importante avaliar sua eficiência e eficácia (KUMAR et al., 2013; SEITI; HAFEZALKOTOB; FATTAHI, 2018).

De acordo com Poppe et al., (2017), a manutenção Corretiva (MC) e a manutenção Preventiva (PM) podem ser descritas como:

- A manutenção corretiva (CM) é considerada a política mais simples, também chamada de manutenção baseada em falha. Onde, a atividade de manutenção é executada após falha de um componente. A principal vantagem dessa política é que toda a vida útil do equipamento é utilizada, reduzindo as ações de manutenção e o uso de *SP*. Em contrapartida, o risco associado à essa política corresponde a possibilidade da ausência de

recursos quando necessário, implicando em medidas de emergência dispendiosas e altos custos de inatividade.

- Na manutenção preventiva (MP), as ações são planejadas com antecedência, o planejamento de recursos é antecipado e, portanto, o custo de intervenção é geralmente menor do que em uma política CM. A principal desvantagem é a não utilização completa do tempo de vida útil, o que significa que um componente é substituído enquanto ainda está funcionando.

A política de manutenção ideal necessita ser escolhida com base na avaliação do risco, consequência da falha e dos custos associados. Requisitando uma revisão total da planta ou dos equipamentos para que todos os modos de falha sejam identificados.

1.4 *Gestão de estoques*

Os estoques são utilizados nas redes de produção e logística com o objetivo de coordenar os ciclos de fornecimento e mitigar os riscos associados à incerteza gerada (GARCIA-HERREROS et al., 2016). O controle de estoques é uma das principais atividades no gerenciamento de plantas industriais, pois gestores e operadores lidam diariamente com estoques de componentes e produtos finais, e um gerenciamento eficaz desses níveis de estoque é um fator-chave em um processo de fabricação eficiente (BALUGANI et al., 2018)

Segundo Singh e Verma (2018), o escopo do gerenciamento de estoques diz respeito às seguintes variáveis: tempo de reabastecimento; custos de estoque; gerenciamento de ativos; previsão de estoque; avaliação de estoques; visibilidade de estoque; previsão de preço de estoque futuro; estoque físico; espaço físico disponível; gerenciamento de qualidade; reabastecimento; logística reversa e previsão de demanda. Equilibrar esses requisitos conflitantes leva ótimos níveis de estoque, sendo este, um processo contínuo à medida que o negócio precisa mudar e reagir ao ambiente mais amplo.

A importância da gestão de estoque em aplicações industriais é resultado do efeito de rupturas nos níveis de satisfação do cliente e do impacto do estoque no equilíbrio econômico das empresas (GARCIA-HERREROS et al., 2016). Estudos recentes consideram que o estoque, assim como a flexibilidade e o excesso de capacidade, são os principais impulsionadores da resiliência na cadeia de suprimentos (ROZHKOVA e IVANOV, 2018), que corresponde à capacidade da empresa em resistir, adaptar-se e recuperar-se de interrupções para atender à demanda do cliente e garantir o desempenho (HOSSEINI, IVANOV e DOLGUI, 2019; PETTIT, 2008). Para Qu, Raff e Schmitt (2018), o controle ótimo do estoque é um dos maiores

desafios enfrentados pelas empresas em uma cadeia, pois o gerenciamento irá impactar nos resultados do desempenho de todos os elos.

1.4.1 Demanda independente e Demanda dependente

Um item pode apresentar dois padrões básicos de consumo ao longo do tempo, chamados de demanda dependente e demanda independente, e a dinâmica desses padrões conduzirão a estratégia de controle de estoque a ser tomada (MOREIRA, 2012).

Moreira (2012) diferencia os padrões da seguinte forma:

- I. Demanda independente: Quando a demanda depende apenas das condições de mercado, fora do controle imediato da empresa, como por exemplo produtos acabados e *SP*. Em termos de comportamento, a demanda é contínua, ainda que sujeita à efeitos de sazonalidades, variações aleatórias e etc.
- II. Demanda dependente: Se o consumo puder ser programado internamente, como itens usados na produção interna de outros itens. No comportamento, a demanda está ligada a produção, a cada lote produzido uma quantidade de itens de demanda dependente é demandada.

1.4.2 Custos associados ao Estoque

A existência de estoques dentro de qualquer organização implicará em custos, Figura 1, que necessitarão ser gerenciados, de modo a obter-se eficiência no desempenho, sendo eles descritos por Moreira (2012) da seguinte forma:

Figura 1- Custos de Estoque



Fonte: O autor (2020)

- a)Custo do item (p): Custo unitário, é o custo de comprar ou produzir internamente uma unidade do item.

- b)Custo do Pedido (C_p): Custo de se encomendar a mercadoria, é a soma de todos os custos (Manutenção da área de compras, Custo de Transporte da mercadoria, custo de inspeção) desde o momento em que o pedido é feito até o momento em que a mercadoria é estocada.
- c)Custo unitário de Manutenção (C_m): Custo de manter uma unidade do item em estoque por um determinado tempo, incluindo o custo do capital (diretamente proporcional ao investimento em estoque) e o custo de armazenagem que corresponde ao custo do espaço ocupado pela mercadoria.
- d)Custo de falta de estoque (C_f): Reflete as consequências econômicas da falta de estoque (vendas perdidas, perda de imagem e futuros negócios devido a indisponibilidade).

2.4 Gestão de estoque de Spare Parts

A EN13306 (2010) define *SP* como um “item destinado a substituir um item similar, a fim de preservar ou restaurar a função original requerida do item”. Driessen et al. (2015) afirmam que as *SP* são responsáveis por manter a operacionalidade do equipamento e podem ser distinguidas em duas classificações: peças reparáveis: aquelas que são reparadas ao invés de supridas, ou seja, peças que são tecnicamente e economicamente reparáveis, e após o reparo, torna-se pronta para uso novamente, e as peças não reparáveis ou consumíveis: que são descartadas após a substituição.

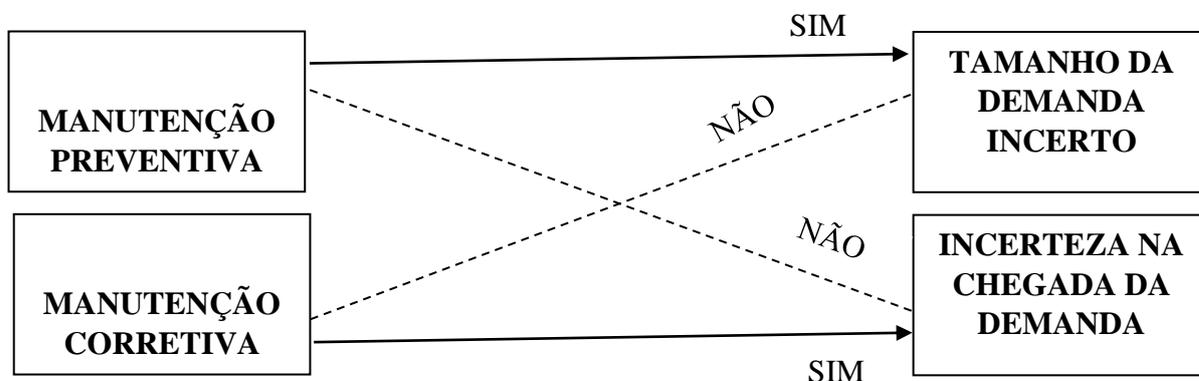
O reabastecimento otimizado de *SP* desempenha um papel fundamental na sustentação de um nível de competitividade operacional, por meio da manutenção eficiente e eficaz de máquinas. Portanto, é necessário encontrar o equilíbrio entre o custo de aquisição, obsolescência e falta de estoque de *SP* (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).

Segundo Van der Auweraer, Boute e Syntetos, (2019) a literatura demonstra que a demanda das *SP* é regida pelas características físicas das peças; a política de manutenção que determina quando uma peça será substituída, como visto no Diagrama 2; e os fatores ambientais que impactam a confiabilidade da peça. Bülbül, Bayindir e Bakal (2019) reforçam que a demanda por *SP* é desencadeada pela manutenção corretiva e preventiva, e é não-estacionária devido a probabilidades de falha dependentes.

As informações sobre as políticas de manutenção são especialmente importantes quando se está prevendo a demanda de *SP*. No planejamento das atividades de manutenção preventiva, informações antecipadas sobre a demanda de *SP* são conhecidas. Por outro lado, na realização

das atividades de manutenção corretiva a demanda é incerta (DEKKER et al., 2013; POPPE et al., 2017).

Diagrama 2- Manutenção preventiva versus Manutenção corretiva



Fonte: Adaptado de Auweraer, Boute e Syntetos (2019)

A gestão de *SP* deve considerar a criticidade das *SP* dentro dos equipamentos e, subsequentemente, pela criticidade do equipamento em relação a todo o sistema de produção (PANAGIOTIDOU, 2014; WANG, 2012; ZAHEDI-HOSSEINI, SCARF E SYNTETOS, 2017). Entretanto, na prática a demanda de *SP* são tratadas da mesma forma, ou seja, imprevisíveis e não levando em consideração a política de manutenção (DEKKER et al., 2013; POPPE et al., 2017).

A indisponibilidade de *SP* resultará em grandes perdas financeiras, especialmente para aquelas indústrias com tecnologias sofisticadas, visando a produção em massa e contínua. Dessa forma, o gerenciamento de *SP* desempenha um papel importante na obtenção da disponibilidade desejada dos equipamentos a um custo mínimo (HU et al., 2018). Pois, quantidades elevadas de estoque de *SP* consiste em quantidades consideráveis de capital atrelado, no entanto, uma quantidade de estoque menor do que o suficiente ocasionará interrupções e maior tempo de inatividade no sistema, não fornecendo um bom nível de serviço (VAN DER AUWERAER, BOUTE e SYNTETOS, 2019).

O mix de *SP* apresenta níveis elevados, é comum observar empresas de tamanho médio que transportam milhares de itens diferentes no estoque. Dificultando a identificação de uma estratégia de controle de estoque apropriada para cada peça de reposição, o que representa um desafio significativo para o gerenciamento de estoques das mesmas. (GUVENIR e EREL, 1998). Hu et al. (2018) e Kennedy, Wayne Patterson e Fredendall, (2002) afirmam que o gerenciamento de *SP* é um caso especial de gerenciamento de estoque com algumas características peculiares, tornando-o diferente do estoque tradicional, pois a demanda de *SP* é

muito difícil de prever, uma vez que padrões intermitentes são comuns entre as *SP* (BOYLAN e SYNTETOS, 2010)

As atividades de manutenção geram a demanda por *SP* e, por sua vez, o nível de estoque de *SP* determina o tempo de espera de manutenção. A disponibilidade é influenciada pelo tempo de reparo que depende do tempo necessário para obtenção de uma *SP*. O gerenciamento de *SP* difere do estoque tradicional, uma vez que a função do estoque tradicional é suavizar as irregularidades da demanda ou do fluxo produtivo, enquanto que a do estoque de *SP* é manter o equipamento em condição operacional (KENNEDY, WAYNE PATTERSON e FREDENDALL, 2002)

O controle de estoque de *SP* tem sido um tema de crescente interesse para pesquisas nos últimos anos (VAN WINGERDEN, TAN e VAN HOUTUM, 2019). Segundo Knofius, Van der Heijden e Zijm (2019) uma primeira contribuição sobre as decisões de estoque de *SP* foi realizada por Sherbrooke (1971) que propôs a categorização usada para organizar a otimização de estoques em diferentes níveis de hierarquia de produtos ou sistemas. Em termos de revisões Kennedy, Wayne Patterson e Fredendall (2002) e Rego e Mesquita (2011) fornecem duas revisões que se concentram em sistemas de estoque de *SP* que servem usuários externos.

Driessen et al. (2015) afirma que em um gerenciamento de estoque, as *SP* são classificadas em:

- I. *Spare Parts* parcialmente críticas: A disponibilidade da peça é necessária para reduzir o tempo de inatividade do sistema. A decisão de estocagem de *SP* parcialmente críticas depende da contribuição de uma peça para o nível geral de serviço de todas as peças parcialmente críticas.
- II. *Spare Parts* não críticas: A disponibilidade da peça é necessária para suportar um fluxo eficiente de manutenção do sistema; a indisponibilidade, no entanto, não causa tempo de inatividade imediato no sistema.

Macchi e Fumagalli (2011) afirmam que a classificação de *SP* permite a identificação das peças mais importantes e muitas vantagens podem ser obtidas como consequência de uma classificação adequada. Através da classificação, os gerentes podem usar diferentes estratégias de estoque para diferentes classes de *SP* e priorizar os itens mais importantes no gerenciamento das mesmas (HU et al., 2018).

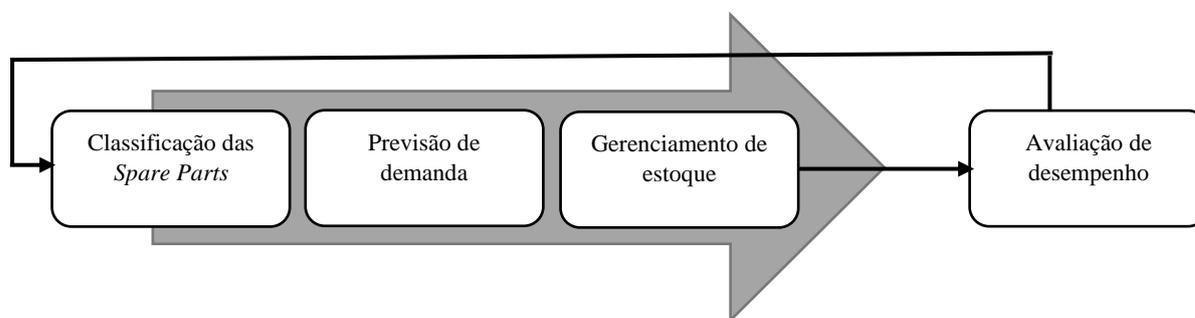
A classificação ABC, que classifica as *SP* de acordo com o custo e *Multiple criteria ABC classification* que possibilita a classificação com base em diversos critérios, capturando as múltiplas dimensões do gerenciamento de *SP*, estão sendo cada vez mais exploradas em trabalhos (GUVENIR e EREL, 1998; CAKIR e CANBOLAT, 2008; HU ET AL., 2017;

MEHDIZADEH, 2019; PARK, BAE, e BAE, 2014; REZAEI e DOWLATSHAHI, 2010; TEIXEIRA ET AL., 2017).

Para determinar os níveis de estoque para *SP*, uma empresa precisa selecionar a política de estocagem e de classificação adequada (MACCHI e FUMAGALLI, 2011; MIRANDA et al., 2014). Hu et al. (2018) afirma que a seleção de estratégias de classificação deve estar interligada com a política de estocagem para fornecer uma política de controle de estoque eficaz.

A Figura 2 adaptada de Bacchetti e Saccani (2012) sugere uma perspectiva integrada entre as etapas da classificação de *SP*, previsão de demanda e gerenciamento de estoques, e a subsequente medição de desempenho.

Figura 2 - Gerenciamento integrado de *Spare Parts*



Fonte: Adaptado de Bacchetti e Sacanni (2012).

Em sua revisão, Hu et al. (2018) descrevem que existem quatro políticas de estoque padrão mais comumente utilizadas no gerenciamento de *SP*, sendo elas:

- i) Revisão contínua, com ponto de pedido fixo (s) e quantidade de ordem fixa (Q), conhecida como política (s, Q);
- ii) Revisão contínua, com ponto de reabastecimento fixo (s) e nível de ordem (S), conhecido como política como (s, S);
- iii) Revisão periódica, com intervalo de compra fixo (R) e nível de ordem (S), conhecido como política como (R, S); e
- iv) Revisão contínua e nível de ordem (S) em um modo de reabastecimento um-para-um, conhecido política como ($S - 1, S$).

2.5 Sistema dinâmico

O sistema dinâmico (*SD*), inicialmente chamado de *Industrial Dynamics*, teve suas origens na engenharia e gerenciamento de controle, desenvolvido por Jay W. Forrester do instituto de tecnologia de Massachusetts no início dos anos 60 (ANGERHOFER e ANGELIDES, 2000). Sendo ele descrito por Forrester (1961) como "... estudo das informações

de feedback das características da atividade industrial, para mostrar como a estrutura organizacional, amplificação (em políticas), e atrasos de tempo (em decisão e ações) interagem, avaliando as interações entre os fluxos de informação, dinheiro, pedidos, materiais, mão de obra e equipamentos de capital em uma empresa, uma indústria ou uma economia nacional”.

O sistema dinâmico (*SD*) é uma abordagem assistida por computador, gráfica e analítica que representa o comportamento do sistema ao longo do tempo, voltada para analisar e resolver problemas complexos que pode ser estendido para qualquer sistema social, gerencial, econômico, industrial ou natural (BARLAS; ÖZEVIN, 2004; DELGADO-MACIEL et al., 2018; STERMAN, 2000; SURYANI; CHOU; CHEN, 2010). O *SD* se concentra em entender como os processos físicos, os fluxos de informação e as políticas gerenciais interagem de modo a estudar a dinâmica das variáveis de interesse. As relações entre as variáveis definem a estrutura do sistema, que ao longo do tempo gera padrões de comportamento dinâmico (VLACHOS; GEORGIADIS; IAKOVOU, 2007).

Vlachos; Georgiadis e Iakovou (2007) afirmam que a estrutura do modelo do *SD* deve fornecer uma descrição válida dos processos reais e que o objetivo típico desse estudo é entender como e porque as dinâmicas de interesse são geradas e, posteriormente, encontrar políticas que melhorem o desempenho do sistema. Sendo essas políticas, as regras de decisão de longo prazo em nível macro usadas pela alta administração.

O *SD* tem sido aplicado em vários contextos estratégicos e operacionais de negócios e gestão (MINGERS e WHITE, 2010; TAKO e ROBINSON, 2012), na indústria automotiva (WALTHER et al. 2007); mercados energético e ambiental (MATTHEW, GEORGE et al., 2016; MORECROFT e VAN DER HEIJDEN, 1992), Gerenciamento da cadeia de suprimentos (CAMPUZANO; MULA; PEIDRO, 2010; GONUL KOCHAN et al., 2018; JANAMANCHI; BURNS, 2008; KEILHACKER; MINNER, 2017; PENG; PENG; CHEN, 2014; REBS; BRANDENBURG; SEURING, 2019b), análise de riscos industriais (BOULOIZ et al., 2013; OEHMEN et al., 2010). Portanto, o *SD* pode apresentar informações úteis quando se tem vários conflitos em um sistema (DELGADO-MACIEL et al., 2018).

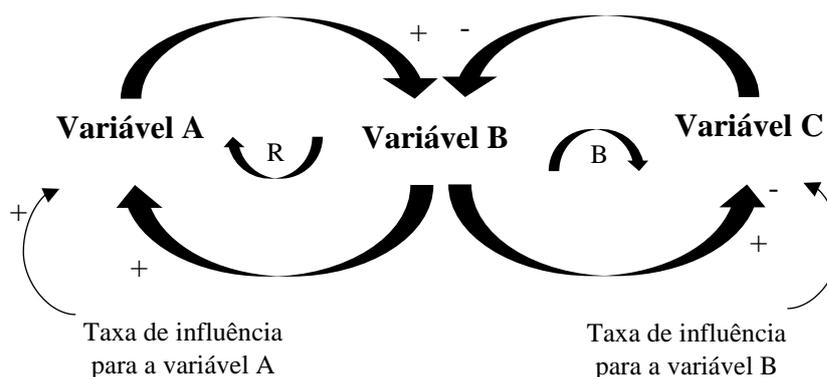
O *SD* é fundamentado na teoria da dinâmica não-linear e no controle de feedback desenvolvido em matemática, física e engenharia (STERMAN, 2000). A estrutura do *SD* é representado pelo *Causal Loop Diagram (CLD)* e *Stock-flow diagram (SFD)* (KUMAR; KUMAR, 2014).

2.6 Causal loop diagram (CLD)

Sterman (2000) afirma que os diagramas de *loop* causais (CLD) são ferramentas importantes para representar a estrutura de *feedback*, constituídos por quatro elementos básicos: as variáveis, os *links*, os sinais nos links (que mostram como as variáveis estão interconectadas) e o sinal do *loop* (que mostra que tipo de comportamento o sistema produzirá) (STERMAN, 2000).

Em um CLD, como descrito no Diagrama 3, as variáveis se conectam através de setas que indicam as influências causais entre a variável dependente (ponta da seta) e a variável independente (cauda da seta) (STERMAN, 2000). No CLD, as interações assumidas entre as variáveis são formalizadas para demonstrar a interdependência dentro dos limites do sistema (LI; REN e WANG, 2016).

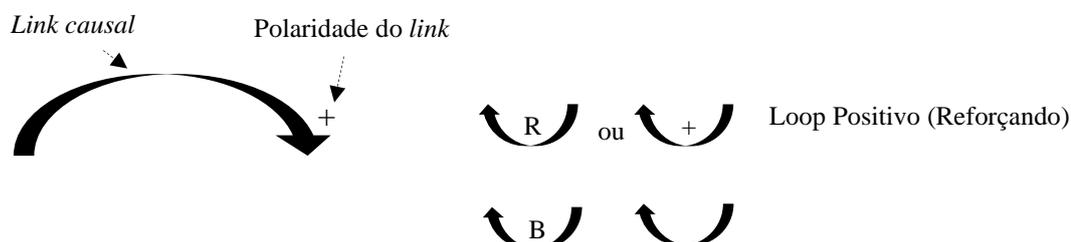
Diagrama 3 - Exemplo Diagrama de Loop Causal



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Os ciclos de *feedback* também são identificados no diagrama e a cada *link* causal será atribuído uma polaridade, como descrito na Figura 3, podendo ser positiva (+) ou negativa (-) indicando a relação de dependência entre as variáveis (DELGADO-MACIEL et al., 2018). Os *loops* também são destacados e identificados por um identificador de *loop* que mostra se o *loop* é um *feedback* positivo (reforço) ou negativo (balanceamento) (KOCHAN et al.,2018; STERMAN, 2000).

Figura 3 – Elementos chaves para notação de CLDs





Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

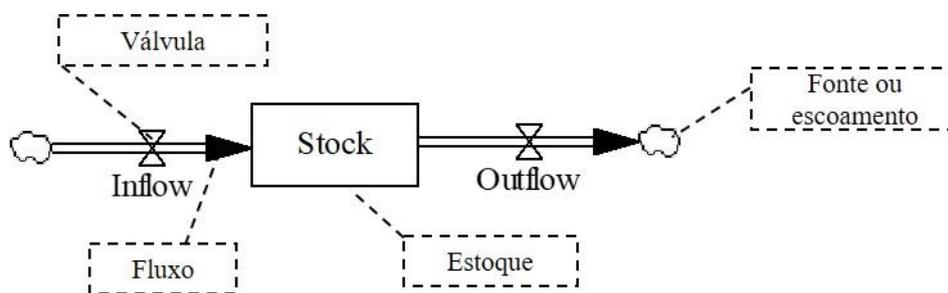
Um *link* positivo (+) entre as variáveis denota que o efeito muda para a mesma direção que a causa (feedback de reforço), ou seja, as variáveis possuem uma relação causal positiva, onde, se a variável A aumenta, a variável B também aumentará e se a causa (variável A) diminui, o efeito (Variável B) diminui. Enquanto que um *link* negativo (-) indica que o efeito muda para a direção oposta da causa (feedback de Balanceamento), ou seja, a variável B diminui a medida que a Variável A aumenta (STERMAN, 2000; TSOLAKIS e SRAI, 2018).

2.7 Stock-flow diagram (SFD).

As convenções dos *SFD* foram baseados em uma metáfora hidráulica, em relação aos fluxos de água entrando e saindo dos reservatórios (FORRESTER, 1961). Sterman (2000) afirma que o *SD* usa uma notação de diagramação específica (Diagrama 4) para estoques e fluxos e qualquer uma estrutura é composta por esses elementos a seguir:

- Estoques: representados por retângulos (sugerindo um contêiner contendo o conteúdo do estoque). São acumulativos, caracterizam o estado do sistema e geram as informações sobre as quais as decisões e ações são baseadas.
- Fluxos de entrada: representados por um tubo (seta) apontando para (adicionando ao) o estoque;
- Fluxos de saída: representados por tubos apontando para fora (subtraindo) do estoque;
- Válvulas controladoras de fluxos;
- Fontes e Locais de escoamento dos fluxos: Representados por nuvens. Uma fonte representa o estoque do qual um fluxo originado fora do limite do modelo surge; locais de escoamento dos fluxos representam os estoques para os quais os fluxos saem do limite do modelo. Presume-se que fontes e locais de escoamento dos fluxos tenham capacidade infinita e nunca podem restringir os fluxos que suportam.

Diagrama 4- Notação do Stock-Flow diagram



Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

Da mesma forma, Sterman (2000) descreve que a quantidade de material em qualquer estoque é o acúmulo dos fluxos de *inputs*, menos os *outputs*. O diagrama de estoque e fluxo tem um significado matemático preciso, eles acumulam ou integram seus fluxos e o fluxo líquido para o estoque é a taxa de variação do estoque, sendo representada como a seguinte equação integral, descrita por Sterman (2000) :

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflow}(s) - \text{Outflow}(s)] ds + \text{Stock}(t_0) \quad (1)$$

Onde, $\text{Inflow}(s)$ representa o valor da entrada a qualquer momento s entre a hora inicial e a hora atual t . Equivalentemente, a taxa líquida de variação de qualquer ação, sua derivada, é a entrada menos a saída, definindo a equação diferencial (2). Em geral, os fluxos serão funções do estoque e outras variáveis e parâmetros de estado (STERMAN, 2000):

$$\frac{d(\text{Stock})}{dt} = \text{Inflow}(t) - \text{Outflow}(t) \quad (2)$$

2.8 Coordenação conjunta

A maioria dos modelos que definem ações de manutenção assumem 100% de disponibilidade de *SP* (PANAGIOTIDOU, 2014; VAN HORENBEEK et al., 2013; WANG, 2012; ZAHEDI-HOSSEINI et al., 2017). No entanto, a influência de uma política de *SP* nas ações de manutenção não podem ser ignoradas, uma vez que as *SP* são encomendadas e transportadas em quantidade limitada e o prazo de entrega da aquisição não pode ser negligenciado (KABIR e AL-OLAYAN, 1996).

Para obtenção de bons resultados na realização das atividades de manutenção é necessário um estoque de *SP* com alto grau de disponibilidade, tendo em vista a redução do tempo de inatividade do equipamento e permitir que o sistema execute suas funções previstas. No entanto, ao tomar decisões de manutenção durante a operação, os gerentes precisam enfrentar os seguintes questionamentos: As *SP* estão em boas condições? Qual a quantidade de *SP* que se

deve ter em estoque? Qual é a relação entre manutenção e estoque de *SP*? (JIANG, CHEN e ZHOU, 2015).

Zahedi-Hosseini et al., (2017) afirmam que o planejamento de reposição do estoque de *SP* deve ser orientado por requisitos operacionais e de manutenção, pois a demanda de *SP* é geralmente guiada pela necessidade de manutenção preventiva ou ocorrência de falhas (WANG, 2012). Dessa forma, Jiang, Chen e Zhou (2015) descrevem que a Manutenção e o estoque de *SP* se influenciam mutuamente. A manutenção é a principal fonte de consumo de *SP* e as *SP* são a pré-condição para a manutenção, pois atividades de manutenção muito frequente elevam o consumo de *SP*, e a falta dessas peças adia os procedimentos de manutenção e pode aumentar o tempo de inatividade do equipamento.

Esta forte inter-relação entre as decisões de gerenciamento de *SP* e gestão da manutenção devem ser vistos como partes interconectadas para otimizar as operações da empresa, necessitando do desenvolvimento de modelos de otimização conjunta, que requerem formulações matemáticas complexas, sendo as técnicas de simulação as mais comumente utilizadas (PANAGIOTIDOU, 2014; SAMAL; PRATIHAR, 2015; VAN HORENBEEK et al., 2013; ZAHEDI-HOSSEINI; SCARF; SYNTETOS, 2017).

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi desenvolvida com base em artigos relacionados aos conceitos envolvidos no tema de pesquisa, buscando demonstrar diferentes contribuições científicas. Os levantamentos dos artigos foram realizados nas bases *Web of Science* e *Elsevier* por meio dos termos “*Maintenance*”, “*Spare Parts*”, “*System Dynamics*”, “*Supply Chain*”, “*Simulation*”, “*Maintenance and Simulation*” e “*Maintenance and Spare Parts*”. Ao total 137 artigos foram revisados entre 2009 e 2019, dos quais 11 estão associados ao sistema dinâmico aplicado à cadeia de suprimentos, 45 relacionados à Manutenção e Técnicas de Simulação, 47 à *Spare Parts* e 34 à Otimização conjunta entre Manutenção e *Spare Parts*.

3.1 Sistema dinâmico aplicado à cadeia de suprimentos

Kumar e Nigmatullin (2011) aplicaram a modelagem de sistema dinâmico para analisar o desempenho da cadeia de suprimentos de produtos alimentícios de produtos não perecíveis, com o objetivo de determinar o impacto que a variabilidade da demanda e o lead time possui sob o desempenho da cadeia. O modelo proposto possibilita a simulação de diversos cenários buscando determinar o *lead time* ideal para reduzir os níveis de estoque, auxiliando no planejamento estratégico e na tomada de decisões.

Feng (2012) por meio da simulação dinâmica comparou o gerenciamento da cadeia de suprimentos antes e depois do compartilhamento de informações sob a demanda do mercado, entre os elos da cadeia. O estudo mostra que o compartilhamento de informações tem um papel importante na coordenação da cadeia, visto que, para a aplicação numérica realizada, a oscilação da demanda de pedidos de cada membro é reduzida.

Tako e Robinson (2012) revisaram a literatura para analisar a aplicação das abordagens de simulação *DES* e *SD* como ferramentas de apoio a decisão na gestão da cadeia de suprimentos, identificando a frequência de utilização das mesmas e sugerindo que a simulação de eventos discretos tem sido empregada com mais frequência, independente de nível de decisão.

Kumar e Kumar (2014) aplicaram a modelagem de sistema dinâmico em uma cadeia de suprimentos de saúde rural, focando no fornecimento de pílulas de ácido fólico, sob responsabilidade do governo. Observou-se que a distribuição mal gerenciada causa enorme escassez dos medicamentos nos centros, servindo a pesquisa como uma ferramenta de apoio à decisão e planejamento de modo a melhorar a sustentabilidade da cadeia.

Langroodi e Amiri (2016) estruturaram sistematicamente uma cadeia de suprimentos cadeia de suprimentos multinível, multiproduto e multirregião, composta por quatro áreas e cinco níveis, através da modelagem de sistema dinâmico para determinar como cada nível de direcionar seus pedidos para o próximo nível e em casos de múltiplos níveis, qual nível deve ser selecionado. O impacto do interrompimento de um nível sobre os demais também é abordado como mudanças nos custos, oscilação demanda

Li; Ren; Wang (2016) sugeriram a modelagem e simulação para abordar e mitigar os efeitos dos riscos no sistema de transporte de cadeia de suprimentos de produtos químicos, por meio do sistema dinâmico. O modelo proposto integra os efeitos das medidas de mitigação do risco ao desempenho do sistema (Nível de estoque e Taxa de atendimento do pedido), fornecendo uma ferramenta de apoio a decisão com o objetivo de melhorar o fluxo das operações da cadeia.

Keilhacker e Minner (2017) Utilizaram a modelagem de sistema dinâmico para avaliar estratégias de mitigação de risco em cadeia de suprimentos de elementos de terras raras (REEs), o estudo avaliou a reação de um componente da cadeia quando imposta a restrições de exportação e o modo como as variáveis dinâmicas como nível de preços, oferta e demanda em cada estágios são afetadas, sendo o objetivo do trabalho a redução da indisponibilidade do fornecimento.

Tsolakis e Srai (2017) abordaram as decisões de gerenciamento de estoque em cadeias de suprimentos de farmácias verdes, sendo essas compostas por matérias-primas renováveis. A modelagem de sistema dinâmico foi empregada para capturar a consciência ecológica dos pacientes e estudar o comportamento complexo das redes de reabastecimento, fornecendo uma ferramenta de apoio de decisão gerencial e de gestão.

Botha; Grobler e Yadavalli (2017) desenvolveram um modelo de simulação de sistema dinâmico para analisar o gerenciamento de estoque nas cadeias de suprimentos de peças automotivas, simulando e confirmando os parâmetros para os métodos de gerenciamento de estoque em um ambiente teórico e dados reais.

Kochan et al. (2018) revisaram modelos de sistema dinâmicos aplicados ao gerenciamento sustentável de cadeia de suprimentos com o objetivo de avaliar os modelos abordados, sua complexidade e validação e identificar os pontos fortes e limitações das abordagens. Ou autores também propuseram um *framework* para auxiliar na estruturação sistemática do problema e na construção dos diagramas de loop causais.

Rebs; Brandenburg e Seuring (2019) avaliaram o compartilhamento de informações em uma cadeia de suprimentos hospitalar, através da análise de dois métodos de compartilhamento

(Tradicional e outro baseado em nuvem) por meio de *CLDs*. Os autores utilizaram o sistema dinâmico para avaliar o desempenho de cada método, e como resultado, a pesquisa aponta que o compartilhamento de informações baseados em nuvem fornece melhor visibilidade e a capacidade de resposta da cadeia, e como consequência os custos de estoque, custo de fornecimento e escassez são reduzidos.

Um resumo sobre os artigos revisados neste tópico encontra-se na Quadro 1.

Quadro 1- Artigos revisados (Sistema dinâmico)

Publicação	Ano	Caso real S/N	Área de aplicação	Software	Variáveis de decisão	Objetivo de estudo	Contribuição
Kumar e Nigmatullin	2011	S	Cadeia de suprimentos alimentícia	Powersim	Lead Time	Melhorar o desempenho da cadeia (Melhorar a previsão e reduzir o estoque)	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico
Yang Feng	2012	N	Cadeia de suprimentos	Vensim	Escolha do compartilhamento de informações da demanda	Reduzir a oscilação da demanda por pedido e do estoque de cada membro da cadeia	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico
Tako e Robinson	2012	-	Cadeia de suprimentos	-	-	Avaliar a aplicação de modelos de eventos discretos e modelagens de sistema dinâmicos como ferramenta de apoio no gerenciamento de cadeia de suprimentos	Identificação da frequência de utilização das abordagens de simulação na literatura e sugerindo que o DES tem sido usado com mais frequência
Kumar e Kumar	2014	S	Cadeia de suprimentos de saúde rural	Stella®	Quantidade de medicamento a ser fornecido	Melhorar a sustentabilidade da cadeia Menor <i>Stockout</i>	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico
Langroodi e Amiri	2016	N	Cadeia de suprimentos de demanda incerta	Vensim	Determinar o envio de pedidos de uma região para outras	Minimizar os custos de colocação de pedidos e envio de produtos.	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico

Li; Ren e Wang	2016	S	Cadeia de suprimentos de produtos químicos	Vensim	Método de mitigação de risco	Melhorar o desempenho da cadeia (Menor risco de transporte e nível de estoque e maior atendimento dos pedidos)	Integração entre a escolha da medida de mitigação e o desempenho do sistema
Keilhacker e Minner	2017	S	Cadeia de suprimento de elementos de terras raras	Não informado	Estratégia de mitigação de risco	Reduzir a indisponibilidade do fornecimento	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico
Tsolakis e Srai	2017	S	Cadeia de suprimentos de farmácias "verdes"	Powersim	Nº de plantas de fabricação	Melhor gestão de estoque e gestão da capacidade de farmácias verdes	Fornecer uma ferramenta quantitativa para capturar a sensibilidade ambiental sobre farmácias "verde".
Botha; Grobler e Yadavalli	2017	S	Cadeia de suprimentos de peças automotivas	iThink®	Fator de amortecimento de estoque	Melhor taxa de preenchimento e disponibilidade de peças	Simulação e comparação de métodos para gerenciamento de estoque, dinamicamente.
Kochan et al.	2018	-	Cadeia de suprimentos	-	-	Determinar qual a complexidade e validação dos modelos aplicados, e as contribuições e restrições dos trabalhos realizados na literatura	Framework conceitual para um pensamento sistêmico e auxílio para desenvolver CLDs
Rebs et al.	2019	N	Cadeia de suprimentos hospitalar	Any-Logic®	métodos de compartilhamentos de informações	Melhor desempenho (níveis médios de estoque, lead time e taxa de preenchimento)	Criação de um modelo para auxílio da tomada de decisão e planejamento estratégico

Fonte: O autor (2020)

A maioria dos trabalhos realizaram aplicações numéricas em casos reais, para validar o modelo proposto, entretanto a disponibilidade de dados nem sempre é possível levando os pesquisadores a utilizar dados de simulação, como por exemplo nos trabalhos de Botha; Grobler e Yadavalli (2017) e Tako e Robinson (2012). Quanto aos objetivos de decisão, observa-se que estão relacionadas aos aspectos logísticos e de gestão de estoque, como por exemplo a obtenção de uma melhor taxa de preenchimento (atendimento de pedido) que está presente em Botha; Grobler e Yadavalli, (2017); Li; Ren e Wang (2016); Rebs; Brandenburg e Seuring (2019).

O desenvolvimento de modelos como esses é de extrema importância para análise e acompanhamento do desempenho do sistema estudado, pois possibilita a simulação ao longo

do tempo e com isso um melhor planejamento das decisões a serem tomadas de modo a obter maior eficiência. Dessa forma, a revisão desses artigos possibilita identificar que a modelagem de sistema dinâmico é uma ferramenta potencial para auxílio de tomadas de decisões estratégicas e de logo prazo em estudos de cadeia de suprimentos, pois são redes complexas e dinâmicas, como visto em 6 dos artigos abordados.

3.2 Técnicas de simulação aplicadas à manutenção

Boschian; Rezg e Chelbi (2009) aplicaram modelos de simulação para comparar duas estratégias para operar um sistema de produção de duas máquinas que sofrem manutenção preventiva e corretiva, com o objetivo de minimizar custo médio total e maximizar a disponibilidade, a análise multicritério foi utilizada para tratar os múltiplos objetivos.

Kaegi; Mock e Kröger (2009) compararam a aplicação das técnicas de simulação (*agent-based modeling* ABM) e a simulação de Monte Carlo para o gerenciamento de diferentes estratégias de manutenção, com o objetivo de maximizar a disponibilidade do sistema, demonstrando resultados de que o ABM possui uma resposta mais assertiva e eficiente.

Wang; Yang e Schonfeld (2009) propuseram o uso de simulação baseada em redes para construção e aplicação de um modelo hidrovário que combina simulação e otimização para alocar fundos e agendar tarefas de manutenção de maneira otimizada, além de minimizar os custos da manutenção, resultando em benefícios líquidos máximos.

Ramírez-hernández et al. (2010) implementaram um software de otimização de manutenção preventiva (PMOST) baseado em algoritmos para o escalonamento ótimo de tarefas de PM na fabricação de semicondutores, com o objetivo de maximizar a disponibilidade e a saída de produção e minimizar as atividades de PM e os custos de estoque, obtendo melhor cronogramas de atividades de manutenção e melhorias significativas no aumento de produtividade.

Conn et al. (2010) descreveram um modelo Semi-Markov Generalizado junto com a simulação de Monte Carlo para avaliar o desempenho do planejamento da manutenção, envolvendo atividades de substituição preventiva e baseadas na condição, visando maximizar a disponibilidade e a produtividade.

Langer et al. (2010) utilizaram um software de simulação para priorização das atividades de manutenção (PM e CM) por meio de política de despacho baseada em prioridade. A máquina gargalo é priorizada sempre que atividades de manutenção são acionadas de modo a obter um melhor *throughput* e três políticas são comparadas; política *First-come-first-served* (FCFS); *Constant bottleneck* e *Dynamic bottleneck* através de extensas simulações numéricas,

mostramos que a política de *Dynamic bottleneck* oferece uma melhoria no rendimento do sistema.

Lei et al. (2010) fizeram uso da *Stochastic Timed.Redes Petri* (STPNs) para analisar e simular linhas de produção e diferentes políticas de manutenção (PM e CM) e estabelecer um cronograma eficiente de manutenção integrado ao desempenho do sistema de produção. Como resultado, os horários ideais de manutenção programada com o menor custo e a otimização do sistema de produção são obtidas usando simulações.

Geng et al. (2011) obtiveram benefícios econômicos e otimizaram o período da CBM por meio da simulação de Monte-Carlo com o objetivo do menor custo de manutenção por unidade.

Qu et al. (2011) estudaram a otimização da instalação dos recursos de manutenção por meio de um modelo de simulação, que permitiu a análise do processo de manutenção de equipamentos de teste de compartilhamento de múltiplas equipes, com o objetivo de maximizar a eficiência do sistema de manutenção.

Garza; Hill e Mattioda (2012) fizeram uso da simulação de eventos discretos (DES) para examinar o impacto potencial das mudanças organizacionais na estrutura de manutenção hierárquica da Força Aérea dos Estados Unidos. Tendo como objetivo a melhoria do WIP e da utilização dos equipamentos de manutenção.

Yue; Wang e Huang (2012) estabeleceram e simularam um modelo de custo de manutenção de equipamentos mecânicos de mineração para melhorar a eficiência da operação do equipamento, reduzir os custos e otimizar o projeto peças de equipamentos.

Zhang; Yang e Wang (2012) analisaram o processo de manutenção de equipamentos blindados, construindo um modelo de simulação de um processo de manutenção militar por meio software de simulação, possibilitando uma ferramenta para mensurar a eficiência do sistema.

Azadeh et al. (2013) propuseram uma nova abordagem para a priorização e planejamento das políticas de manutenção, simulando diversos cenários de combinações entre manutenção periódica outras políticas diferentes, com multiobjetivos. O problema de otimização de planejamento de manutenção e multicritério é tratado por meio do método Taguchi integrado à análise envoltória de dados (DEA).

Datta; Srivastava e Roy (2013) fizeram uso da técnica DES a fim de melhorar a utilização de recursos em contratos que possui a disponibilidade como critério, simulando recursos humanos e processos em uma linha de manutenção de aeronaves.

Kahrobaee e Asgarpour (2013) propuseram uma abordagem híbrida de simulação analítica para resolver um problema de otimização de manutenção em um sistema com

restrições (disponibilidade de recursos, condições meteorológicas e etc), envolvendo processos de decisão semi-Markoviano e simulação de Monte Carlo.

Muchiri et al. (2014) por meio da simulação de eventos discretos e o *ARA model* vincularam a manutenção ao desempenho global dos equipamentos. O modelo incorpora as diferentes práticas de manutenção de modo a apoiar a tomada de decisões sobre o tipo de necessidade de manutenção a ser feita e como deve ser realizada.

Roux et al. (2013) combinaram o uso dos métodos Petri-nets e DES buscando otimizar problemas de manutenção preventiva de múltiplos componentes, o modelo fornece o período que a manutenção preventiva deve ser realizada de modo a minimizar o custo e maximizar a disponibilidade do sistema.

Sheikhalishahi (2013) considera o problema de planejamento de atividades de manutenção por meio da simulação de diferentes cenários que são combinações de atividades de manutenção e número de equipes de manutenção. Como resultados das simulações, a disponibilidade, confiabilidade, eficiência e tamanho da fila são obtidos e tratados como um problema de multicritério por meio do DEA, com o objetivo de encontrar a melhor política.

Van den Bergh et al. (2013) utilizaram a simulação para programar a alocação de técnicos em manutenção de aeronaves com os objetivos de minimizar custo e melhorar a eficiência, utilizando o DEA para tratar os diversos cenários após simulação.

Reményi e Staudacher (2014) fizeram uso das técnicas de simulação para definir a melhoria operação de manutenção de motor de aeronaves, encontrando regras de programação adequadas para a operação de manutenção. Vários cenários de escalonamento de operações foram simulados para avaliar o rendimento, desempenho e o tempo de processamento.

Azadeh et al. (2014) lidaram com o problema de planejamento da atividade de manutenção por meio da técnica *Fuzzy* integrada - análise envoltória de dados difusos (FSFDEA). A simulação de diferentes cenários compostos por combinações de manutenção periódicas é realizada e várias saídas de disponibilidade dos equipamentos e operadores, confiabilidade, eficiência e tamanho da fila são obtidas. Para selecionar a política de melhor eficiência, o método DEA é utilizado.

Mattila e Virtanen (2014) programaram a manutenção de uma frota de aeronaves de combate através da otimização de simulação multiobjetiva (MOSO). Os autores determinaram um cronograma de manutenção ótimo, contendo o tempo de início e atividades de manutenção com o objetivo de minimizar o horário programado e o real de início das atividades e a maximização da disponibilidade média das aeronaves.

Alabdulkarim; Ball e Tiwari (2015) revisaram a literatura para reunir requisitos de modelagem e desenvolveram uma nova abordagem DES para examinar como os sistemas de operação de manutenção se comportam em relação a diferentes níveis de monitoramento de ativos, em uma empresa importadora de alimentos, demonstrando que níveis mais altos de monitoramento de ativos não necessariamente resultam em maior disponibilidade.

Azadeh et al. (2015) propuseram um modelo para avaliar e comprovar a eficácia da política CBM em comparação a política de manutenção corretiva e preventiva através de um modelo de simulação de evento discreto Markoviano, que estimam a confiabilidade e custo do sistema.

Gilabert et al. (2015) utilizaram a simulação de Monte Carlo simularam diferentes estratégias de manutenção preditiva (PdM) em busca de obter a estratégia de manutenção ideal, fornecendo como resultado a estratégia ótima entre as ações propostas.

Pérez; Ntaimo; Ding (2015) derivaram algoritmos para programação de manutenção de parques eólicos, realizando simulações em um parque real e relatando várias medidas de desempenho, fornecendo informações sobre como gerenciar eficientemente os recursos de manutenção limitados.

Terkaj; Tolio e Urgo (2015) propuseram o uso de uma fábrica virtual baseada em ontologias, sincronizada com a planta real, para simular as operações de uma fábrica e avaliar o impacto de decisões de planejamento e produção, por meio da Taxa de saída da produção e Tempo de fluxo.

Angelis; Patelli e Beer (2016) propuseram uma técnica numérica geral que explora uma estratégia de Monte Carlo derivada do conceito de simulação forçada para otimizar problemas de manutenção que envolvem um trade-off entre os custos associados às atividades de inspeção e reparo e os benefícios relacionados à operação sem falhas da infraestrutura, visando minimizar o custo total.

Paknafs e Azadeh (2016) integraram os processos de negócios, manutenção e produção de um sistema de manufatura, incorporando erros, através de um processo de simulação. Várias saídas foram obtidas como: Tempos de entrega, custo total e taxas de produção, para selecionar a melhor opção entre os cenários simulados, a análise envoltória de dados foi utilizada, devido ao recurso multicritério do problema.

Zarrin (2016) Simulou vários cenários de uma organização de manufatura com estratégia de manutenção, com o intuito de avaliar os impactos da engenharia de resiliência em práticas enxutas. O DEA foi utilizado para avaliar os diversos cenários em termos de utilidade e

disponibilidade de máquinas e operadores de manutenção, tempo no sistema, custo total e número de falhas.

Marsaro e Cavalcante (2017) propuseram um modelo de manutenção preventiva para um sistema multicomponente com o objetivo de minimizar os custos esperados da manutenção, por meio da otimização do número e o tempo de intervenções de manutenção. Ao total, quatro cenários diferentes foram simulados e um resultado satisfatório foi obtido.

Alrabghi; Tiwari; Savill (2017) Fizeram uso dos modelos estocásticos DES conectados a um mecanismo de otimização multiobjetivo. para investigar a combinação ideal de estratégias de manutenção para um determinado sistema de manufatura, considerando a dinâmica de produção. Sugerindo que a não combinação eficiente entre a estratégias de manutenção e o sistema de produção leva a soluções abaixo do ideal.

Chen; Bouferguene e Al-hussein (2017) desenvolveram uma estrutura para selecionar a estratégia de manutenção em um sistema de iluminação mais apropriada, integrando o processo de hierarquia analítica (AHP) e métodos de simulação baseados em uma rede cauterizada predefinida.

Choudhari e Gajjar (2017) apresentaram um modelo de simulação para planejamento de mão de obra em instalação de serviços de manutenção elétrica, avaliando diferentes cenários e desenvolvendo uma ferramenta de decisão eficaz para seleção do cenário que proporcione o melhor desempenho e dos recursos do sistema de manutenção.

Rahmati; Ahmadi e Govindan (2017) utilizaram a abordagem de otimização baseada em simulação (SBO) para integrar e avaliar conjuntamente os processos de planejamento e manutenção da produção para melhorar o nível de otimização do sistema. A simulação envolve o agendamento flexível de *job shop* (FJSP) e dois cenários de manutenção em termos de manutenção corretiva (CM) e manutenção preventiva (PM).

Siddiqui et al. (2017) aplicaram as técnicas contínuas de simulação de eventos para determinar quando a manutenção preventiva deve ser realizada, considerando a deterioração do sistema. Tratando um problema multiobjetivo otimizando a rentabilidade e a acessibilidade.

Zamoryonov et al. (2017) descreveram o funcionamento de um sistema de componente único baseado no agendamento de manutenção preventiva por meio de um processo de semi-markov e o método de trajetórias, com objetivo de maximizar a eficiência.

Nzukam et al. (2018) através da simulação de Monte Carlo e o algoritmo de parada ideal Bruss, apresentara uma metodologia para otimização da programação da manutenção oportunista considerando natureza estocástica duração das oportunidades em uma estratégia de manutenção preditiva.

García e García (2018) propuseram o uso do sistema dinâmico (SD) para o gerenciamento conjunto da produção e da manutenção, de modo a fornecer decisões coordenadas corretamente e no momento certo com base nas informações necessárias, assegurando a viabilidade, avaliando os KPIs e com os objetivos de melhorar o desempenho do sistema.

Geng et al. (2018) através da simulação virtual, apresentaram um método de simulação a partir de simulações imersivas e não imersivas, que integram intencionalmente os dados do movimento humano com o objetivo de encontrar as melhores práticas de manutenção.

Rahmati; Ahmadi e Karimi (2017) desenvolveram um novo mecanismo estocástico de manutenção centrada em confiabilidade (RCM) dentro de um problema de otimização conjunta multiobjetivo que monitora e gerencia as funções de manutenção de um problema de planejamento de produção, utilizando quatro algoritmos de otimização baseados em simulação multiobjetivos (SBO).

Saada et al. (2018) propuseram dois métodos de simulação matemática para avaliar os resultados de estratégias de manutenção preventiva condicional baseadas em controles e inspeções com desempenho ótimo, com o objetivo de otimizar a disponibilidade do equipamento e avaliar as estratégias.

Santos; Teixeira e Soares (2018) fizeram uso das técnicas de simulação para simular e otimizar quatro estratégias de manutenção consistindo de manutenção preventiva e corretiva periódica básica, e ambas combinadas com estratégias de manutenção oportunista (MO), de forma a minimizar o custo total da manutenção e maximizar a disponibilidade.

Wakiru et al. (2019) propuseram o uso do DES em subsistemas críticos reparáveis, que sofrem deterioração. De modo a reparar, auxiliar e otimizar a determinação do sistema crítico envolvendo perdas significativas de produção devido a falhas imprevistas, manutenção sub-ótima, logística operacional e o gerenciamento de peças de reposição. Tendo como objetivo maximizar a disponibilidade da planta e minimizar custos.

Um resumo sobre os artigos revisados neste tópico encontra-se na Quadro 2:

Quadro 2 - Artigos revisados (Manutenção e simulação)

Publicação	Ano	Aplicação numérica	Caso real S/N	Técnicas de Simulação	Software de Simulação	Políticas	Variáveis de decisão	Multi-critério S/N	Multi-Objetivo S/N	Objetivo
Boschian; Rezg e Chelbi	2009	Sim	N	DES e o método de otimização proposto por Gharbi and Kenné -2003	Linguagem Java - NEMROD	PM CM	Programação das atividades de manutenção	N	S	Min Custo total médio Max Disponibilidade
Kaegi; Mock e Kroger	2009	Sim	N	Modelagem Agent-based Simulação Monte Carlo	-	PM	Estratégia de manutenção Nº ótimo de atividades	N	N	Max Disponibilidade
Wang; Yang e Schonfeld	2009	Sim	S	Simulation-based GA	Não Informado	PM CM	Agendamento das atividades de manutenção e produção	N	N	Min de custo da Manutenção
Ramírez-Hernandez et al.	2010	Sim	S	Markov Programação Inteira Mista Modelo hierárquico de dois níveis	PMOST	PM	Agendamento de PM	N	S	Max Disponibilidade Max saída de produção Min PM e custos de estoque
Conn, A. et al.	2010	Sim	S	Modelo Semi-Markov Generalizado com simulação de Monte Carlo	Não Informado	PM CM CBM	Programação das atividades de manutenção (número, hora, duração e tempo de reparo)	N	S	Max Disponibilidade Max Produtividade
Langer, R. et al.	2010	Sim	N	Software de Simulação	Simul 8	PM CM	Priorização das atividades de manutenção Capacidade do buffer	N	N	Max Throughput
Lei, Y. et al.	2010	Sim	N	Stochastic Timed Petri-Nets (STPNs) Simulação de Monte Carlo	Não Informado	PM CM	Período PM Tamanho do Buffer Priorização das atividades de manutenção	N	S	Min custo de manutenção Max saída de produção

Geng, D. et al.	2011	Sim	N	Simulação de Monte Carlo SBO	Não Informado		PM CM CBM	Período de Manutenção	N	N	Min Custo
Qu, C. et al.	2011	Sim	N	Petri-net Software de Simulação	ExSpect		PM	Tempo de término da tarefa Tempo médio de espera Taxa de Utilização dos Eqp. Taxa de utilização das equipes de Manutenção.	N	N	Max a utilização dos recursos da manutenção
Garza; Hill e Mattioda	2012	Sim	S	DES	Arena		-	Nº de estações de reparo	N	S	Melhoria geral do WIP Max utilização dos equipamentos de manutenção
Yue; Wang e Huang	2012	Sim	N	DES	Não Informado		PM	Intervalo de manutenção	N	N	Min Custo
Yong; Hongwei e Shengfeng	2012	Sim	N	Software de Simulação	Extend		PM	Programação das atividades de manutenção	N	N	Melhoria na Eficiência do sistema
Azadeh, A. et al.	2013	Sim	N	Taguchi integrado ao DEA	Visual SLAM		PM	Priorização das atividades de manutenção Eficiência (Ranking)	S	N	Max eficiência
Datta; Srivastava e Roy	2013	Sim	S	DES	MS Excel Witness		-	Utilização da Mão de Obra Número de Operadores	N	N	Max Disponibilidade e alocação de recursos
Kahrobaee e Asgarpour	2013	Sim	S	Método Híbrido (Semi-Markov; Simulação Monte Carlo)	Matlab Arena		PM	Nº de técnicos para manutenção Frequência de manutenção Custo da manutenção	N	N	Max Disponibilidade

Muchiri, P. et al.	2013	Sim	N	DES e ARA model	Arena	CM PM CBM TBM	Tempo de deterioração Disponibilidade Intervalo PM Downtime Política de Manutenção	N	N	Melhoria na Eficiência do equipamento (OEE)
Roux, O. et al.	2013	Sim	N	Petri-Nets DES Método Nelder–Mead (Simplex)	VLE	PM	Período de PM	N	N	Max Disponibilidade
Sheikhalishahi, M.	2013	Sim	N	Software de Simulação DEA	Visual SLAM	PM	Nº de equipes de manutenção Intervalo de Manutenção Periódica	S	N	Melhor eficiência
Van den Bergh et al.	2013	Sim	S	DES (MILP-model) DEA	C++ Microsoft Visual Studio	-	Número máximo de operadores de manutenção	S	S	Min atraso médio Máx taxa de sucesso de alocação
Reményi e Staudacher	2014	Sim	S	DES	Plant Simulationslan guage SimTalk	PM	Regras de agendamento da Manutenção	N	N	Melhor relação Custo - eficácia: Estoque (WIP) Percentual de utilização dos recursos de Manutenção Tempo de resposta (tempo de processamento) Quantidades de entrega no prazo
Azadeh, A. et al.	2014	Sim	N	Lógica Fuzzy integrada ao DEA (FSFDEA)	Awesim	PM	Política de PM	S	N	Melhor eficiência

Mattila e Virtanen	2014	Sim	S	DES Simulated annealing algorithm Função valor de múltiplos atributos (MAV) Otimização de simulação multi objetiva (MOSO)		MATLAB Excel spreadsheet	PM	Tempo de total de manutenção Nº total de horas de voo Nº de atividades de manutenção concluídas Percentual de utilização de recursos de manutenção Tamanho da fila.	N	S	Min o desvio médio entre a meta e os tempos reais de início das atividades Max a disponibilidade
Alabdulkarim ; Ball e Tiwari	2015	Sim	S	DES		Excel spreadsheet	PM CM	Tipo de monitoramento de ativos	N	N	Max Disponibilidade
Azadeh, A et al.	2015	Sim	N	DES-Markov		Não Informado	PM CM CBM	Performance das políticas de manutenção	N	S	Max Confiabilidade Min Custo
Gilabert, E. et al.	2015	NÃO	N	Monte Carlo		Não Informado	PdM	Estratégia de manutenção ideal	N	N	Máx eficiência (OEM e KPIs)
Pérez; Ntaimo e Ding	2015	Sim	S	DES		DEVSJAVA	PM CM CBM	Programação das atividades de manutenção Nº de equipes de manutenção	N	S	Max o desempenho (menor número de falhas, maior capacidade de disponibilidade e Geração de energia); Min Custo
Terkaj; Tolio e Urgo	2015	Sim	S	Ontology-based Virtual Factory model junto com DES		DES software packages	opportu nistic mainten ance PM	Política de manutenção; Regras de Priorização de Produção	N	N	Melhor nível de serviço: tempo de fluxo e saída de produção
Angelis; Patelli e Beer	2016	Sim	S	Monte Carlo	GA	OpenCossan	PM	Tempo de inspeção Qualidade da inspeção	N	N	Min custo

Paknafs e Azadeh	2016	Sim	S	Software de Simulação DEA	Visual SLAM	PM	Intervalo PM	S	S	Max produtividade Min Custo Min Lead Time
Zarrin, M.	2016	Sim	S	Simulation-based DEA - PCA	Visual SLAM	PM	Desempenho da estratégia de manutenção Fator de ER que possui o efeito máximo sobre o desempenho do sistema.	S	N	Melhor eficiência
Marsaro e Cavalcante et al.	2017	Sim	S	Não Informado	Não Informado	PM	Nº de inspeção Limiar da idade do sistema	N	N	Min Custo
Alrabghi; Tiwari e Savill	2017	Sim	S	DES MOO - GA	GAnetXL	PM CM CBM	Frequência PM Técnicos de manutenção Frequência de inspeção CBM Limiar de CBM	N	S	Max saída de produção Min Custo
Chen; Bouferguene e Al-Hussein	2017	Sim	S	DES Clustered network e AHP	Simphony.NET	PM	Fator de manutenção	N	S	Min Custo Min custos ambientais
Choudhari e Gajjar	2017	Sim	S	DES	Arena	-	Planejamento dos técnicos de manutenção	N	S	Max o percentual de utilização dos recursos Min tempo médio de espera
Rahmati; Ahmad e Govindan	2017	Sim	N	Simulation-based SBO (HSO) GA	Não Informado	PM CM CBM	Alocação das atividades de manutenção	N	N	Max Makespan
Rahmati; Ahmadi e Karimi	2017	Sim	N	Simulation-based SBO GA BBO	Não Informado	RCM CBM	Alocação das atividades de manutenção	N	N	Max Makespan
Siddiqui, M. et al.	2017	Sim	N	DES Monte Carlo incorporado no GA	Matlab	CBM	Estágio ótimo de deterioração	N	S	Max Rentabilidade Max Acessibilidade

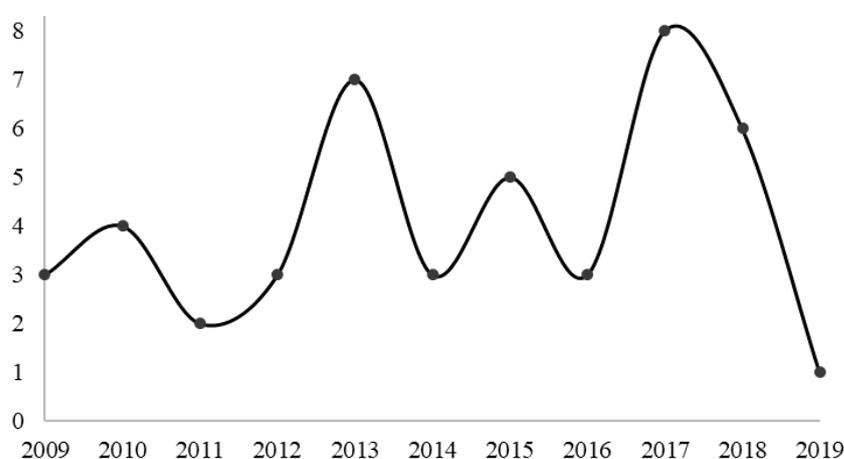
Zamoryonov, M. et al.	2017	Sim	N	Semi-Markov Trajectories Method	Não Informado	PM	Tempo para agendamento da manutenção	N	N	Max eficiência	
Nzukam, C. et al.	2018	Sim	N	Monte Carlo Stopping problem algorithm - Bruss	Não Informado	PdM	Nº ótimo para parada de manutenção	N	N	otimização do agendamento de manutenção oportunista	
García e García	2018	Sim	N	Sistema dinâmico (SD) VSM model	VENSIM	PM	Nº de funcionários Regras de produção Fator de manutenção	N	N	Melhoria no Desempenho (KPIs)	
Geng, J. et al.	2018	Sim	N	Simulação Virtual	Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application (DELMIA)	-	-	N	N	Melhores Práticas de Manutenção	
Rahmati; Ahmadi e Karimi	2018	Sim	N	Simulation-based SBO (MOBBO; PESA;NSGAIII; MOEAD)	Não Informado	RCM	agendamento da manutenção Intervalo de inspeção	N	S	Max Tempo de complementação Min custo Max Confiabilidade	
Y. Saada et al.	2018	Sim	N	Monte Carlo Petri-Nets	Não Informado	RCM	Período ótimo de inspeção	N	N	Max Disponibilidade	
Santos et al.	2018	Sim	N	Petri-net generalizadas com simulação Monte Carlo	GRIF	PM CM	Intervalo para PM Nº de Operadores para CM Nº de Operadores para PM Nº de operadores para Manutenção Oportunista	N	S	Max Disponibilidade Min Custo	
Wakiru et al.	2019	Sim	S	DES	SBO	Não Informado	PM CM	Agendamento das atividades de manutenção e produção	N	S	Max Disponibilidade Min tempo de reparo

Fonte: O autor (2020)

3.2.1 Visão geral dos artigos relacionados a técnicas de simulação aplicados à manutenção.

Em uma análise geral dos 45 artigos selecionados, observa-se, no Gráfico 2, que os números de publicações que abordam o uso da simulação em manutenção se elevaram a partir do ano de 2011, sendo o ano de 2017 o ano que apresenta o maior número de publicações entre os artigos estudados.

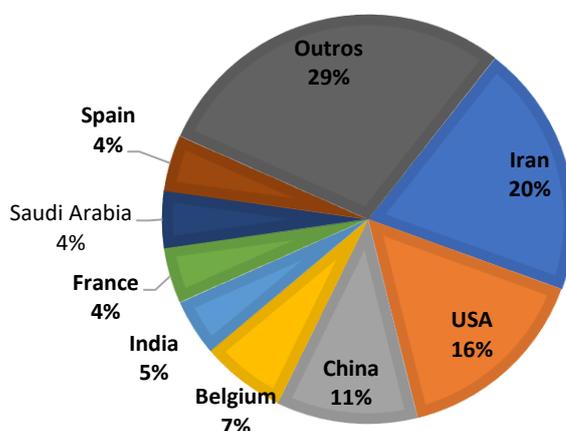
Gráfico 1-Número de publicações anual de Simulação e Manutenção (2009-2019)



Fonte: O autor (2020)

O Gráfico 2 descreve a distribuição dos artigos por país de origem do autor principal, podendo constatar que o Iran é o país com maior percentual de publicações (dentre as estudadas), seguido por Estados Unidos e China.

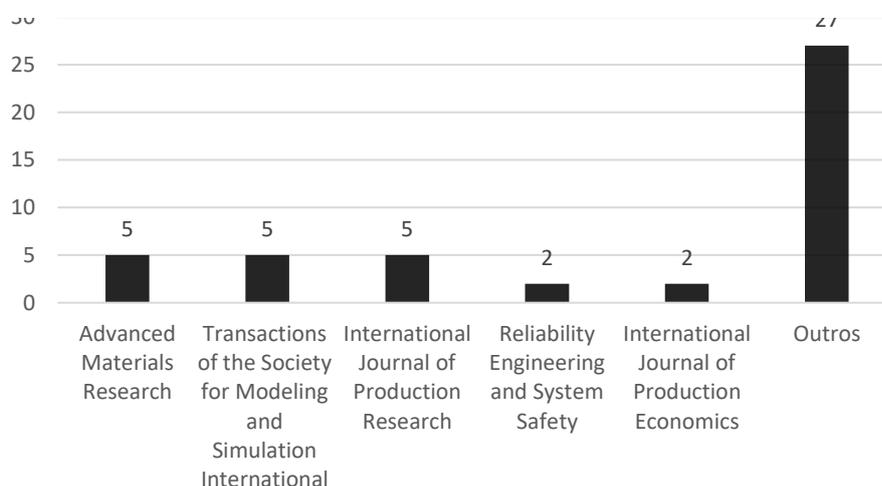
Gráfico 2- Percentual de publicação, por país, de simulação aplicada à manutenção



Fonte: O autor (2020)

As revistas mais frequentes entre os artigos abordados na pesquisa, são apontadas no Gráfico 3.

Gráfico 3- Journals com maior frequência de publicações de simulação aplicada à manutenção



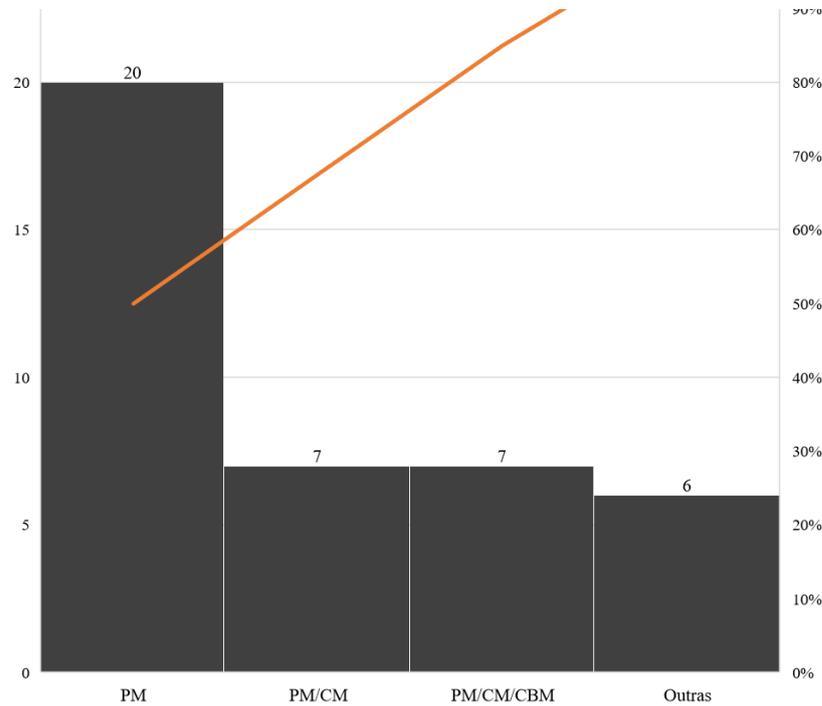
Fonte: O autor (2020)

O Quadro 2 possibilitou a extração de informações como: políticas e estratégias de manutenção mais frequentes; principais técnicas de simulação; principais métodos e objetivos de otimização e as mais frequentes variáveis de decisão, que serão discutidas a seguir.

Grande parte dos artigos estudados abordaram o gerenciamento ou planejamento das estratégias de manutenção, por meio da simulação de cenários onde as diferentes estratégias (manutenção preventiva (PM), manutenção corretiva (CM), manutenção preditiva (PdM), manutenção baseada na condição (CBM) e manutenção centrada na confiabilidade (CBM)) foram implementadas, programadas ou comparadas, como visto nos trabalhos de Alrabghi; Tiwari e Savill (2017); Boschian; Rezg e Chelbi (2009) e Muchiri et al. (2013).

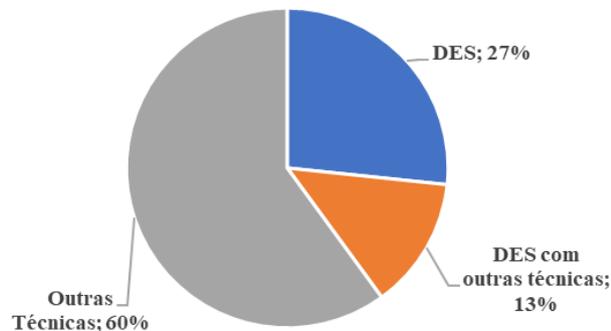
A maioria dos pesquisadores abordaram o uso da manutenção preventiva (PM), como visto no Gráfico 4, estando presente mais de 90 % dos artigos analisados. Em relação as principais técnicas de simulação utilizada, a simulação de eventos discretos (DES) é a mais frequente entre as pesquisas, estando presente em 18 artigos, sozinha ou cominada com outras técnicas (Gráfico 5). A técnica *Petri-Nets* e simulação de Monte Carlo também são encontradas consideravelmente, como por exemplo em Roux et al. (2013); Saada et al. (2018) e Santos; Teixeira e Soares (2018) . Para realização da simulação, softwares como *ARENA*, *VISUAL SLAM*, *EXCELL E MATLAB* são os mais comumente utilizados.

Gráfico 4-Estratégias de manutenção mais abordadas entre os artigos avaliados



Fonte: O autor (2020)

Gráfico 5-Técnicas de simulação mais utilizadas nos artigos avaliados



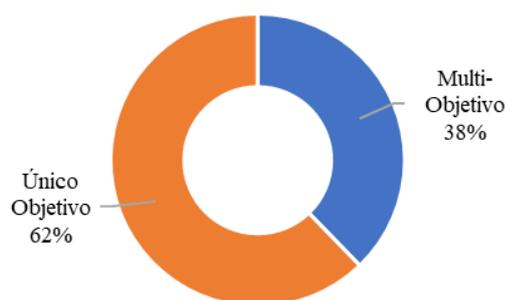
Fonte: O autor (2020)

Os métodos de otimização aplicados, na grande maioria dos artigos avaliados, não são claramente descritos, dificultando a identificação dos mesmos. Entretanto, técnicas sofisticadas e robustas são utilizadas consideravelmente, como *Genetic Algorithm* (GA) presente em Angelis; Patelli e Beer (2016); Rahmati; Ahmadi e karimi (2017); Siddiqui et al. (2017) entre outros e a *Simulation-Based Optimization* (SBO) abordados por exemplo em Rahmati; Ahmadi e Karimi, (2018) e wakiru et al. (2019).

Em problemáticas de múltiplos objetivos, 38% dos artigos (Gráfico 6), metodologias como otimização de simulação multi-objetiva (MOSO) e otimização multi-objetiva (MOO) são

aplicadas. A minimização do custo está presente em maior número nas publicações analisadas (16 artigos), em seguida a disponibilidade do sistema é o segundo objetivo de otimização mais abordado. Sendo esses fatores críticos para eficiência e sustentabilidade do sistema de manutenção em uma empresa, em alguns trabalhos ambos foram abordados simultaneamente como visto nos trabalhos de Boschian; Rezg e Chelbi (2009); Ramírez-hernández e Fernandez (2010) e Santos; Teixeira; Soares (2019).

Gráfico 6- Tipos de problemática de otimização nos artigos avaliados



Fonte: O autor (2020).

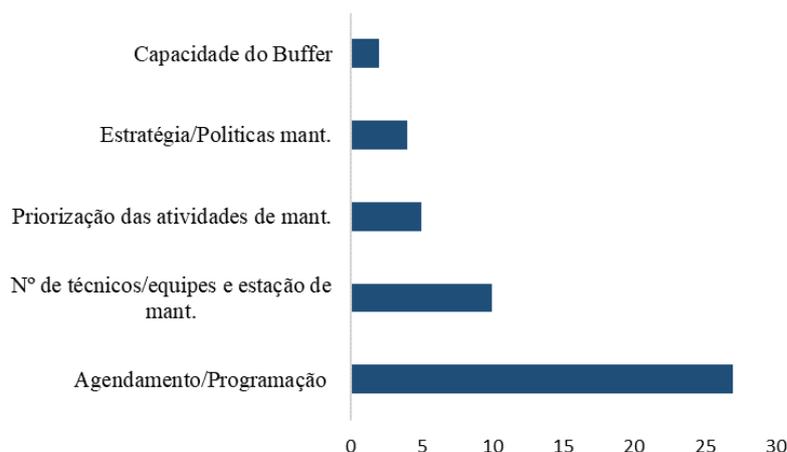
Gráfico 7-Objetivos de decisão mais citados nos artigos avaliados



Fonte: O autor (2020).

A análise envoltória de dados (DEA) é utilizada em seis dos artigos revisados que envolvem problemáticas de multi-critério, com o objetivo de selecionar a alternativa que forneça melhor eficiência. Onde a maioria dos critérios, envolvem custo, disponibilidade, tempo de reparo e percentual de utilização dos recursos. Quanto as variáveis de decisão, ver Gráfico 8, A definição da programação ou agendamento da manutenção é a variável mais presente, envolvendo planejamento, cronogramas e determinação de intervalos de atividades de manutenção. A determinação do número de mão-de-obra ou estação de trabalho também são abordados em um número considerável de artigos.

Gráfico 8- Variáveis de decisão mais reportadas nos artigos avaliados



Fonte: O autor (2020)

Alguns trabalhos buscaram a otimização do planejamento das atividades de manutenção de forma integrada com o sistema de produção, de modo a identificar o impacto da manutenção sobre o desempenho do sistema e desenvolver o planejamento conjunto com o objetivo de maximizar a produtividade e a saída de produção e maximização da disponibilidade. García e García (2018); Langer et al. (2010); Muchiri et al. (2014); Paknafs e Azadeh, (2016); Roux et al. (2013); Terkaj; Tolio e Urgo (2015) e Zarrin (2016) demonstram que as práticas de manutenção impactam na eficiência do sistema de produção e que quando abordadas de forma conjunta, obtém-se resultados eficientes em termos de custos e produtividade.

3.3 Spare Parts (SP)

Jin e Liao (2009) Abordaram o controle de estoque de SP sob uma restrição de nível de serviço, em uma base instalada. Um modelo para a demanda agregada de manutenção gerada por uma base instalada que muda ao longo do tempo. A simulação e a abordagem de multi resoluções foram utilizadas.

Topan; Bayindir e Tan (2010) Consideram um sistema de estoque de multi-itens de dois escalões em um armazém central e propuseram o uso de um procedimento de solução exato, para encontrar os parâmetros necessários para a política de controle de estoque, sujeitos a restrições de tempo médio de resposta agregado de cada instalação.

Chen; Chen e Kuo (2010) propuseram o uso das metodologias *Moving Back-propagation Neural Network* (MBPN) e *Moving Fuzzy Neuron Network* (MFNN) para prever com precisão a quantidade necessária de SP críticas, obtendo melhor controle. Os autores também

compararam os métodos propostos com outras metodologias de previsão, a pesquisa foi aplicada com dados reais de fábricas Tailandesas.

Destombes et al. (2011) apresentaram um modelo para calcular o número do pedido ideal de *SP* em um sistema redundante e sem prática de canibalização, afim de minimizar o custo total do pacote. Os autores estenderam a metodologia METRIC e compararam os resultados do método exato e o método de aproximação.

Wang e Syntetos (2011) buscaram entender o porquê que a demanda de *SP* é intermitente e apresentaram uma nova ideia para previsão da mesma, comparando o modelo de manutenção com o método de séries temporais.

Van Jaarsveld e dekker (2011) propuseram o uso dos dados coletados em estudos de manutenção centrada na confiabilidade (RCM) para determinar os custos de escassez de *SP* em sistemas redundantes, além disso os autores desenvolveram métodos de aproximação para encontrar o ponto de reabastecimento.

Kleber; Zanoni e Zavanella (2011) forneceram um framework baseado em blocos para oferecer oportunidades à recuperação de *SP* para as oficinas da assistência e qual preço a ser cobrado, de modo a reduzir a produção/aquisição de *SP* e conseqüentemente aumentar a lucratividade da cadeia de suprimentos de *SP* estudada.

Jouni; Huiskonen e Pirttilä (2011) Expandiram a classificação de *SP* que abrangem apenas uma parte da cadeia de suprimentos em uma ferramenta de decisão que abrange três elos da cadeia (CD, fornecedores e clientes). Três categorias de classificação foram criadas, tendo o risco de disponibilidade do material como fator de classificação, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema através da melhoria da performance de serviço e minimização do custo de stock-out.

Wu; Hsu e Huang (2011) propuseram e compararam duas abordagens para um sistema logístico de *SP*, envolvendo o design da rede, seleção de fornecedores e modais de transporte, com o objetivo de minimizar o custo total na cadeia de suprimentos.

Park e Lee (2011) abordaram uma rede de manutenção de itens reparáveis onde um conjunto de bases é suportado por um depósito de reparo centralizado e um sistema estoque de peças de reposição consumíveis. A rede foi modelada como uma rede de filas fechadas através do método de aproximação e um estudo de análise de custo eficiência da política de abastecimento de *SP* foi abordado.

Romeijnders; Teunter e Van jaarsveld (2012) Focaram no problema da previsão de demanda de uma empresa que mantém e conserta componentes de aeronaves. Os autores

propuseram o um método de previsão em duas etapas, obtendo o número médio de peças necessárias por reparo e o número de reparos para cada tipo de componente.

Molenaers et al. (2012) propuseram a classificação das *SP* com base na criticidade do item, onde critérios relevantes são convertidos em um único escore apresentando um nível de criticidade. Os autores fizeram uso do método AHP para análise multicritério.

Basten; Van der heijden; Schutten (2012) projetaram um algoritmo que encontra soluções eficientes para a otimização conjunta entre o nível de análise de reparo (LORA) e o problema de estocagem de *SP*, em um sistema com dois canais e restrição de disponibilidade, com o objetivo de minimizar os custos totais.

Tracht et al. (2013) desenvolveram um modelo de previsão aprimorado, para prever a demanda de *SP*. A abordagem envolve a mineração de dados por meio do SCADA-data, que fornece informações da degradação dos componentes, modelos de riscos proporcionais (PHM) e uma distribuição binomial, levando a uma maior precisão da previsão.

Costantino; Gravio e Tronci (2013) apresentaram um modelo de alocação de *SP* em uma força área Italiana, considerando diferentes habilidades de centros de manutenção em uma estrutura multi-escalão, multi-item e de múltiplas empresas, tendo como objetivo minimizar o Backorder, determinando o nível de estoque para cada tipo de *SP* em cada armazém e no depósito e garantir uma disponibilidade de 99%.

Sun (2013) utilizou a simulação por meio do Software Flexsim e a classificação ABC para otimizar o sistema de gerenciamento de estoque de *SP* e consequentemente melhorar sua eficiência.

Barabadi; Barabady e Markeset (2014) demonstraram por meio da aplicação de modelos de confiabilidade com covariáveis o impacto do ambiente operacional, política de manutenção e habilidade do operador na estimação efetiva da previsão das *SP*.

Basten e Houtum (2014) revisaram modelos para controle de estoque de *SP* sob restrições de serviços orientados à sistemas, nos últimos 50 anos, demonstrando os modelos mais aplicados e o impacto de cada um.

Leng; Syntetos e Babai (2014) conduziram uma investigação empírica sobre a adequação de várias distribuições de demanda e desenvolveram um esquema de classificação de demanda baseado na distribuição avaliada também em termos empíricos, com o objetivo de facilitar a reposição de estoque de *SP*.

Rego e Mesquita (2015) simularam grande escala de combinações de controle de estoque e técnicas de previsão de demanda de *SP*. As políticas de previsão de demanda são aplicadas sob o controle de estoque contínuo com ponto de ressuprimento fixo, que é simulado. Os autores

indicaram as políticas recomendadas para cada categoria, com o objetivo de selecionar as melhores políticas de acordo com o custo e a taxa de preenchimento.

Ronzoni; Ferrara e Grassi (2015) buscaram otimizar a gestão de peças de reposição utilizando a programação dinâmica probabilística. O modelo desenvolvido captura dados a partir de uma plataforma criada, onde diversos distribuidores podem participar e compartilhar o gerenciamento, encontrando a distribuição ideal de produtos entre os distribuidores, garantindo um equilíbrio nos custos e fornecendo uma política de reabastecimento ótima.

Sleptchenko e Heijden (2016) Calcularam a disponibilidade do sistema “*k-out-of-N*” por meio de uma análise aproximada e exata e otimizaram simultaneamente, utilizando uma heurística de otimização, o nível de redundância dos componentes com o estoque de SP, melhorando a relação entre disponibilidade e custo e reduzindo o nível de redundância

Yongquan et al. (2016) propuseram um método que auxilia na tomada de decisão para determinação do período e quantidade de compra de SP, quando uma nova frota de aeronaves é estabelecida.

Baykaso.Llu; Subulan e Karaslan (2016) Trataram o problema de classificação de estoque de SP através da tomada de decisão em grupo com múltiplos atributos, propondo um novo método de atribuição linear *Fuzzy*. Além disso, os autores compararam o método proposto com alguns dos métodos de tomada de decisão *Fuzzy* multi-atributo mais comumente usados na literatura.

Durán; Macchi e Roda (2016) utilizaram técnicas de simulação com o objetivo de caracterizar a relação entre políticas de estoque de SP com o custo total das plantas industriais e o impacto da a longo prazo na rentabilidade dos ativos.

Pascual et al. (2016) apresentaram um modelo de otimização para maximizar a disponibilidade do equipamento em um mercado de total de descontos por volume de negócios, sujeito a restrição orçamentaria. O trabalho foca em um sistema de escalão único, buscando determinar o número ideal de peças de reposição reparáveis a serem estocadas, através de uma heurística.

Pennings; Dalen e Laan (2016) focaram na previsão de demanda intermitente e apresentaram um método que condiciona o tempo decorrido desde a última ocorrência da demanda, para antecipar a demanda recebida, oferecendo ganhos financeiros. O método incorpora de forma agregada ações de manutenção preventiva e corretiva, explicando uma relação positivas das ações no tamanho da demanda e no tempo de chegada entre as ocorrências da demanda.

Guo et al. (2017) abordaram a previsão de nível duplo para *SP* reparáveis, analisando os fatores que influenciam a demanda e combinando cinco modelos de previsão direta para estabelecer uma combinação de nível duplo, com o objetivo de aumentar a precisão da previsão.

Topan; Bayindir e Tan (2017) propuseram o uso de heurística para tratar o problema de gerenciamento de estoque de *SP* em um sistema multi-item de dois escalões, com o objetivo de encontrar os parâmetros da política de estoque que forneçam o menor estoque esperado, sujeito a restrição de tempo de resposta individual e agregada.

Hu et al. (2017) implementaram uma classificação ABC de *SP* com múltiplos critérios, através de uma estrutura composta por três fases, que envolvem a abordagem multicritério de conjunto aproximado baseado em dominância (DRSA) para resumir as preferências do decisor, validação cruzada para validar as regras de decisões geradas e a exploração das validações para classificar as *SP*.

Bounou; Barkany e Biyaali (2017) Revisaram modelos de gestão de *SP* presentes na literatura, envolvendo a classificação, previsão de demanda e reposição de *SP*, com o objetivo de avaliar o risco de escassez.

Mobarakeh et al. (2017) investigaram métodos de previsão para prever a demanda incerta e imprevisível da cadeia de suprimentos de *SP* de aeronaves. O objetivo do estudo é propor melhores métodos capaz de prever com precisão e com melhor impacto financeiro, menor escassez e menores custos de manutenção de estoque.

Costantino et al. (2018) propuseram uma extensão do método METRIC para abordar de forma sistêmica o problema da demanda irregular de *SP*, buscando definir corretamente a distribuição da demanda de modo a otimizar o gerenciamento.

Rezaei et al. (2018) abordaram o gerenciamento de estoque econômico de *SP*, propondo uma nova metodologia para gerenciar e controlar os níveis de estoque de modo a alcançar o melhor nível de serviço. O uso de heurística foi proposto para o controle efetivo do estoque e a minimização do investimento total.

Hu et al.(2018) Revisaram os estudos relacionados à aplicação da pesquisa operacional do gerenciamento de *SP* e apresentaram um *framework* para aplicação da pesquisa operacional no gerenciamento, com base no ciclo de vida do produto, avaliando a lacuna entre a teoria e a prática.

Hur; Keskin e Schmidt (2018) consideraram um problema de controle de estoque de *SP* durante a fase de fim de vida útil, apresentando um algoritmo que calcula o tamanho ideal dos componentes sob restrição orçamentária, utilizando cadeia de *Markov* de tempo contínuo para

problemas de um ou dois itens e SOB com um método de busca de gradiente para problemas de múltiplos itens.

Ferreira et al. (2018) desenvolveram um *framework* para a classificação de *SP*, agrupando itens com diferentes políticas de estocagens, baseando-se na técnica multicritério AHP utilizando a escala *Fuzzy* triangular.

Francisco j. et al. (2018) propuseram uma estrutura de modelagem de otimização de rede, integrando as decisões de locais de armazenagens e controle de estoque de *SP*, com o objetivo de otimizar os custos da rede da cadeia de suprimentos de *SP*, três métodos de gerenciamento de estoque tradicionais foram aplicados no trabalho, para fins de comparação.

Sellitto; Balugani e Lolli (2018) apresentaram uma técnica de modelagem para políticas de reposição de *SP* de baixa taxa de consumo, por meio do uso de *Chaotic models*.

Antosz e Ratnayake (2019) realizaram a categorização e priorização de *SP*, um modelo empírico e desenvolvido para que a análise de criticidade seja realizada e as *SPs* sejam categorizadas com base nos fatores de manutenção e logística, posteriormente as *SPs* são priorizadas dentro de cada categoria através do método multicritério AHP, com o objetivo de minimizar as avaliações e recomendações ad hoc.

Turrini e Meissner (2019) analisaram quais distribuições melhores se adequam a demanda de *SP* através do teste de adequação de ajuste de *Kolmogorov Smirnov* (K-S) com o objetivo de melhorar o gerenciamento de estoque de *SP*, comparando os dados da pesquisa com os da literatura.

Van der Auweraer; Boute e Syntetos (2019) abordaram o gerenciamento de *SP* críticas utilizadas em serviços de manutenção. Os autores desenvolveram um método de previsão de demanda vinculando a política de manutenção à demanda das *SP* e posteriormente utilizaram os dados da previsão em uma política de estoque base por meio de simulação, realizando o gerenciamento de estoque.

Van wingerden; Tan e Van houtum (2019) apresentaram um modelo de estoque de *SP* para um sistema de dois escalões com um depósito dedicado a remessas de emergências. O sistema foi simulado e os níveis ideais de estoque foram calculados, com o objetivo de minimizar o custo total.

Van Gils et al. (2019) forneceram uma ferramenta de suporte à decisão, por meio de um algoritmo de busca local, para o planejamento de separação de pedidos de *SP*, com o objetivo de aumentar a eficiência na coleta de pedidos e maior nível de serviço ao cliente.

Topan et al. (2019) descreveram uma visão geral da literatura científica do planejamento de *SP* em torres de serviços, buscando identificar os principais problemas, desafios e

necessidades, por meio de uma pesquisa junto às empresas. Os autores forneceram um *framework* para classificar as decisões operacionais, orientado por elementos observados pelas práticas das empresas e modelos existentes na literatura.

Sleptchenko et al. (2019) abordaram um sistema de fornecimento de SP para SP reparáveis onde os servidores de reparo, em paralelo, podem possuir múltiplas habilidades. Os autores modelaram uma abordagem híbrida composta por um algoritmo genético a otimização baseada em simulação para otimizar as políticas de treinamento cruzado e o gerenciamento de estoque de SP, considerando os custos de estoque e os custos de *Backorder*.

Boutselis e Mcnaught (2019) trataram o problema de previsão de demanda não estacionária de SP, na fase final de operações em organizações de apoio logístico. No problema, os sistemas suportados e as organizações de apoio logísticos podem mudar ao longo do tempo, dificultando o a previsão. Os autores simularam diferentes configurações de organizações e várias previsões foram comparadas em diversos métodos, com o objetivo de colocar um único pedido para cobrir a demanda durante o período, sendo a rede *Baysiana* a que apresentou o melhor desempenho.

Um resumo sobre os artigos revisados neste tópico encontra-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

Quadro 3- Artigos revisados (*Spare Parts*)

Publicação	Ano	Caso real S/N	Objetivo de estudo			Simulação S/N	Métodos	Objetivo de decisão	Política de estoque
			Classificação	Estoque	Demanda				
Jin e Liao	2009	N	-	X	-	S	Multi-resolution approach	Min custo	(s,Q)
Topan; Bayndr e Tan	2010	N	-	X	-	N	Exact solution procedure Branch-and-price algorithm	Min custo Min nº de pedidos	(s,Q)
Chen; Chen e Kuo	2010	S	-	-	X	N	Moving back-propagation neural network (MBPN) Moving fuzzy neuron network (MFNN)	Melhor previsão da demanda	-
Destombes et al.	2011	S	-	X	-	N	METRIC Approximation method Exact method	Min custo de pedido de SP	-
Wang e Syntetos	2011	S	-	-	X	S	Delay time (DT)	Melhor previsão da demanda	-
Jaarsveld e Dekker	2011	N	-	X	-	S	Approximate methods	Custo de escassez de SP Ponto de reabastecimento ótimo	-
Kleber; Zanoni e Zavanella	2011	S	-	-	-	N	Multi-stage decision process	Reaproveitamento de SP para maximizar o lucro Max desempenho de serviço	-
Jouni; Huiskonen e Pirttilä	2011	S	X	-	-	N	Kraljic matrix	Min custo de stock-out	-
Wu; Hsu e Huang	2011	N	-	-	-	S	Genetic algorithm Neural network Tabu search	Min Custo	-

Park e Lee	2011	N	X	X	-	N	Approximate methods Markov	Definição dos parâmetros da rede de manutenção Min custo de estoque	(s,Q)
Romeijnders;Teunter e Jaarsveld	2012	S	-	-	X	S	Two-step method	Reduzir erro da previsão	-
Molenaers et al.	2012	S	X	-	-	N	AHP	Maior eficiência do gerenciamento de estoque	-
Basten; van der Heijden e Schutten	2012	N	-	X	-	N	Algoritmo	Min custo	-
Tracht et al.	2013	S	-	-	X	N	Proportional hazards model SCADA data	Melhor precisão da previsão de demanda	-
Constantino; Gravio e Tronci	2013	S	-	X	-	N	Software package R Marginal analysis method	Min <i>backorder</i> Disponibilidade de 99%	-
Sun	2013	S	X	X	-	S	Classificação ABC Flexsim	Melhor eficiência	-
Barabadi; Barabady e Markeset	2014	S	-	-	X	N	Modelo de regressão com covariáveis	Melhor previsão da demanda	-
Basten e Houtum	2014	N	-	X	-	N	Revisão	Revisão da Literatura	-
Leng; Syntetos e Babai	2014	S	X	X	-	N	Teste de aderência Method of moments Method of mean and zero frequency.	Melhor gerenciamento de SP (classificação e previsão)	-
Rego e Mesquita	2015	S	-	X	X	S	Simple Moving Average Syntetos-Boylan Approximation Bootstrapping 6 modelos de distribuição	Min custo Melhor taxa de preenchimento	(S,nQ)
Ronzoni; Ferrara e Grassi	2015	S	-	-	X	N	Probabilistic dynamic programming	Min custo	-
Sleptchenko e Van der Heijde	2016	S	-	X	-	N	Markov Heuristica	Min custo Max disponibilidade	-

Yongquan et al.	2016	S	-	X	-	N	Método Bayesiano	Max utilização do veículo Min custo operacional total.	-
Baykasoglu; Subulan e Karaslan	2016	S	X	X	-	N	Método de atribuição linear Fuzzy multi-attribute Análise ABC multi-atributo	Melhorar a eficiência do gerenciamento de estoque	-
Durán; Macchi e Roda	2016	S	-	X	-	S	Monte-Carlo next-event simulation	Min custo Max disponibilidade	(s,Q) (s,S) (R,S) (S-1,S)
Pascual et al.	2016	S	-	X	-	N	Truncated First-Order (TFO) heuristic	Max disponibilidade Min custo	-
Pennings; Dalen e van der Laan	2016	N	-	-	X	N	Método analítico	Melhorar a performance do estoque e financeira	-
Guo et al.	2017	S	-	-	X	N	Genetic neural network Exponential smoothing Grey model	Maior precisão da previsão de demanda	-
Topan ; Bayındır e Tan	2017	N	-	X	-	N	Lagrangian heuristic.	Min estoque	(s,Q) (S-1, S)
Hu et al.	2017	S	X	-	-	N	Classificação ABC Classificação multi-critério (DRSA)	Melhor gerenciamento de estoque	-
Bounou; Barkany e Biyaali	2017	N	X	X	X	N	Revisão	Revisar métodos de classificação Previsão e gerenciamento de estoque	-
Mobarakeh et al.	2017	S	-	-	X	S	Bootstrap	Melhor precisão da previsão de demanda	-
Costantino et al.	2018	S	-	X	-	S	ZIP-METRIC Heuristic marginal allocation	Otimização do gerenciamento de SP	-
Rezaei et al.	2018	S	-	X	-	N	Heurística	Minimizar o investimento total	(s,Q)
Hu et al.	2018	N	X	X	X	N	Revisão	Revisar os estudos relacionados à aplicação da pesquisa operacional no	-

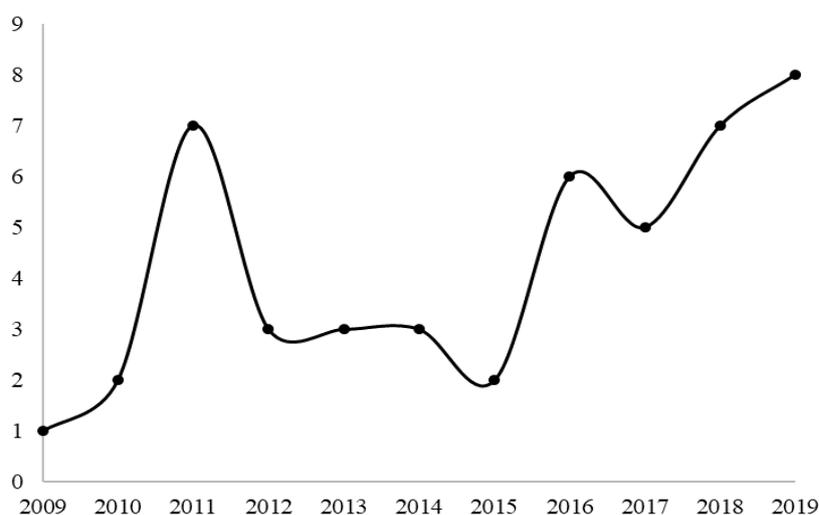
								gerenciamento de SP e construção de um Framework	
Hur; Keskin e Schmidt	2018	N	-	X	-	S	Cadeia de markov Simulation optimization Método de busca de gradiente.	Max disponibilidade	-
Ferreira et al.	2018	S	X	-	-	N	AHP Fuzzy	Framework de classificação multicritério para SP de manutenção	-
Francisco j. et al.	2018	N	-	X	-	N	Generic single commodity model	Min custo	(s,Q) (R,s,S) (S-1,s)
Sellitto; Balugani e Lolli	2018	S	-	X	-	N	Chaotic models	Melhor gerenciamento de estoque para SP de baixo consumo	-
Antosz e Ratnayake	2019	S	X	-	-	N	Modelo empírico; AHP	Minimizar avaliações e recomendações ad hoc	-
Turrini e Meissner	2019	S	-	-	X	N	Teste de adequação de ajuste de Kolmogorov Smirnov (K-S)	Melhorar a performance do gerenciamento de estoque	-
Van der auweraer; Boute e Syntetos	2019	N	-	X	X	S	Modelo analítico	Menor nível de estoque	-
Van wingerden; Tan e Van houtum	2019	N	-	X	-	S	Heurística	Min custo	-
Van Gils et al.	2019	S	-	X	-	N	Metaheuristic -Algoritmo de pesquisa local	Melhor nível de serviço	-
Topan et al.	2019	N	X	X	X	N	Revisão	Desenvolvimento de um framework para classificar as decisões operacionais	-
Sleptchenko et al.	2019	S	-	X	-	S	Método híbrido (Algoritmo Genético combinado com SBO)	Min custo	-
Boutselis e Mcnaught	2019	N	-	-	X	S	Bayesian Networks	Melhor desempenho de previsão	-

Fonte: O autor (2020)

3.3.1 Visão geral dos artigos relacionados à *Spare Parts*

Os 47 artigos revisados demonstram um crescimento do número de publicações voltadas ao gerenciamento de *SP* nos últimos anos, como observado no período de 2016 à 2019 no Gráfico 9. Este fato pode ser explicado pela crescente preocupação das organizações em minimizar os custos de estocagem e obter um melhor desempenho do seu sistema de manutenção, levando os autores a desenvolverem estudos voltado a esta abordagem, buscando otimização e melhorias do sistema.

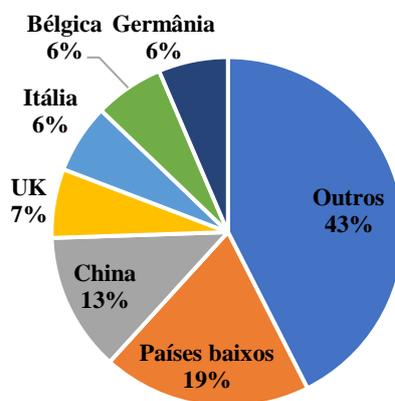
Gráfico 9-Número de publicações por ano (SP) (2009-2019)



Fonte: O autor (2020)

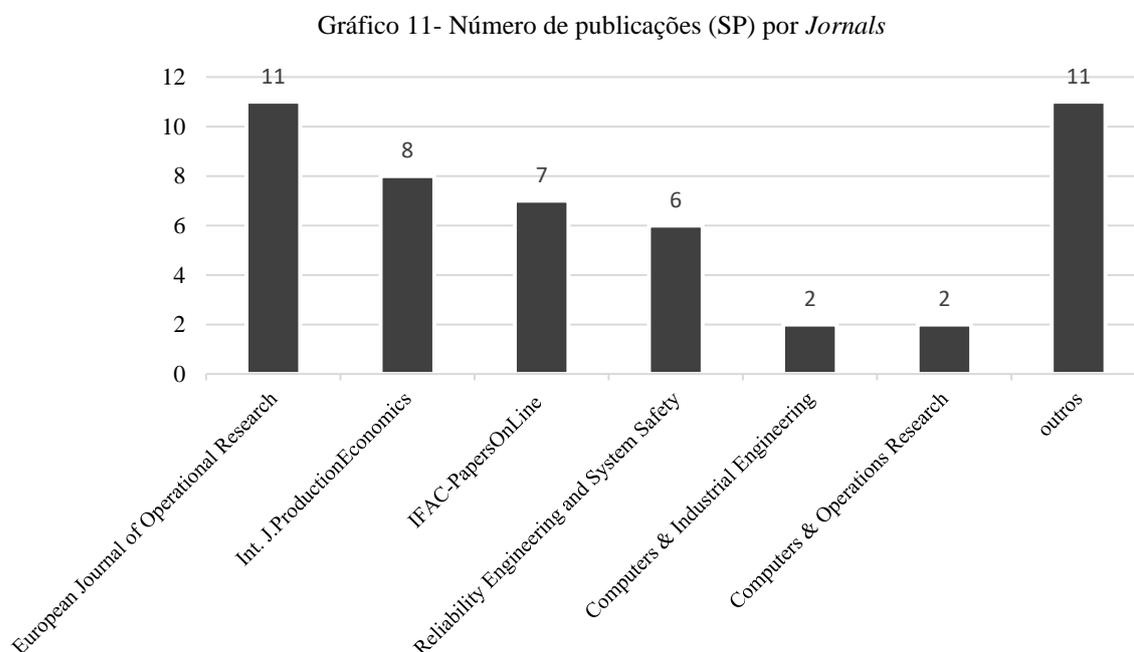
Os países baixos lideram o *ranking* dos países com maior número de publicações entre os artigos revisados, em seguida, a China detém o destaque, como visto no Gráfico 10.

Gráfico 10-Percentual de publicação (SP) por país



Fonte: O autor (2020)

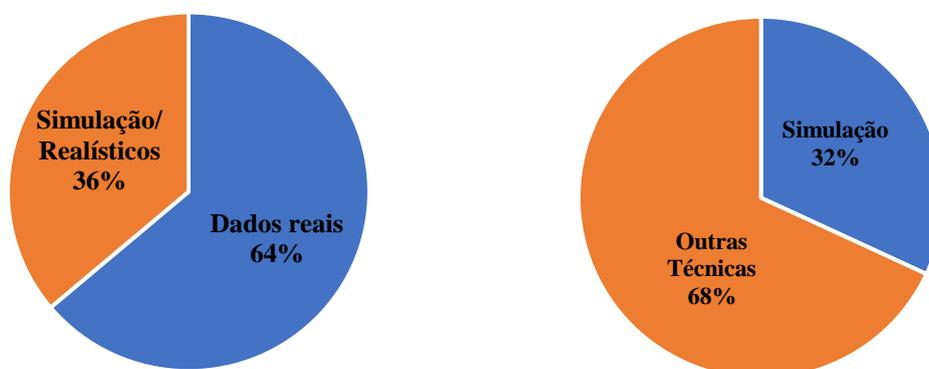
Quanto aos *Journals*, o Gráfico 11 ilustra que o *European Journal of Operational Research* apresenta o maior número de publicações.



Fonte: O autor (2020)

A maioria dos artigos revisados (64%, ver Figura) utilizaram dados reais de empresas, para o desenvolvimento de sua pesquisa e aplicação de métodos, com o objetivo de comprovar nos estudos de caso reais o desempenho e ganhos das abordagens propostas. Os demais artigos utilizaram dados realísticos ou simulação, devido à ausência de dados ou dificuldades de obtenção dos mesmos.

Figura 4- Dados e técnicas dos artigos revisados (SP)

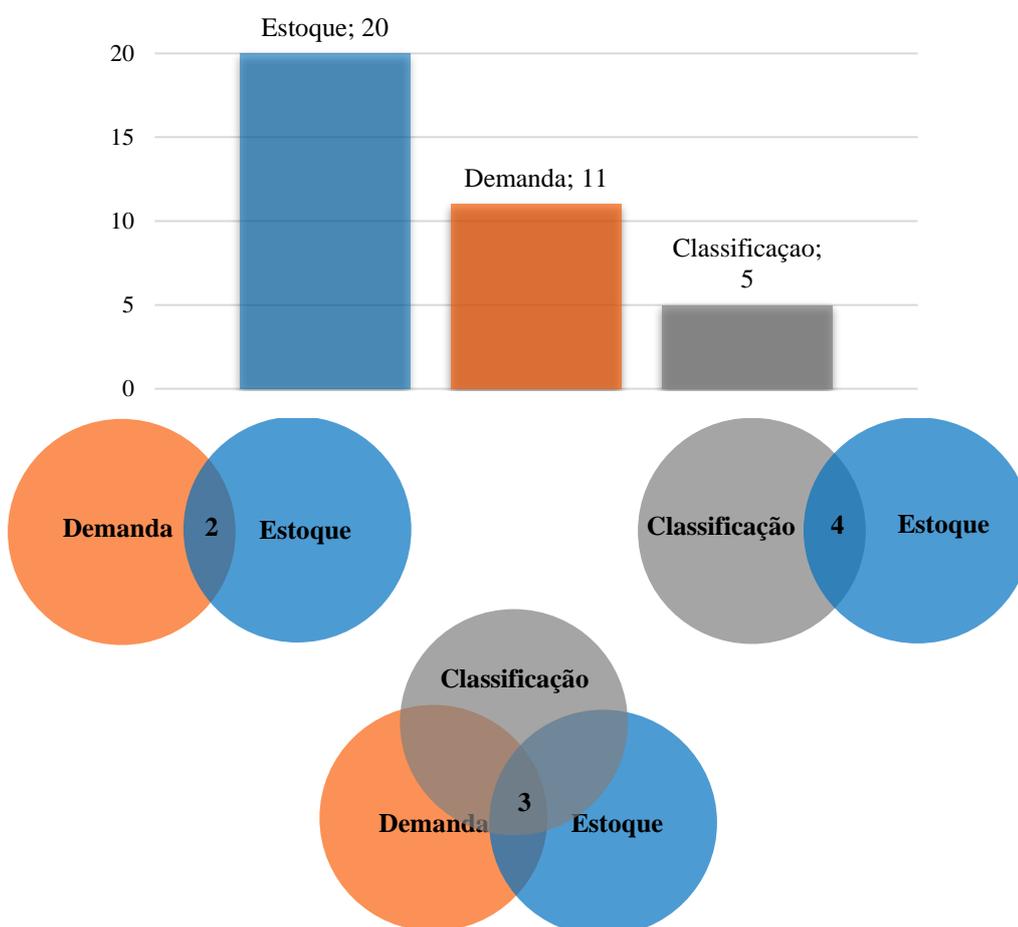


Fonte: O autor (2020)

Devido a maior complexidade de previsão e controle de estoque, causado pela demanda irregular e intermitente das peças, o uso de técnicas de simulação presente em 32% dos artigos avaliados, mostram-se como ferramentas eficazes nas abordagens de gerenciamento de *SP*, seja na obtenção de dados, aplicação do modelo ou até mesmo otimização, como visto nos trabalhos de Durán; Macchi e Roda (2016;); Jin e Liao (2009); Wang e Syntetos (2011); Wu; Hsu e Huang (2011) e etc.).Outras métodos como *METRIC*, *Neural Network*, *Approximate Methods* e *Fuzzy* e outros, também são abordados.

Quanto aos objetivos de estudo dos artigos, ilustrados na Figura , cerca de 42% dos trabalhos analisados estudam o gerenciamento de estoque de *SP* (20 dos 47 artigos revisados), envolvendo a busca por melhores políticas de estocagens com objetivo de minimização de custos e melhor nível de serviço. A política de revisão contínua com ordem de compra fixa (s, Q) é a mais representativa, entre os sistemas de controle de estoque mais utilizados, presente em cinco dos artigos revisados. Outras políticas bases como: (S, nQ) ; (R, S) ; (s, S) ; $(S-l, s)$; (R, s, S) e também são encontradas.

Figura 5 - Objetivos de estudo dos artigos avaliados (*SP*)

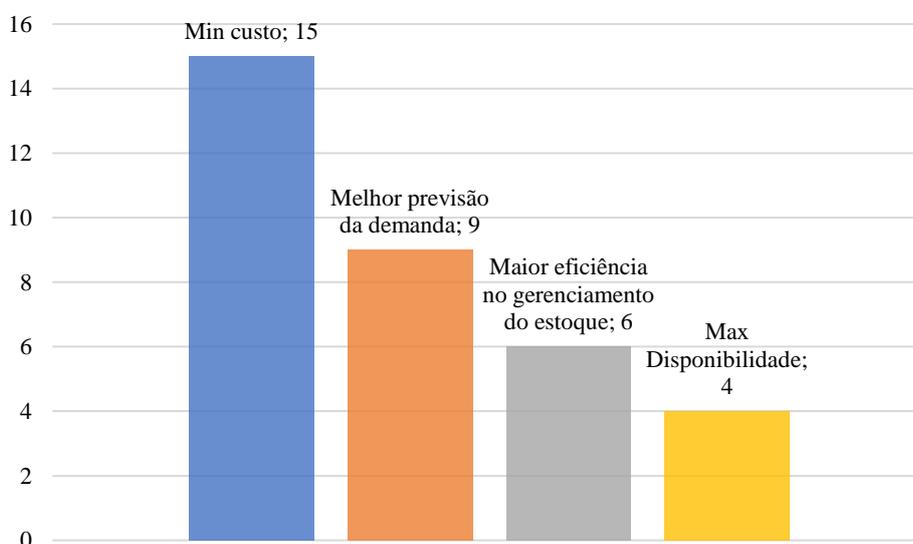


Fonte: O autor (2020)

O gerenciamento da demanda, é o segundo foco de estudo mais abordado, presente em 11 artigos com o intuito de abordar uma melhor previsão da demanda, reduzindo os erros de previsão e aumentando a precisão. Outra abordagem relevante é a classificação de *SPs* em estudos relacionados ao gerenciamento de *SP*. Cinco dos artigos revisados abordam especificamente a classificação com o objetivo de melhorar a eficiência do gerenciamento de estoque, de acordo com a criticidade da peça uma política de estocagem específica é adotada. Técnicas como classificação ABC e a Classificação Multicritério são as mais utilizadas.

Alguns trabalhos abordaram simultaneamente esses focos de pesquisa, como visto na Figura , 4 dos artigos revisados abordaram simultaneamente a classificação e o gerenciamento de estoque de *SP* como visto em Baykaso.Llu; Subulan e karaslan (2016); Leng; Syntetos e Babai (2014); Park e Lee (2011) e Sun (2013). Rego e Mesquita (2015) e Topan et al. (2019) abordaram o gerenciamento da demanda e o gerenciamento de estoque conjuntamente e três revisões da literatura foram realizadas, abordando os três objetivos de estudo de modo a estudar o avanço e contribuição científicas nos últimos anos para essas problemáticas.

Gráfico 12-Objetivos de decisão mais frequentes nos artigos avaliados (SP)



Fonte: O autor (2020)

O Gráfico 12 descreve os objetivos de decisão mais encontrados nos estudos, a minimização de custos é o objetivo mais abordado podendo ser a minimização de custos de estocagem, pedido, operacionais e etc. Em segundo lugar, a busca por uma melhor previsão de demanda está presente em 9 dos artigos, como objetivo de decisão, seguido por uma maior eficiência no gerenciamento de estoque e maximização da disponibilidade de *SP*.

3.4 Otimização conjunta entre Manutenção e Spare Parts

Lanza; Niggeschmidt; Werner (2009) calculou conjuntamente o tempo ideal para manutenção preventiva e o fornecimento de *SP* por meio de um algoritmo de otimização estocástica baseado em uma confiabilidade dependente de carga. Os autores desenvolveram uma estratégia de provisionamento de *SP* que fornece uma alta disponibilidade com o custo total mínimo.

Destombes; Heijden e Harten (2009) otimizaram conjuntamente o estoque de *SP*, a frequência de manutenção e a capacidade de reparo em um sistema “k-out-of-N”, através de heurísticas. O objetivo da pesquisa é fornecer a solução ótima para alcançar uma disponibilidade pretendida ao menor custo. O resultado obtido foi contrastado com o método METRIC que forneceu resultados inferiores.

Cheng e Tsao (2010) Selecionou a estratégia de manutenção adequada, por meio de várias combinações de PM e CM, utilizando a técnica multicritério ANP para avaliação estratégica envolvendo os critérios (Custo, Qualidade, Segurança, confiabilidade e eficiência), posteriormente com a taxa obtida através de ANP definiram a quantidade ótima de *SP*, assim como o Intervalo ótimo de substituição.

Rausch e Liao (2010) abordaram uma estratégia conjunta de controle de estoque de produção e *SP*, combinando uma política de manutenção de limite de degradação com uma política de controle de estoque de *Spare Parts*. Os autores utilizaram a aproximação por mínimos quadrados e a SBO em uma heurística de duas etapas para determinar o número ideal de *SP* juntamente com o limite de manutenção preventiva, minimizando o estoque e o custo operacional total.

Nosoohi e Hejazi (2011) fizeram uso de um modelo multiobjetivo para determinação da substituição preventiva em um horizonte de tempo e do número de *SP* necessário para realização da substituição. Além da minimização do custo, a minimização da correção de falhas, minimização do tempo de vida residual e a minimização do investimento em *SP* também foram abordadas.

Wang (2011) abordou a otimização conjunta entre as práticas de manutenção e o gerenciamento de estoque de *SP*, com o objetivo de minimizar o custo total esperado (manutenção e provisionamento de *SP*). Para a problemática de inspeção baseada em blocos, o autor construiu um modelo utilizando um processo de falha de dois estágios caracterizado pelo conceito de Delay-time para a obtenção da distribuição de falhas e posteriormente um algoritmo

de otimização foi utilizado para obtenção da solução ótima do processo de decisão usando uma combinação de abordagens analíticas e de enumeração.

Wang (2012) apresentou a otimização conjunta do controle de estoque de SP e o intervalo de inspeção de PM, através de um algoritmo de enumeração com programação dinâmica estocástica para encontrar as soluções ótimas ao longo de um horizonte de tempo finito, com o objetivo de minimizar o custo total (custo da substituição preventiva e custo da substituição por falha). O modelo de estoque é gerenciado através da política de revisão periódica e com a demanda gerada pela manutenção.

Liu; Dong e Peng (2012) trataram conjuntamente da otimização da estratégia de manutenção e do gerenciamento de estoque de SP, através de um modelo de programação dinâmica estocástica. O estoque ideal de SP e a melhor estratégia de manutenção são obtidos, com o objetivo de minimizar o custo total e melhorar a utilização do equipamento.

Nguyen; Yeung e Castanier (2013) consideraram simultaneamente as influências da evolução tecnológica e dos níveis estoque de SP na estratégia ótima de manutenção/substituição, sob mudança tecnológica, tratando da obsolescência de SP. Como resultado observou-se que as opções de não fazer nada e reparar possui maior valor significativo.

Horenbeek et al. (2013) utilizaram um modelo de simulação estocástica para avaliar o efeito do tamanho da frota e a qualidade das SP em uma política conjunta entre manutenção e estoque de SP com qualidade variável. Os autores consideraram um sistema com componentes idênticos sujeitos a substituição baseada na idade e uma política de reabastecimento de revisão periódica, minimizando os custos através da otimização conjunta.

Xie; Liao e Jin (2014) abordaram de forma conjunta a alocação da redundância do sistema e o provisionamento de SP, com o objetivo de maximizar a disponibilidade operacional de um sistema “k-out-of-n: G”, sob restrições econômicas e física. Os autores obtiveram a estratégia ótima através de um modelo de programação linear inteira binária.

Godoy; Pascual e Knights (2014) investigaram o impacto do gerenciamento de SP críticas na lucratividade dos contratos de manutenção terceirizada, através da integração entre as estratégias de manutenção contratuais e a armazenagem de SP. Os autores avaliaram se as peças devem ser gerenciadas internamente ou de forma terceirizada com o objetivo de maximizar o retorno da cadeia, utilizando uma estrutura de manutenção imperfeita em um horizonte de tempo finito, fornecendo uma estrutura para auxílio da tomada de decisão ideal para alocar o conjunto de SP críticas em um contrato de terceirização.

Frazzon et al. (2014) integraram o sistema de manutenção inteligente e o planejamento operacional da cadeia de suprimentos de peças de reposição, através da elaboração de um procedimento integrado para a previsão da demanda a partir dos dados do sistema. Através do modelo proposto os custos totais foram minimizados e o nível de serviço real pôde ser determinado, além do aumento da confiabilidade da previsão.

Panagiotidou (2014) abordou a otimização conjunta entre a manutenção preventiva e o gerenciamento de estoque de *SP* para múltiplos itens, por meio do desenvolvimento de um modelo analítico que analisa duas políticas de pedidos (revisão periódica e contínua) e o intervalo de manutenção de modo a fornecer o provisionamento eficiente de *SP*, com o objetivo de minimizar os custos de estoque e a manutenção total esperada. A comparação entre o modelo desenvolvido e a abordagem simultânea entre essas problemáticas também foi realizada, demonstrando que maiores os benefícios são encontrados quando abordados conjuntamente.

Zanjani e Nourelfath (2014) abordaram o planejamento das operações de fornecedores de manutenção terceirizada e a logística de *SP*. Inicialmente a programação matemática foi utilizada para determinar o número ideal de reparos que podem ser concluídos no período e a quantidade de *SP* para minimizar os custos. Posteriormente, um processo estocástico não estacionário de múltiplos estágios foi utilizado para modelar a incerteza da demanda.

Jiang; Chen e Zhou (2015) trataram o problema de otimização conjunta entre manutenção e *SP* em um sistema de várias unidades, utilizando a substituição de blocos e políticas de estoque de revisão periódica. Por meio de modelos analíticos de otimização (DDI e SDI), encontraram o nível ótimo de estoque e o intervalo ótimo de substituição preventiva, minimizando os custos.

Gan et al. (2015) otimizaram conjuntamente a manutenção, o estoque de buffer e o estoque de peças de reposição, com o objetivo de minimização dos custos de longo prazo em um sistema de produção. Os autores propuseram o uso do método GA para otimização do custo e o modelo foi validado através da simulação de cenários, obtendo resultados positivos quanto ao alívio da influência causada pela mudança na velocidade de acumulação do buffer.

Chemweno; Pintelon e Muchiri (2015) abordaram o gerenciamento de *SP* em um sistema de manutenção de itens reparáveis, utilizando a simulação de eventos discretos, considerando a capacidade de reparo, o condicionamento de componentes, a estratégia de provisionamento e a qualidade de *SP*. O objetivo do trabalho é minimizar o custo total do reabastecimento e maximizar a disponibilidade do sistema.

Kader et al. (2015) abordaram simultaneamente a gestão da produção, estratégia de manutenção (preventiva e corretiva) e a gestão de *SP* (usadas e recondicionadas), em um

ambiente sustentável, com o objetivo de reduzir os custos de produção e estoque e a pegada de carbono.

Jin; Tian e Xie (2015) utilizaram a teoria dos jogos para otimização conjunta da manutenção, estoque de *SP* e a capacidade de reparo, buscando maximizar a lucratividade, reduzir o custo do sistema e maximizar a disponibilidade, considerando contratos de serviços baseado no desempenho, com foco na garantia da eficiência do serviço.

Kader et al. (2016) exploraram a otimização conjunta entre o sistema de produção, sistema de manutenção e *SP*, com o objetivo de minimizar os custos e as emissões de CO₂. O trabalho visa determinar o plano de produção ideal, bem como uma política de manutenção que integre o gerenciamento de *SP* de forma sustentável utilizando peças novas e usadas, por meio de modelos analíticos baseados no efeito da taxa de deterioração do sistema.

Mjirda et al. (2016) tratou da otimização conjunta entre o gerenciamento da manutenção e o gerenciamento de *SP* através de um modelo híbrido, determinando um plano ótimo de agendamento de manutenção durante um horizonte de tempo finito, minimizando os custos totais.

Antosz e Ratnayake (2016) desenvolveram um modelo de categorização de *SP*, considerando múltiplos critérios. O modelo tem por objetivo a identificação das *SP* de acordo com sua criticidade, para critérios relacionados à manutenção e a logística visando reduzir o tempo de remoção da falha e os custos relacionados a compra e manutenção de estoque.

Hosseini; Scarf e Syntetos (2017) otimizaram conjuntamente o planejamento da manutenção e o estoque de *SP*, buscando definir as melhores políticas de manutenção e de reabastecimento. Períodos de inspeções foram simulados e várias políticas de revisões periódicas e contínuas foram comparadas para definição da melhor estratégia, definindo o cenário ideal e minimizando os custos.

Zhang e Zeng (2017) abordaram a otimização conjunta entre a manutenção preventiva oportunista e o fornecimento de *SP* em sistemas de várias unidades idênticas por meio do *Deterioration state-space partitioning method*. O modelo proposto visa determinar a estratégia ótima conjunta (atividades de manutenção e pedido e manutenção de *SP*) que minimize os custos totais a longo prazo, considerando o estado de deterioração do sistema e o estado do estoque.

Keizer; Teunter e Veldman (2017) estudaram a otimização conjunta entre manutenção baseada em condições e controle de estoque de *Spare Parts* em um sistema de múltiplos componentes, através da modelagem de cadeia de *Markov*, simulando cenários e definindo a melhor estratégia que minimize o custo total. O estudo demonstra também que métodos que

abordam o nível de deterioração do sistema não são ideais para determinar o intervalo do pedido e o período de substituição em sistemas de múltiplos componentes.

Poppe et al. (2017) estudaram o impacto da política de manutenção adotada sob o gerenciamento de estoque de *SP*. Políticas como CM, PM e CBM foram analisadas por meio da simulação, e seu efeito sob demanda e estoque foram avaliados e o comportamento dos custos relacionados ao estoque sob várias políticas de manutenção foram descritos. Ainda como contribuição, identificasse que o efeito da demanda é maior para PM do que para CBM, e que esse efeito pode ser compensado se houver informações antecipadas sobre a demanda.

Nguyen; Do; Grall (2017) buscaram reduzir o custo total da manutenção e do estoque através da otimização conjunta de manutenção e estoque de *SP*, em um sistema com múltiplos componentes idênticos. A pesquisa propõe a regras de decisões baseadas nos níveis de criticidades e disponibilidades de *SP*, determinando os parâmetros necessários para otimização (intervalo de inspeção, limiares de manutenção preventiva e de estoque de *SP*), por meio de um modelo analítico, considerando a vida útil e a degradação do equipamento. A regra de manutenção oportunista também é sugerida com o objetivo de reduzir os custos de manutenção global.

Franciosi; Lambiase e Miranda (2017) focaram no problema da manufatura sustentável desenvolvendo um modelo de apoio à decisão para avaliar a melhor política de manutenção preventiva a ser adotada com o objetivo de minimizar os custos ambientais, sociais e econômicos. O modelo também integra a escolha das *SP* mais adequadas (novas ou recondiçionadas) para a prática da manutenção de modo sustentável, por meio da análise de cenários.

Israel et al. (2017) propuseram um método para integrar informações de um sistema de manutenção ao planejamento operacional. O método híbrido integra o sistema de informações, que fornece a demanda de *SP*, a programação linear que calcula as soluções para as variáveis de decisões de acordo com as restrições e a simulação, com o objetivo de minimizar os custos de produção e distribuição de uma cadeia de suprimentos de *SP* com múltiplos produtos e múltiplos canais.

Hosseini; Scarf e Syntetos (2018) otimizaram conjuntamente a política de inspeção e o estoque de *SP* de máquinas em um sistema paralelo, por meio de simulação e otimização numérica. Vários intervalos de inspeção e o reabastecimento de *SP* em uma política de revisão periódica foram simulados, determinando o intervalo de inspeção e reabastecimento ideal, com o objetivo de minimizar os custos. Como resultado, para essa abordagem, observou-se que a política ótima ideal é formada pela frequência de inspeção e reposição iguais.

Sleptchenko; Al e Zijm (2018) abordaram a otimização conjunta entre o estoque de *SP* e a alocação de mão de obra em um sistema de mão de obra, com o objetivo de minimizar o custo total do sistema (manutenção de *SP*, mão de obra e terceirização). Os autores propuseram o uso da programação inteira mista usando as equações de balanço da representação da cadeia de *Markov* e uma heurística para avaliação da fração do percentual de terceirização e custos totais.

Bülbul; Bayindir e Bakal (2019) estudaram o problema conjunto de substituição preventiva e o planejamento de estoque de *SP* em um sistema de máquinas múltiplas, idênticas, com falhas dependentes da idade, em um horizonte de planejamento finito. A problemática foi formulada através da programação dinâmica exata, com o objetivo de minimizar o custo total, entretanto, devido a sua complexidade de implementação e a dependência do estado do sistema e do horizonte de planejamento, três heurísticas são propostas para a implementação na prática (aproximação do estado estável, política estacionária e abordagem míope).

Basten e Ryan (2019) abordaram o impacto que as decisões sobre atividades de manutenção planejada têm sobre os requisitos de estoque de *SP* em um sistema de estoque de revisão periódica com um único ponto de estocagem, usado para atender às demandas de manutenção planejada de baixa e alta prioridade. Os autores analisaram o impacto do atraso da manutenção e como o mesmo pode ser utilizado de forma estratégica, por meio da avaliação de três políticas de manutenção distintas caracterizadas pela quantidade de atraso que pode ser imposta à manutenção planejada, fornecendo um modelo que auxilia em uma melhor gestão conjunta dessas duas funções críticas.

Ghahroodi et al. (2019) realizaram o planejamento integrado de *SP* e engenheiros de serviço necessários para um grupo de sistemas sujeitos a diferentes tipos de falhas. O objetivo do trabalho é determinar conjuntamente os níveis de estoque e o número de engenheiro de serviços de modo a minimizar os custos totais, sujeito a restrições de tempo de espera. Os autores compararam os resultados obtidos da otimização conjunta, obtidos através de uma heurística com a otimização de cada abordagem separadamente, como resultado observa-se que a otimização conjunta fornece um melhor desempenho.

Um resumo sobre os artigos revisados neste tópico encontra-se no Quadro 4:

Quadro 4- Artigos revisados (Manutenção e Spare Parts)

Publicação	Ano	Aplicação numérica	Caso real S/N	Técnicas	Métodos	Software	Estratégias e Políticas	Variáveis de decisão	Multi-Objetivo S/N	Objetivo
Lanza; Niggeschmi e Werner	2009	Sim		Modelagem matemática	Algoritmo de otimização estocástica	não informado	PM	Intervalo de manutenção	N	Min custo
Destombes; Heijden e Harten	2009	Sim	Não	Heurísticas	Heurística	não informado	CBM	Tamanho do sistema Tamanho do pedido SP	N	Min custo
Cheng e Tsao	2010	Sim	Sim	Multi-criterio	Processo de rede analítica (ANP)	Mathematica	PM CM	Estratégia de Manutenção Tamanho do pedido SP Intervalo de substituição	N	Max a função utilidade
Rausch e Liao	2010	Sim	Sim	Heurística de duas etapas	Aproximação dos mínimos quadrados SBO	não informado	PM	Limite de manutenção	S	Min estoque Min custo
Nosoohi e Hejazi	2011	Sim	Não	Multi-objetivo	Método e-constraint	GAMS	PM	Intervalo de substituição preventiva Tamanho do pedido SP	S	Min custo Min correção de falhas Min tempo de vida residual Min investimento em SP
Wang	2011	Sim	Não	Combinação de abordagens analíticas e de enumeração	Deley Time (DT)	não informado	PM	Tamanho do pedido SP Intervalo de pedidos	N	Min custo
Wang	2012	Sim	Não	Algoritmo de enumeração com programação dinâmica estocástica	Delay-time Dynamic programming Optimisation	não informado	PM	Intervalo de inspeção Tamanho do pedido SP Intervalo de pedidos	N	Min custo
Liu; Dong e Peng	2012	Sim	Sim	Processos estocásticos	Cadeia de Markov	não informado	PdM	Intervalo de inspeção Escolha da ação de manutenção ótima	S	Min custo

				Programação dinâmica	Programação dinâmica			Intervalo de Manutenção		Melhor utilização do equipamento
								Tamanho do pedido SP		
Nguyen; Yeung e Castanier	2013	Sim	Não	Simulação	Markov	não informado	PM	Estratégia de manutenção/substituição	N	Definir Política de manutenção ótima
Van Horenbeek et al.	2013	Sim	Não	Modelo de simulação estocástica	Monte Carlo GA	não informado	PM	Tamanho da frota Mixing parameter	N	Min custo
Xie ; Liao e Jin	2014	Sim	Sim	Modelagem matemática Programação matemática	Modelos de cadeia de Markov de tempo contínuo Programação linear inteira binária Branch and- bound	não informado	PM	Nível de redundância Nível de estoque de base	N	Max disponibilidade
Godoy ; Pascual e Knights	2014	Sim	Sim	Modelagem matemática	Modelo analítico	não informado	PM	Intervalo de PM Nível de estoque	N	Max lucratividade
Frazzon et al.	2014	Sim	Não	Programação matemática Simulação	Programação linear inteira mista (MILP) integrando: Problema de dimensionamento do lote capacitado (CLSP) e o Problema de fluxo de redes (NFP) DES	não informado	-	Políticas de estoque Programação das operações da cadeia de suprimentos	N	Min custo
Panagiotidou	2014	Sim	Sim	Modelagem matemática	Modelo analítico	não informado	PM	Período do pedido Tamanho do pedido SP Intervalo de inspeção	S	Min manutenção Min custo de estoque de SP

Zanjani e Nourelfath	2014	Sim	Não	Programação matemática Modelo determinístico	Multi-stage stochastic programming	não informado	PM	Nº de reparos no período Tamanho do pedido SP	N	Min custo
Jiang; Chen e Zhou	2015	Sim	Sim	Modelo analítico	Modelo analítico	não informado	PM	Intervalo de substituição preventiva Nível máximo de estoque	N	Min custo
Gan et al.	2015	Sim	Não	Simulação	Método de enumeração Algoritmo genético (GA)	Matlab	PM CM	Intervalo PM Tempo de chegada de SP Início de acumulação do buffer Tamanho do Buffer	N	Min custo
Chemweno; Pintelon e Muchiri	2015	Sim	Sim	Simulação	Modelo de simulação de eventos discretos (DES)	Arena	PM	Estoque interno Estoque de parceiros Taxa de reparo Ciclo de reparo Taxa de necessidade de SP	S	Max disponibilidade Min custo
Kader et al.	2015	Sim	Não	Modelagem matemática	Modelo analítico	não informado	PM CM	Nº ótimo de SP (nova e usada) Tamanho do lote de compra sustentável Intervalo de pedido Taxa de produção Intervalo de PM	S	Min custo Reduzir pegada de carbono
Jin; Tian e Xie	2015	Sim	Sim	Modelagem matemática Multicriterio	Modelo analítico Game-theoretical decision model	não informado	PM	Nível de estoque Intervalo de manutenção Tempo de ciclo para recondicionamento de uma peça Tempo de ciclo para reparar uma peça	S	Max disponibilidade Min custo
Kader et al.	2016	Sim	Não	Modelo analítico	Modelo HMMS	não informado	PM CM	Plano ótimo de produção Intervalo PM Nº de manutenção preventiva (SP novas e usadas)	S	Min custo Reduzir pegada de carbono

									Nº de reparos mínimos (SP novas e usadas)	
Mjirda et al.	2016	Sim	Não	Programação matemática	Método Híbrido	CPLEX	PM	Plano de manutenção (Máquinas e períodos)	N	Min custo
Hosseini ; Scarf e Syntetos	2017	Sim	Sim	simulação	Deley time model (DT)	Promodel	PM	Intervalo de Inspeção	N	Min custo
Zhang e Zeng	2017	Sim	Sim	Modelagem matemática	Deterioration state-space partitioning method	não informado	PM	Política de reabastecimento de SP	N	Min custo
Keizer; Teunter e Veldman	2017	Sim	Não	Simulação	Processo de Decisão de Markov	Python	CBM	Política conjunta ótima (Intervalo de manutenção, níveis de deterioração, nível de estoque)	N	Min custo
Poppe et al.	2017	Sim	Sim	Modelagem matemática Simulação	Modelo analítico Exhaustive simulation-optimisation.	Arena	CBM PM CM	Ponto de reabastecimento Nível de estoque Tamanho do pedido SP Intervalo PM Limite de intervenção CBM	N	Min custo
Nguyen ; Phuc Do e Grall	2017	Sim	Sim	Modelagem matemática Simulação	Modelo de Custo Monte Carlo	não informado	PM	Intervalo de inspeção Parâmetros de decisão da proposta de estratégia conjunta	N	Min custo
Franciosi; Lambiase e Miranda	2017	Sim	sim	Modelagem matemática	Método analítico	Matlab	PM CM	Período de manutenção preventiva Plano para cada componente	N	Min custo sociais, ambientais e financeiros.
Israel et al	2017	Sim	Sim	Programação matemática simulação	Método híbrido (IMS, Programação linear, Discrete Event Simulation (DES))	SIMIO	-	Tamanho do lote Nível de estoque Fluxo de produto Nº de viagens	N	Min custo

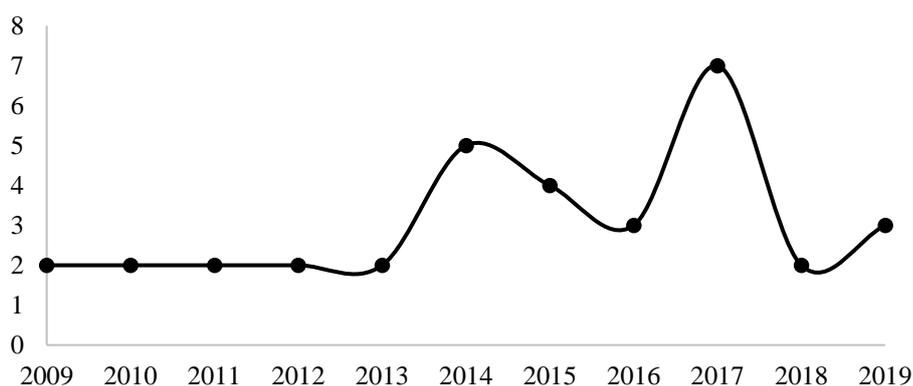
Hosseini ; Scarf e Syntetos	2018	Sim	Não	simulação	Delay-Time	Promodel SimRunner	PM CM	Período de reabastecimento de SP Nível de estoque (Order-Up-To-Level) Intervalo de inspeção	N	Min custo
Sleptchenko; Hanbali e Zijm	2018	Sim	Sim	Programação matemática	Programação inteira mista (MIP) usando as equações de balanço da representação da cadeia de Markov	Python	PM	Nº de engenheiros base Nível de estoque SP Taxa de terceirização	N	Min custo
Bülbül; Bayındır e Bakal	2019	Sim	Não	Programação dinâmica Abordagens heurísticas	Heurísticas Aproximação de Estado Estável Política Estacionária Abordagem míope.	Microsoft Visual C#	PM	Idade limite para segurar uma SP Idade Limite para substituição preventiva Nível de estoque após a substituição preventiva	N	Min Custo
Basten e Ryan	2019	Sim	Não	Heurística	Heurísticas míopes	não informado	PM CM	Política de atraso de manutenção Nível de estoque de segurança	N	Min Custo
Ghahroodi et al.	2019	Sim	Não	Heurística	Greedy algorithm	AnyLogic	PM	Níveis de estoque Nº de engenheiro de serviços	N	Min custo

Fonte: O autor (2020)

3.4.1 Visão geral dos artigos relacionados à otimização conjunta entre manutenção e *Spare Parts*

A partir da revisão dos 34 artigos é possível extrair informações sobre o comportamento da literatura durante os anos. Observa-se um crescimento de publicações expressivo entre os anos 2014 e 2017, sendo o ano de 2017 o que apresenta maior número, 7 artigos.

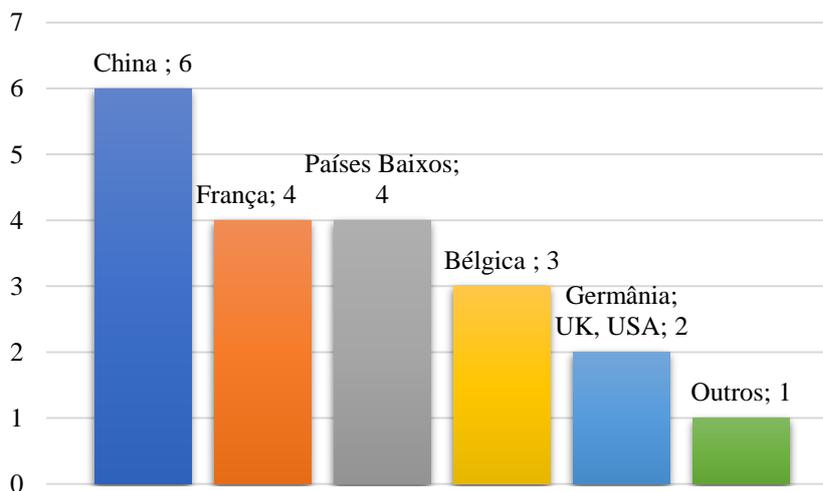
Gráfico 13-Artigos de otimização conjunta avaliados durante o período (2009-2019)



Fonte: O autor (2020)

Em relação à distribuição das publicações por países, a China é o país mais representativo seguido por França e Países baixos, como observados no Gráfico 14.

Gráfico 14-Percentual de publicação de otimização conjunta, por país

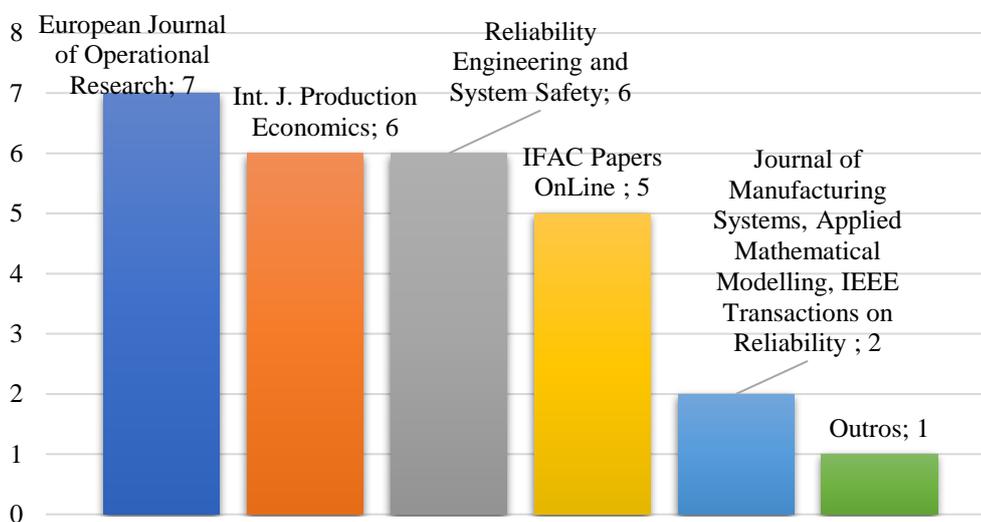


Fonte: O autor (2020)

O *European Journal of Operational Research* é o *Journal* mais frequente entre as publicações revisadas, responsável por 7 entre as 34 publicações. Em seguida, O *International Journal Production Economics* e o *Reliability Engineering and System Safety* apresentam 6

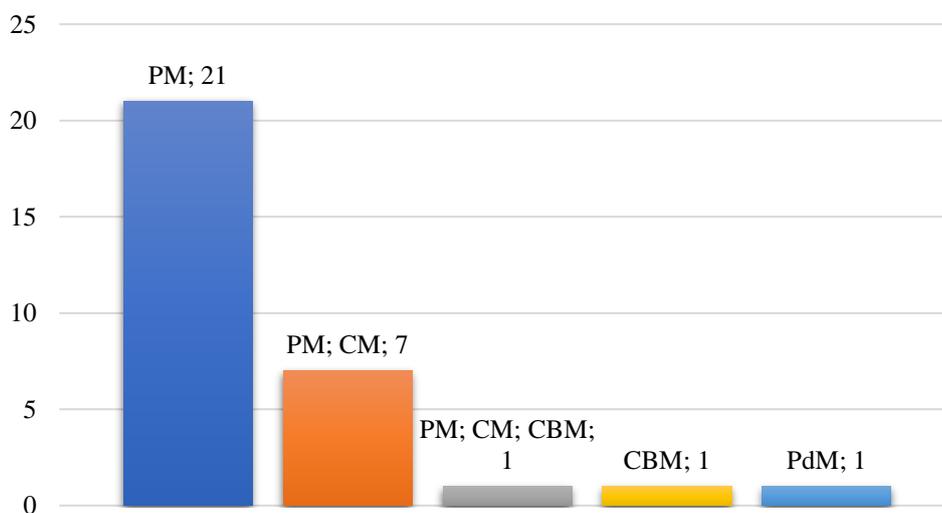
publicações cada, sendo esses *Journals* de publicações alta qualidade e de alto fator de impacto na literatura.

Gráfico 15-Jornals mais frequentes entre as publicações de otimização conjunta revisadas



Fonte: O autor (2020)

Gráfico 16-Estratégias e políticas de manutenção presente em estudos de otimização conjunta.

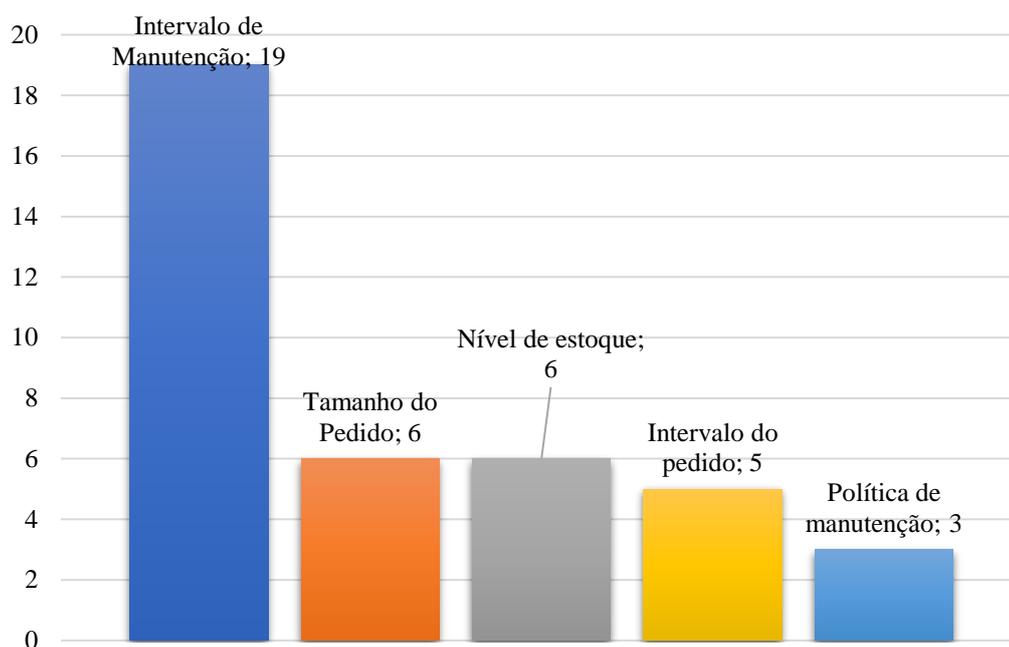


Fonte: O autor (2020)

As práticas de substituição e inspeção preventiva estão presente em mais de 88% dos artigos revisados, tratada isoladamente ou em combinação com outras políticas de manutenção de manutenção corretiva e manutenção baseada na condição, como ilustrado no Gráfico 16. Conseqüentemente, entre as variáveis de decisão mais abordadas, a definição do intervalo ótimo de inspeção ou substituição lidera o ranking, estando presente em 19 artigos.

Além de otimizar o sistema de manutenção, como visto na revisão nos artigos descritos, a otimização conjunta integra o gerenciamento do estoque de *SP* para que as melhores decisões de estocagem sejam efetivadas, envolvendo variáveis de decisões como Tamanho do Pedido, Intervalo do pedido e nível de estoque, ver Gráfico 17. Outras variáveis de decisões como definição de política de manutenção, política ótima de gerenciamento de estoque e política conjunta ótima também são abordadas, entre outras vistas no Quadro 4.

Gráfico 17-Variáveis de decisão frequentes na otimização conjunta



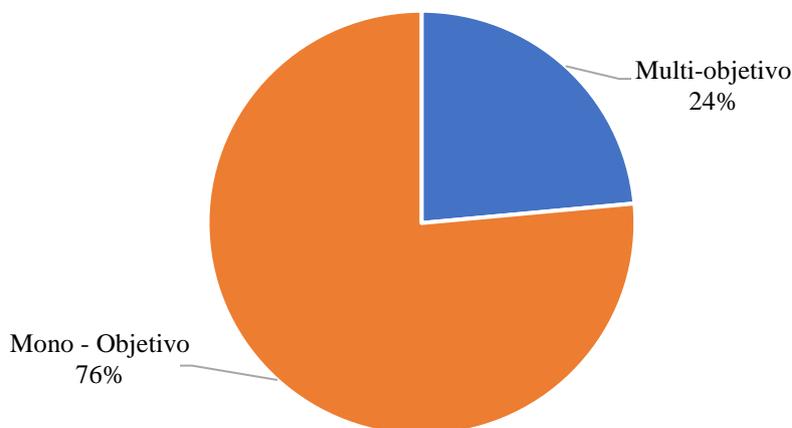
Fonte: O autor (2020)

Em quase todos os artigos analisados, a busca pela minimização do custo (88% dos artigos) domina os objetivos de decisão. Em estudo à todas as aplicações numéricas realizadas nas pesquisas, observa-se que a otimização conjunta permite a redução dos custos totais, sendo eles custos de manutenção ou estocagem de *SP*. Dessa forma, a tendência para esse tipo de problemática é a busca por menores custos e menores investimentos de ativos. A problemática multiobjetivo ainda é pouco frequente entre os trabalhos, sendo observado em apenas 8 dos 34 artigos, como visto no Gráfico 18.

Os múltiplos objetivos envolvem: A minimização do custo do estoque de *SP* e o custo de manutenção observado no trabalho de Panagiotidou (2014); a maximização da disponibilidade e minimização do custo Chemweno; Pintelon e Muchiri (2015) e Jin; Tian e Xie (2015) e a aderindo as tendências futuras que é a produção sustentável, o problema multiobjetivo entre a

minimização do custo e a redução da pegada de carbono foi abordada por Kader et al. (2015; 2016)

Gráfico 18-Tipo de objetivo de decisão nos artigos de otimização conjunta, revisados



Fonte: O autor (2020)

3.5 Discussão da literatura

Como mencionado no início do capítulo, a busca por melhoria no sistema de manutenção e gerenciamento de estoque de *SP* vem se tornando alvo de pesquisa nos últimos anos. Dessa forma, a abordagem simultânea de ambas problemáticas desperta o interesse dos pesquisadores devido a comprovação dos ganhos maiores, obtidos com a otimização conjunta, em relação quando tratada isoladamente.

Também é possível comprovar a importância de estudos voltados a melhorias na cadeia de suprimentos, e ao estudo do impacto de cada elo sob a cadeia, propondo cada vez mais a integração de todas as partes envolvidas. A revisão permite acompanhar o desenvolvimento e avanço da ciência, identificar as limitações a serem vencidas e os obstáculos a serem encontrados durante todo esse processo de desenvolvimento e proposição de métodos e ferramentas de apoio.

A partir da revisão da literatura aqui presente, é possível identificar que:

- i) Em muitos casos, a indisponibilidade de dados para aplicação do modelo proposto e a complexidade do mesmo, leva a necessidade do uso de simulação.
- ii) Em quase todos os trabalhos, a busca incessante pela minimização do custo permanece frequente, sendo esse o objetivo de decisão dominante na literatura abordada. Contudo, a maximização da disponibilidade do sistema também é um fator predominante nas pesquisas, visto que para que o sistema de produção

funcione conforme o planejado é necessário que a disponibilidade assegure a produção. Dessa forma, a disponibilidade de *SP* e a disponibilidade do sistema estão interligadas e o gerenciamento eficiente das peças em conjunto com a política de manutenção ideal permite a otimização de ambos os objetivos.

- iii) Problemas multiobjetivos ainda são pouco explorados, devido à maior complexidade, mesmo que, como já mencionando, há dois objetivos importantes a serem abordados. Sendo esta uma lacuna a ser preenchida na literatura.
- iv) Grande parte dos artigos explorados, realizaram suas aplicações através de dados reais, o que é de grande contribuição científica na prática.
- v) O uso de sistema dinâmico ainda é pouco difundido na prática, sendo esta outra abordagem que deve ser mais explorada, uma vez que o mesmo possibilita a análise do comportamento dinâmico do sistema ao longo do tempo.
- vi) A manutenção preventiva é a política de manutenção predominante entre as organizações e estudos, sendo ela também a que apresenta melhores resultados de desempenho e rentáveis após aplicações numéricas.

Dessa forma, o presente trabalho busca preencher essas lacunas identificadas na literatura, direcionando o estudo para o alcance de um modelo pioneiro que determine a melhor estratégia de manutenção e de gestão de estoque de *SP*, conjuntamente, em uma cadeia de suprimentos.

4 LDESCRIBÇÃO DO MODELO

O modelo proposto descreve um processo de decisão integrada entre as ações de manutenção e gerenciamento de estoque de *SP*. A pesquisa foca no desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos generalizada, limitadas a dois elos, onde, cada elo possui seu sistema, definindo suas próprias estratégias para a realização das atividades de manutenção e a política para reposição de estoque de *SP*. Em cada elo, o desempenho é avaliado através do índice de disponibilidade, em resposta à estratégia determinada.

A demanda do elo à montante provém do elo à jusante, estabelecendo a ligação entre os elos, abrangendo os efeitos dinâmicos subjacentes, apoiando a investigação das relações causais entre todos os elementos envolvidos no problema, definindo o impacto das ações de um elo sobre o outro. A integração das ações estratégicas dos dois elos é proposta por meio da coordenação conjunta, definindo os valores ideais para os parâmetros das políticas de manutenção e do estoque, equilibrando as compensações entre os custos atribuídos à cadeia e a disponibilidade necessária para o melhor nível de serviço.

A cadeia de suprimentos começa com o recebimento de um pedido, se houver o produto em estoque, o pedido é fornecido e o estoque repostado. Caso contrário, a demanda não será atendida, ocasionando *stockout*. A quantidade de produtos em estoque dependerá da disponibilidade dos equipamentos da organização, sujeitos às atividades de manutenção.

Tendo como objetivo a avaliação do impacto das diferentes estratégias sobre o desempenho da cadeia e qual a melhor decisão a ser tomada dentro dos cenários possíveis, enfatizando o aumento da eficiência econômica e o desempenho do sistema de manutenção, o modelo foca em três questões norteadoras que serão discutidas após sua aplicação:

- (i) Qual o impacto do gerenciamento de estoque de *SP* nos custos e na disponibilidade do sistema?
- (ii) Como as diferentes estratégias de manutenção impactam a disponibilidade do sistema?
- (iii) Como a abordagem de decisões integradas podem impulsionar tomadas de decisão mais eficientes?

A abordagem de sistema dinâmico é usada como método de modelagem. O SDSM é construído usando uma linguagem de estoque e fluxos para representar a série de equações diferenciais que compõe o modelo, utilizando o software de simulação Stella®, com uma

linguagens de simulação orientada e projetada especificamente para desenvolver um modelo de sistema dinâmico, como mencionado por Botha; Grobler e Yadavalli (2017).

O modelo representado a seguir examina duas estratégias de manutenção e as três políticas de gerenciamento de estoque utilizadas com maior frequência na literatura, que de forma combinada, resultarão em centenas de cenários a serem avaliados:

- Estratégias de manutenção
 - i) Ações de manutenção corretiva (alterações na alocação de 1-4 equipes de manutenção) e nenhuma atividade de manutenção preventiva;
 - ii) Ações de manutenção preventiva (alterações na alocação de 1-4 equipes de manutenção) e uma taxa de substituição preventiva de 50% dos equipamentos;
- Políticas de estoque de *SP*
 - iii) *Review Period, Order Up to Level (R,S)*, onde o período de reposição (*R*) irá variar na faixa de (1-4) semanas;
 - iv) *Order Point, Order Quantity (s,Q)*, onde o tamanho do lote da ordem de compra (*Q*) é pré-fixado, variando em cada elo, buscando mensurar o impacto da variável;
 - v) *Order Point, Order Up to Level (s,S)*, sendo (*s*) o ponto de ressuprimento variável, estabelecido através da demanda média durante o *lead time* e o estoque mínimo desejado;

Para simular o comportamento da cadeia de suprimentos, utilizou-se parâmetros e variáveis amplamente estudados e recomendados para modelos de *SD*, baseando-se nos trabalhos de Barlas e Özevin (2004); Ghadge et al. (2018) e Khorshidi; Gunawan e Ibrahim (2015). Dessa forma, a

Tabela 1 mostra a notação utilizada para representar a estrutura geral de uma cadeia de suprimentos genérica com dois elos. Também se utilizou essa notação para desenvolver os diagramas de *loop* causal (*CLDs*) e a modelagem do sistema dinâmico (*SD*) equivalente para comprar os diversos cenários existentes, por meio da coordenação conjunta.

Tabela 1 - Notação para os modelos da cadeia de suprimentos

Notação

Índices

- t = Índices para períodos, t=1,..(T);
- e = Índices para elos, e=1,2;

Parâmetros

- λ_e = Taxa de falha inicial dos equipamentos no elo e;
- μ_e = Taxa de reparo inicial dos equipamentos no elo e;

E_e = Estoque inicial de peças de *SP* no elo e ;
 C_e = Capacidade de produção do sistema de produção no elo e ;
 E_{qe} = Quantidade de equipamentos no elo e ;
 TP_{rSpe} = Tempo de reabastecimento médio de *Spare Parts* no elo e ;
 SD_{rSpe} = Desvio padrão do *Lead time* de reabastecimento de *Spare Parts* no elo e ;
 NS_{Spe} = Nível de serviço do sistema de reabastecimento de *Spare Parts* no elo e ;
 LT_{prode} = Lead Time de reabastecimento do sistema de produção no elo e ;
 NS_{prode} = Nível de serviço do sistema de produção no elo e ;
 D_2 = Demanda do sistema de produção do elo 2;
 SD_{D2} = Desvio da demanda do elo 2;
 C_{aqe} = Custo de aquisição unitário de *SP* no elo e ;
 C_{aqEe} = Custo unitário de aquisição de emergência de *SP* no elo e ;
 CE_e = Custo de estocagem unitário no elo e ;
 CT_e = Custo de envio do pedido (*SP*) no elo e ;
 CTE_e = Custo de envio do pedido (*SP*) de emergência no elo e ;
 C_{ce} = Capacidade de envio de carga no elo e ;
 C_{empe} = Custo da emissão do pedido no elo e .

Variáveis de estoque

ES_e = Nível agregado de estoque de *Spare Parts* elo e ;
 A_e = Disponibilidade no elo e ;
 $P0_e$ = Probabilidade de transição para o estado de falha no Elo e ;
 $P1_e$ = Probabilidade de transição para o estado de função no Elo e ;
 ESP_e = Estoque do sistema produtivo no elo e ;

Variáveis de Fluxo

OT_e = Quantidade de compra de *Spare Parts* no elo e ;
 Dsp_e = Demanda de *Spare Parts* no elo e ;
 $ESSp_e$ = Estoque de segurança *Spare Parts* no elo e ;
 Fu_e = Percentual de equipamentos no estado de funcionamento elo e ;
 Fa_e = Percentual de equipamentos no estado de falha elo e ;
 $Prod_e$ = Fluxo de Produção elo e ;
 Dc_e = Demanda do cliente no elo e ;
 $EsProd_e$ = Estoque de segurança no sistema de produção elo e ;

Variáveis auxiliares

MC_e = Quantidade de equipes de manutenção corretiva (Variável de decisão) no elo e ;
 MP_e = Percentual de manutenção Preventiva (Variável de decisão) no elo e ;
 Tr_e = Taxa de reparo variável dos equipamentos do elo no e ;
 Tfe = Taxa de falha dos equipamentos do elo e ;
 Emc_e = Efeito das atividades de manutenção corretiva sobre o sistema no elo e ;
 Emp_e = Efeito das atividades de manutenção preventiva sobre o sistema no elo e ;
 Cmc_e = Custo de manutenção corretiva no elo e ;
 Cmp_e = Custo de manutenção Preventiva no elo e ;
 Cm_e = Custo de manutenção no elo e ;
 Cp_e = Custo por parada no elo e ;
 CT_e = Custo total no elo e ;
 CTE_e = Custo total de pedido de emergência no elo e ;
 CE_e = Custo de estocagem no elo e ;
 CP_e = Custo do pedido de (*SP*) elo e ;
 CA_e = Custo de aquisição de (*SP*) no elo e ;
 CPE_e = Custo do pedido de (*SP*) de emergência elo e ;
 CAE_e = Custo de aquisição de (*SP*) de emergência no elo e ;
 LTr_e = Lead time de reabastecimento de *Spare parts* no elo e ;
 SDr_e = Desvio da demanda durante o tempo de reabastecimento no elo e ;
 $Eqmp_e$ = Quantidade de equipamentos de substituição preventiva no elo e ;
 $Eqfe$ = Quantidade de equipamentos em falha no elo e ;

Dm_{spe}	=	Demanda média de <i>SP</i> no elo <i>e</i> ;
σ_{Dspe}	=	Desvio padrão da demanda de no elo <i>e</i> ;
$Efun_e$	=	Transição para o estado de funcionamento no elo <i>e</i> ;
Efa_e	=	Transição para o estado de falha no elo <i>e</i> ;
P_e	=	Performance no elo <i>e</i> ;
$fp_{2 \rightarrow 1}$	=	Fator de risco de produção do elo 2 para o elo 1;
$Emin_e$	=	Estoque mínimo para política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
Dpr_e	=	Demanda esperada para política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
$LTpr_e$	=	Lead time para política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
$Eeft_e$	=	Estoque efetivo para política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
$Qtdet_e$	=	Quantidade de (<i>SP</i>) de emergências pedidas no elo <i>e</i> ;
R_e	=	Período de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ; (variável de decisão)
Tp_e	=	Tempo (variável auxiliar para <i>R</i>) no elo <i>e</i> ;
S_e	=	Nível superior de estoque para política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
Q_e	=	Tamanho do lote de compra fixo para a política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i> ;
s_e	=	Ponto de ressuprimento para a política de reabastecimento (<i>SP</i>) no elo <i>e</i>

Fonte: O autor (2020)

Por razões de simplificação e disponibilidade de dados, as seguintes suposições foram realizadas:

1.5 Suposições chaves

- As *SP* não são reparáveis, uma vez em defeito a peça deverá ser substituída por uma nova;
- A manutenção corretiva é realizada pelas equipes de manutenção corretivas atribuídas ao sistema e as atividades de manutenção preventiva correspondem a taxa de substituição preventiva dos equipamentos da planta;
- Quando ocorre uma falha, o item é substituído imediatamente, se houver em estoque;
- As equipes de manutenção estarão sempre disponíveis quando acionadas, ou seja, sempre que houver necessidade de reparo ou substituição, haverá equipes em prontidão;
- Disponibilidade inicial: todos os equipamentos estão em estado funcional (100% disponível) no início da simulação;
- A demanda por *SP* é gerada através da agregação dos equipamentos em falha (que serão substituídos) e os equipamentos que sofrerão a substituição preventiva, seguindo uma distribuição normal, e o mesmo perfil será mantido para todas as políticas de reabastecimento a serem simuladas ($R, S; s, Q; s, S$);
- O *Lead Time* e a demanda podem ser definidos como uma constante ou como uma função de distribuição normal, com desvio média e desvio padrão definidos;
- No modelo, considera-se apenas um único tipo de *SP*, pois segundo Panagiotidou (2014) a maioria dos modelos propostos assume uma única unidade operacional e a grande

maioria deles também se restringe à um único tipo de peça de reposição em estoque, como observado nos trabalhos de Nguyen e Bagajewicz (2008) e Wang; Chu e Mao (2008);

- O fornecedor de *SP* tem capacidade suficiente receber os pedidos realizados; e todos os pedidos são feitos no início de cada dia para a política de reabastecimento periódica e para a contínua são realizados imediatamente;
- O custo de estocagem é dado pelo custo de manutenção em estoque incorrido ao item, sendo este um percentual sob o custo de aquisição. O custo de Manutenção é o resultado do somatório dos custos totais das ações de manutenção preventiva e manutenção corretiva e o custo do pedido é composto pelo custo necessário para emitir o pedido e o custo de transporte até a organização;
- Considera-se que todas as *SP* adquiridas estão em estado de funcionamento e a substituição é perfeita, livre de erros.
- O perfil da demanda no sistema de produção do elo, não muda ao longo de todo o período de simulação;
- A unidade de tempo utilizada na simulação é de uma semana;
- O sistema é avaliado com base nos custos e na disponibilidade esperada a longo prazo.

1.6 Modelo de simulação de sistema dinâmico

1.6.1 Causal loop diagram (CLD)

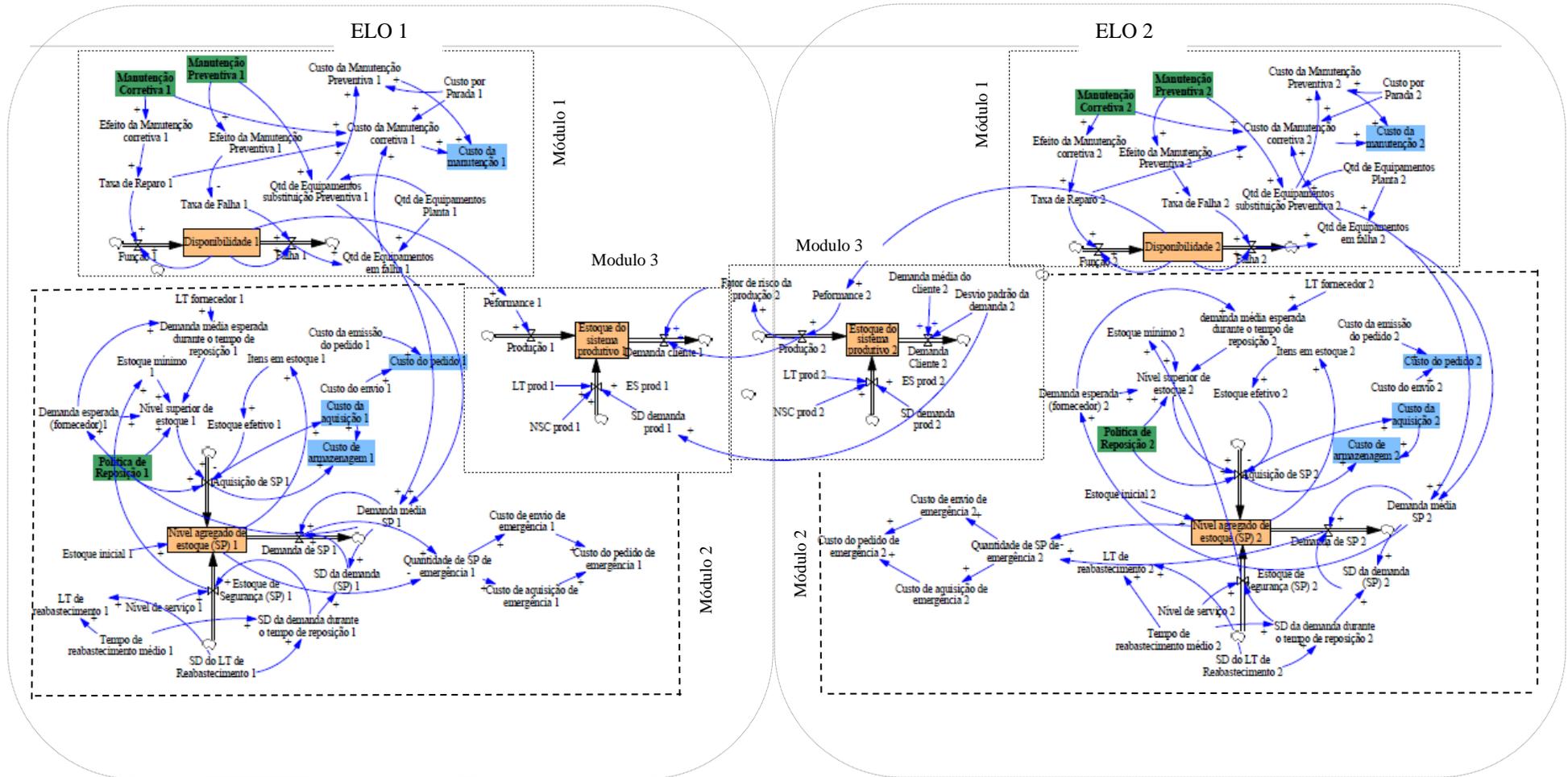
Em um sistema dinâmico a análise de causalidade é um fator crítico a ser explorado. O diagrama de *loop* causal (CLD) é uma ferramenta importante para estruturação e compreensão do problema, pois, ajuda a visualizar como as variáveis estão inter-relacionadas, expressando rapidamente as hipóteses sobre as causas da formação do sistema dinâmico FANG e ZHAODONG (2015); STERMAN(2000).

As relações causais dos fatores que afetam uma cadeia de suprimentos com dois elos, considerando o gerenciamento da manutenção e o gerenciamento de *SP*, mencionados no início do capítulo, são demonstradas na Figura . O diagrama está subdividido em blocos, que estão relacionados à um sistema de gerenciamento dentro do elo que compõe, com o objetivo de facilitar a compreensão do modelo proposto e suas interações.

Para compreensão da subdivisão do modelo, três módulos de análise serão abordados abaixo:

1. Módulo 1 - Gestão da manutenção: Mensura o desempenho do sistema de manutenção por meio do grau de disponibilidade resultante das estratégias de *MC* e *MP*, definindo a estratégia mais adequada para obtenção de maior disponibilidade e menor custo de manutenção;
2. Módulo 2 - Gerenciamento de estoque de *SP*: Define a política e os parâmetros para o gerenciamento eficiente da política de reposição de estoque de *SP* no sistema de manutenção, visando um melhor desempenho do sistema e menor custo de estocagem;
3. Módulo 3 - Sistema de produção: Quantifica o impacto da disponibilidade sobre a performance do sistema de produção e o atendimento da demanda do elo subjacente.

Figura 6- Diagrama de Loop causal do modelo proposto



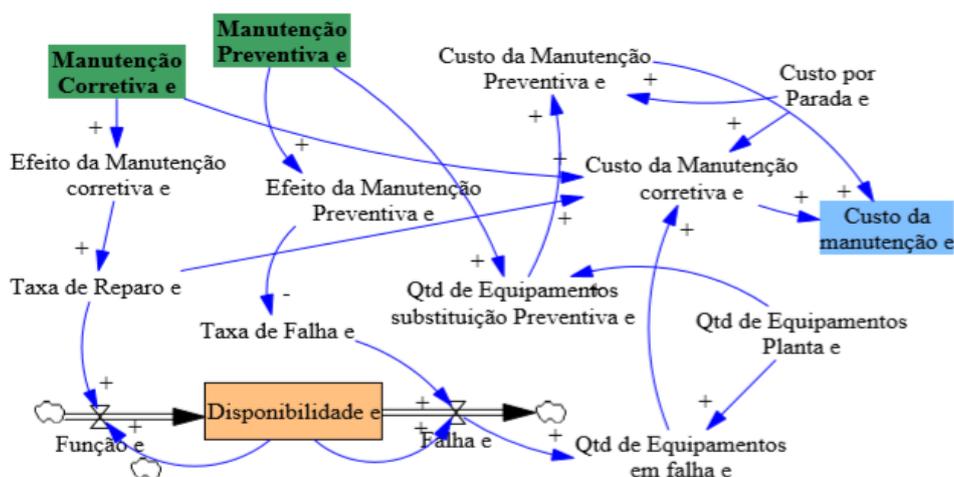
Fonte: O autor (2020)

A seguir, o diagrama de cada bloco será descrito, identificando os efeitos entre os elementos que compõe o sistema e como a integração entre esses elementos possibilita a coordenação conjunta na cadeia de suprimentos.

4.2.1.1 Gestão da manutenção – Módulo 1

No sistema de gerenciamento de manutenção, a disponibilidade dos equipamentos é definida conforme a estratégia de manutenção adotada pelo elo. Tais relações são visualizadas através do diagrama de loop causal ilustrado na Figura .

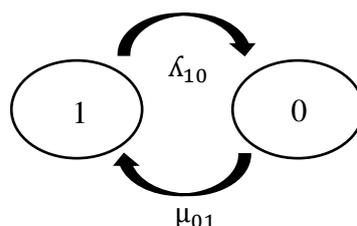
Figura 7- CLD - Módulo 1 (Gestão da Manutenção)



Fonte: autor (2020)

Khorshidi; Gunawan e Ibrahim (2015) afirmam que o sistema de manutenção pode ser explicado através de um sistema binário onde os equipamentos podem ocupar dois estados: função ou falha. O Diagrama 5 ilustra a transição entre esses estados. No estado 1, o equipamentos realiza suas funções sem interrupções, contudo, quando ocorre uma falha, com uma taxa de chegada de λ_{10} , há uma transição para o a estado falha (estado 0), comprometendo a operacionalidade do sistema até que haja o reparo, sendo μ_{01} a taxa de reparo, e o equipamento retorne para o estado de função (estado 1).

Diagrama 5- Transição de estados (sistema de manutenção)



Fonte: O autor (2020)

As probabilidades de transição de cada estado (j) no tempo (t), ($P_j(T)$), são encontradas através das equações diferenciais (8) e (9).

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\mu_{01} \times P_{0t} + \lambda_{10} \times P_{1t} \quad (1)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_{10} \times P_{1t} + \mu_{01} \times P_{0t} \quad (2)$$

Onde $P_{1t} = 1 - P_{0t}$, porque o sistema é binário. As condições iniciais do sistema são $P_{1_0} = 1$, $P_{0_0} = 0$.

As relações descritas no diagrama de transição são utilizadas para determinar a disponibilidade do sistema, como visto no Diagrama 5. Os equipamentos são estabelecidos como unidades que fluem entre o estoque (disponibilidade) ao longo do tempo, transitando entre os estados função ou falha. O grau de disponibilidade é alimentado através do fluxo positivo dos equipamentos no estado de funcionamento do sistema, ao mesmo tempo em que os equipamentos que falham ao longo do período, induzidos pela taxa de falha, orientam o fluxo de saída, movendo os equipamentos para a substituição preventiva, reduzindo a disponibilidade em detrimento dos equipamentos inoperantes.

Dessa forma, a disponibilidade do sistema é demonstrada na equação (3):

$$A_{e_t} = (\mu_{01} * (1 - A_{e_{t-1}}) - \lambda_{10} * A_{e_{t-1}}) \quad (3)$$

Onde A_{e_t} é a disponibilidade com valor inicial=1.

Observa-se também que ambas as taxas (falha e reparo) possuem uma relação causal positiva sobre os estados que influenciam. Um aumento na taxa de reparo possibilita maior recuperação do sistema e consequentemente uma maior quantidade de equipamentos no estado de função. Essa capacidade de reparo é impactada diretamente pelo número de equipes de manutenção corretiva disponíveis para realizar as atividades ao longo do período, uma vez que, o aumento da taxa de reparo é diretamente proporcional a quantidade de equipes, como descrito na equação (4).

$$T_{re} = \mu_e * Emc_e \quad (4)$$

Onde μ_e é a taxa de reparo inicial do elo. O efeito das atividades de manutenção corretiva (Emc_e) e o efeito do percentual de manutenção preventiva (Emp_e) em cada elo pode ser quantificado através das equações (5) e (6), adaptadas de Khorshidi; Gunawan e Ibrahim (2015):

$$Emc_e = MC_e \quad (5)$$

$$Emp_e = 1 - (0.5 * MP_e) \quad (6)$$

Onde MC_e e MP são algumas das variáveis de decisão a serem determinadas.

A prática da manutenção preventiva possui uma relação causal negativa sob a taxa de falha do sistema. À medida que o equipamento é substituído preventivamente uma possível falha é evitada, mantendo o equipamento no estado de funcionamento, reduzindo o percentual da taxa de falha. O incremento do percentual de substituição preventiva irá reduzir a variável Emp_e , descrito na equação (7), que por sua vez reduzirá a taxa de falha T_{fe} , demonstrado na equação (14).

$$T_{fe} = \lambda_e * Emp_e \quad (7)$$

Sendo λ_e a taxa de falha inicial de cada elo.

Com a proposta da coordenação conjunta, ilustradas na Figura , a influência da disponibilidade de SP em estoque sob a capacidade de reparo também passa a ser considerada, pois, se o nível de estoque de SP agregado for menor que a demanda exigida pelo sistema de manutenção, a capacidade de reparo do sistema será comprometida, reduzindo a disponibilidade. Dessa forma, pedidos de emergência de SP serão realizados para manter a capacidade de reparo contínua.

Há dois custos a serem considerados: O custo da manutenção preventiva (Cmp_e), que corresponde ao custo por parada da quantidade de equipamentos em substituição preventiva (equação 8) e o custo da manutenção corretiva (Cmc_e) que corresponde ao somatório do custo necessário para custear as equipes de manutenção responsáveis pelos reparos e o custo de parada associado a quantidade de equipamentos em falha (equação 9).

$$Cmp_e = MP_e * E_{qe} * Cp_e \quad (8)$$

$$Cmc_e = 2 * MC_e + (T_{ret} * Eqf * Cp_e) \quad (9)$$

Onde Cp_e representa o custo associado ao tempo em que o equipamento permanece em inatividade (custo de parada), descrito na equação (10), e E_{qe} e Eqf correspondem à quantidade de equipamentos no elo e quantidade de equipamento em falha, respectivamente.

$$Cp_e = 1,25 * CE_e \quad (10)$$

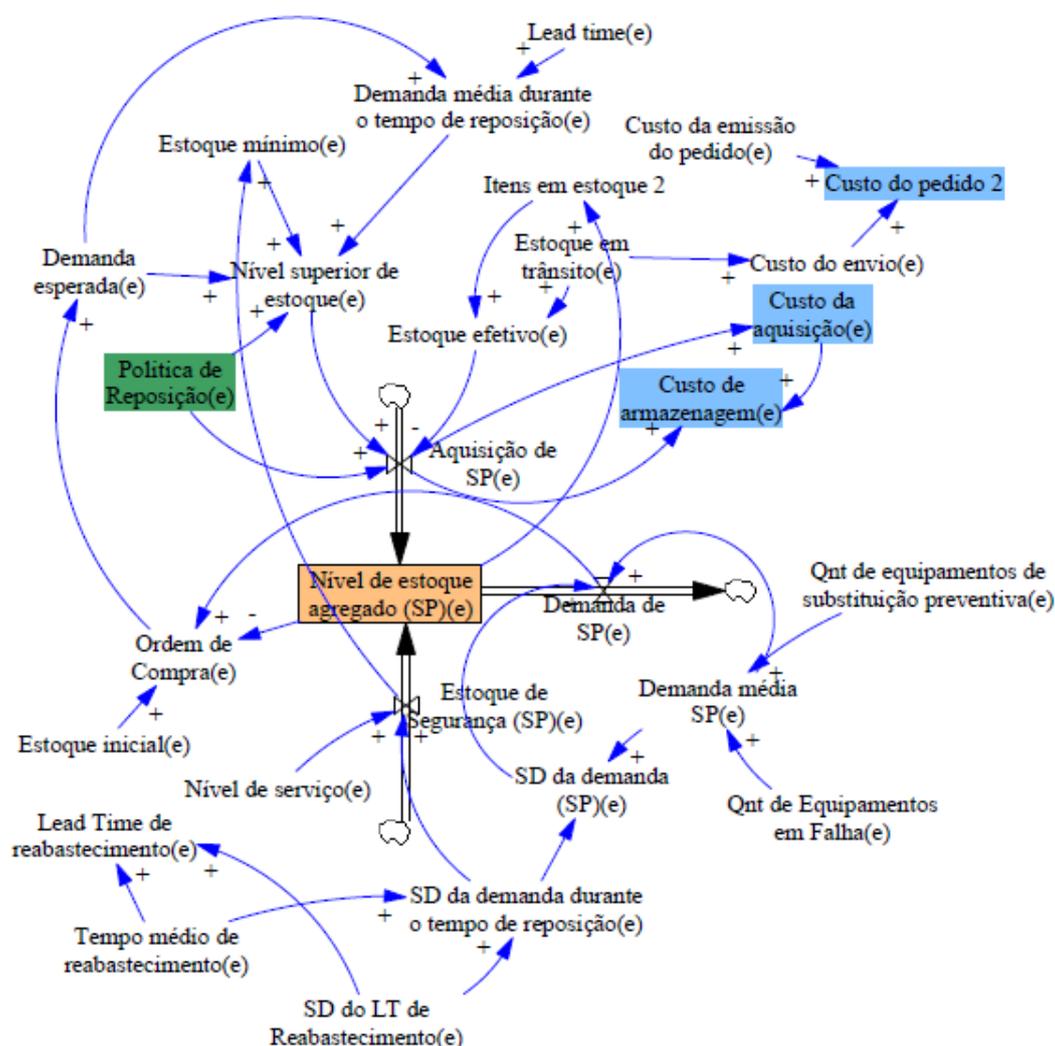
Sendo CE_e o custo unitário de estoque. O custo total de manutenção é dado pelo somatório dos custos das ações de manutenção corretiva e manutenção preventiva. As equações diferenciais acima apresentadas, descrevem as interações existentes entre os elementos que

compõe o sistema de gerenciamento da manutenção, possibilitando a visualização das relações causais de cada elemento sobre outro. Além disso, a coordenação conjunta é introduzida por meio da proposição da influência do gerenciamento de SP sob taxa de reparo, interligando o módulo 1 ao módulo 2 que será representado a seguir.

4.2.1.2 Gerenciamento de Spare Parts – Módulo 2

A estrutura necessária para o gerenciamento de SP em cada elo, incluindo o reabastecimento das peças e o envio para oficina de manutenção, onde serão desenvolvidas as atividades de manutenção, exploradas no módulo anterior, é ilustrada na Figura .

Figura 8- CLD gerenciamento de Spare Parts



Fonte: O autor (2020)

No diagrama, o elo possui uma unidade responsável por gerenciar o estoque de SP e fornece-las ao sistema quando preciso, tornando-se necessário manter o nível de estoque de

forma planejada, considerando a demanda da oficina de manutenção; tempo de reabastecimento no sistema; tempo de reabastecimento do fornecedor de *SP*; quantidade de ordem de compra, entre outras variáveis que serão descritas.

O nível de estoque agregado de *SP* (ES_{e_t}) é alimentado pelo fluxo da quantidade de peças adquiridas do fornecedor (OT_{e_t}) e pelo estoque de segurança ($ESsp_e$) estabelecido pelo perfil da demanda por *SP* no sistema de manutenção e o nível de serviço que a empresa deseja manter. Simultaneamente, a demanda por *SP* necessária para realização das substituições provenientes de falha ou de forma preventiva, com um desvio padrão variável influenciado pelo tempo médio de reabastecimento de peças na oficina, puxa do estoque a quantidade necessária para realização das mesmas, como descrito na equação (11), movimentando assim o nível de estoque agregado.

$$ES_{e_t} = OT_{e_t} + ESsp_e - Dsp_{e_t} \quad (11)$$

Onde, o valor inicial é dado por:

$$ES_{e_{t=0}} = E_e \quad (12)$$

A demanda de *SP*, é representada por uma distribuição normal com média e desvio padrão baseados no resultado da quantidade equipamentos a serem reparados e a quantidade de equipamentos a serem impostos à substituição preventiva, como descritos nas equações (13) e (14).

$$Dsp_{e_t} = Normal(Dm_{spe_t}, \sigma_{Dsp_{e_t}}) \quad (13)$$

Onde:

$$Dm_{spe_t} = Eqmp_e + Eqf_{e_t} \quad (14)$$

A quantidade de equipamentos em falha a serem reparados, obtida através da equação (15), será o resultado do produto entre a quantidade de equipamentos em cada elo (E_{qe}) e o percentual de equipamentos em falha (Fu_{e_t}) ao longo do período, obtido a partir do diagrama de transição exposto na Diagrama . Os equipamentos a serem inspecionados e submetidos à substituição preventiva são o resultado do produto entre o percentual de manutenção preventiva (MP_e) a ser definido na estratégia de manutenção e a quantidade de equipamentos da planta, equação (16).

$$Eqf_{e_t} = E_{qe} * Fu_{e_t} \quad (15)$$

$$Eqmp_e = E_{qe} * MP_e \quad (16)$$

$$\sigma_{Dsp_{e_t}} = 0.05 * Dm_{spe_t} \quad (17)$$

O estoque de segurança de *SP* ($ES_{sp_{e_t}}$), corresponde à quantidade necessária em estoque para assegurar o atendimento da demanda durante o tempo de reabastecimento variável, considerando a incerteza da demanda e da oferta (refletida através do desvio padrão da demanda durante o tempo de reposição) e o atendimento desejado, por meio da normal inversa (F^{-1}), do nível de serviço, equação (18) e desvio obtido a partir da equação (19), baseado nos modelos propostos por Chopra e Meindl, (2013):

$$ES_{sp_{e_t}} = F^{-1}(NS_{spe}) * SD_{r_{e_t}} \quad (18)$$

$$SD_{r_{e_t}} = \sqrt{TP_{r_{spe}} * \sigma_{D_{spe_t}}^2 + Dm_{spe_t}^2 + SD_{r_{spe}}^2} \quad (19)$$

Onde, o tempo médio de reabastecimento de *SP* no sistema de manutenção ($TP_{r_{spe}}$) e seu desvio padrão ($SD_{r_{spe}}$) são valores fixos pré-estabelecidos, enquanto que o *lead time* de reabastecimento é variável, seguindo uma distribuição normal, equação (20).

$$LTr_e = Normal(TP_{r_{spe}}, SD_{r_{spe}}) \quad (20)$$

No sistema de reabastecimento de *SP*, a questão trivial é a escolha da política de controle de estoque mais adequada, pois, para alimentação do estoque agregado, torna-se necessário a determinação da periodicidade da ordem de compra e o tamanho do lote a ser adquirido, de modo a minimizar o número de *stockout* de *SP*, que conseqüentemente leva à pedidos de emergências, com custos elevados.

Os pedidos de emergência têm o papel de suprir as lacunas existentes entre a necessidade da demanda e a disponibilidade do estoque, quando a oficina requisita uma quantidade acima do que o estoque pode atender, um pedido de emergência é acionado para que o sistema de reparo não seja interrompido, dessa forma, a quantidade de emergência a ser pedida é dada pela diferença entre a quantidade em estoque e a quantidade requisitada pela demanda, como demonstrada na equação (21):

$$Q_{det_e} = \begin{cases} (D_{sp_{e_t}} - ES_{e_t}), & \text{se } D_{sp_{e_t}} > ES_{e_t} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (21)$$

Entretanto, pedidos de emergência elevam os custos totais, pois, possuem custos de envio (C_{TEe}) e aquisição (C_{aqEe}) mais caros, em detrimento da urgência o do menor tempo decorrido entre o envio do pedido e a entrega. Dessa forma, os custos envolvidos nos pedidos de emergência são estabelecidos nas equações (22) e (23) e agregados na equação (24), definindo o custo total do pedido de emergência.

$$CPE_e = 5000, \text{ se } Qtdet_e > 0 \quad (22)$$

0, caso contrário

$$CAE_e = Qtdet_e * C_{aqEe} \quad (23)$$

$$CTE_e = CPE_e + CAE_e \quad (24)$$

Onde, CPE_e e CAE_e representam os custos de pedir e aquisição dos pedidos de emergência, e CTE_e o custo total para realização do pedido de emergência. Além disso, a política adotada possui uma influência positiva no nível superior de estoque, uma vez que o estabelecimento da política adotada irá definir qual nível de estoque deve ser considerado, visando o atendimento da demanda de SP no elo.

O nível superior de estoque também é dependente da demanda esperada no sistema de reposição (proveniente da quantidade de SP requisitada pelo elo); do estoque mínimo desejado para assegurar o fornecimento e da demanda média esperada durante o tempo de reposição.

A quantidade adquirida de SP será influenciada também pela quantidade de peças existentes no sistema, ou seja, o estoque físico armazenado no elo. Quanto maior a quantidade de peças em estoque, menor a quantidade necessária a ser enviada pelo fornecedor, dessa forma, uma relação negativa é estabelecida entre o estoque efetivo e a quantidade a ser adquirida.

Com base nisto, inspirado no trabalho Barlas e Özevin (2004) três políticas de controle de estoque foram implementadas, para efeitos de comparações futuras, sendo elas demonstradas abaixo:

a) *Review Period, Order Up to Level (R,S)*

A demanda média de SP na oficina de manutenção será o input para demanda esperada na política de reabastecimento no fornecedor que irá processar o pedido, equação (25). O nível superior de estoque, obtido a partir da equação (26), é definido para determinar uma quantidade necessária para suprir a demanda requisitada até o próximo período, composto pelo somatório entre o estoque mínimo na política de reabastecimento periódica ($Emin_{et}$); a demanda média de SP durante o período de reposição e a demanda média durante o *lead time* do fornecedor, como visto a seguir:

$$Dpr_{et} = Dm_{spe} \quad (25)$$

$$S_{et} = Emin_{et} + (Dpr_{et} * R_e) + (Dpr_{et} * LTpr_e) \quad (26)$$

Onde,

$$Emin_{e_t} = ESsp_{e_t} \quad (27)$$

Para a política de revisão periódica, a cada R períodos, o sistema é alimentado de acordo com uma função que irá condicionar a quantidade necessária. Ou seja, ao atingir o período determinado (R), uma quantidade de compra a ser enviada ao elo (OT_{e_t}) referente à diferença entre o nível superior de estoque e o estoque efetivo, que corresponde a quantidade de SP em estoque no momento em que o mesmo é avaliado, alimenta o estoque, como visto nas equações a seguir:

$$Eeft_{e_t} = ES_{e_t} \quad (28)$$

$$OT_{e_t} = (S_{e_t} - Eeft_{e_t}), \quad \text{se } Tp_{e_t} = R_e \quad (29)$$

0, caso contrário

Onde, Tp_e corresponde ao tempo decorrido ao longo da simulação, sendo contabilizado através de um contador, equação (30).

$$Tp_{e_t} = t + 1 \quad (30)$$

Dessa forma, o sistema é alimentado a cada período e à medida que a demanda surge o fluxo negativo retira do estoque a quantidade requisitada, formando assim um sistema dinâmico com fluxos de entrada e saída. Note que o período de reposição é fixo, sendo essa a variável de decisão central na política de controle de estoque periódica, visto que essa decisão determinará quando o estoque será repostado e a quantidade de peças que serão adquiridas.

Essas decisões refletem nos custos de gerenciamento de SP , discutidos no Capítulo 2. A identificação e quantificação desses custos são triviais para análise e determinação da escolha da política de reabastecimento a ser adotada, sendo expressos da seguinte forma:

$$CP_{e_t} = C_{Te_t} + C_{empe_t} \quad (31)$$

O custo do pedido, representado na equação (31) é composto pela soma entre o custo necessário para emissão do pedido, imposto toda vez que um pedido for realizado (Equação 32) e o custo do envio do pedido do fornecedor para a empresa, que está condicionado à capacidade de envio do transporte (Equação 33).

$$C_{empe_t} = 0, \quad \text{Se } OT_{et} \leq 0$$

$$500, \quad \text{caso contrário.} \quad (32)$$

$$C_{Te_t} = 3000, \quad \text{Se } 5000 \geq OT_{e_t} \leq 0$$

$$\left[3000 * \frac{OT_{e_t}}{C_{ce}} \right], \quad \text{caso contrário.} \quad (33)$$

O custo de aquisição corresponde ao valor investido nas peças adquiridas para o estoque, enquanto que o custo de estocagem está relacionado ao valor despendido para manter a peça em estoque. Expressos nas equações (34) e (35):

$$CA_e = OT_{e_t} * C_{aqe} \quad (34)$$

$$CE_e = ES_{e_t} * C_{Ee} \quad (35)$$

Onde os custos unitários de estoque (C_{Ee}) e de aquisição são fixos (C_{aqe}).

b) *Order Point, Order Quantity* (s, Q)

Na política de reposição contínua com lote de compra fixo (s, Q), quando o estoque atinge o ponto de ressuprimento, um novo pedido é acionado, com uma quantidade de compra pré-estabelecida. Sendo expressa matematicamente como:

$$OT_{e_t} = Q_e, \quad \text{se } Eeft_{e_t} \leq s_e$$

$$0, \quad \text{caso contrário} \quad (36)$$

Onde, $Eeft_{e_t}$ corresponde ao estoque efetivo expresso na equação (28) e s_e o ponto de ressuprimento, relacionado à demanda média de SP necessária para realização das atividades de manutenção (Dm_{spe_t}), o estoque de segurança ($ESspe_t$) e a demanda média durante o tempo de reposição, calculados a partir das equações (14) e (18) respectivamente, vistas na política anterior, calculado da seguinte forma:

$$s_{e_t} = (Dm_{spe_t} * LTpr_e) + Dm_{spe_t} + ESspe_t \quad (37)$$

Onde, o *lead time* do fornecedor ($LTpr_e$) e a quantidade de ordem Q_e a ser enviada ao sistema, são inicialmente definidos como constante. Com essa definição, o ponto de ressuprimento se adapta as variações da demanda ao longo do tempo, sendo de extrema importância para redução da incerteza no gerenciamento de SP .

As implicações em se ter uma quantidade de envio ao sistema Q_e fixa, estão relacionadas ao aumento da probabilidade de *stockout* de SP para realização de atividades de manutenção, elevando a necessidade de pedidos de emergência. Uma vez que uma quantidade fixa é enviada, se houver uma demanda acima desse nível, haverá falta em estoque, dessa forma, a avaliação da quantidade é essencial para o controle de estoque na política em questão. Em relação aos custos, os mesmos são expressos matematicamente de acordo com a política anterior.

c) *Order Point, Order Up to Level* (s, S)

Para a política de reposição contínua (s, S), o estoque é alimentado continuamente sempre que o ponto de reposição for atingido, podendo ser expresso matematicamente a seguir:

$$OT_{e_t} = S_{e_t} - Eeft_{e_t}, \quad \text{se } Eeft_{e_t} \leq s_e$$

$$0, \quad \text{caso contrário} \quad (38)$$

Onde $Eeft_{e_t}$ corresponde ao estoque efetivo, calculado igualmente as políticas anteriores, s_e o ponto de ressuprimento que se adapta as variações da demanda como visto na equação (37) e S_{e_t} o nível superior de estoque, expresso a seguir na equação (39):

$$S_{e_t} = s_e + Q_e \quad (39)$$

Sendo Q_e uma constante determinada inicialmente. A política (s, S) difere da política (s, Q) porque OT_{e_t} é variável e difere da política de reposição periódica (R, S) porque é enviada continuamente. Dessa forma, a política pode apresentar menores pontos de *stockout* de SP , uma vez que o sistema é alimentado continuamente e com uma quantidade que se adapta às necessidades da demanda.

Entretanto, os custos se elevam e a agregação do pedido é comprometida, pois a frequência e o número de pedidos são maiores. Os efeitos de cada política sob o gerenciamento de estoque: número de pedidos; número de *stockout* de SP ; atendimento da demanda e custos serão avaliados no Capítulo 5, onde será mensurado cada cenário gerado entre a coordenação conjunta.

Os módulos expostos acima podem ser aplicados para todos os elos, com a mesma estruturação estabelecida, modificando apenas os parâmetros inicialmente declarados para cada elo. Contudo, além do gerenciamento da manutenção e do gerenciamento de SP , outro ponto a ser avaliado corresponde ao sistema de produção do elo e como a coordenação conjunta impacta no sistema, apresentado no módulo a seguir.

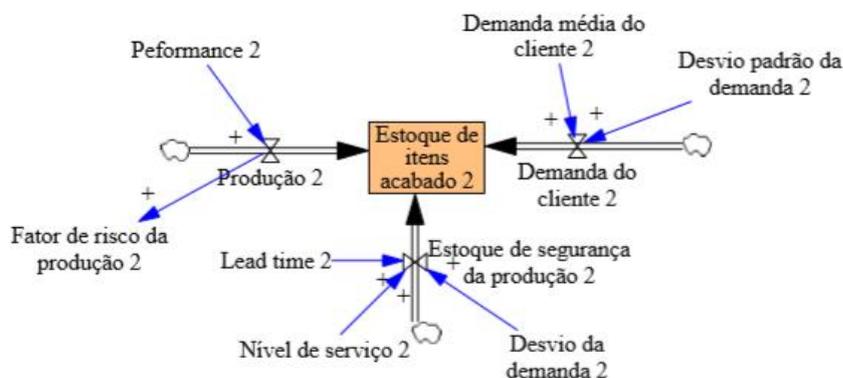
4.2.1.3 Sistema de Produção – Módulo 3

Assim como no gerenciamento de SP , a demanda é atendida a partir do estoque de produtos acabados do elo. Em cada elo, o comportamento do sistema se apresentará diferentemente. A demanda do elo 2 é configurada por meio de uma distribuição normal, com desvio padrão (SD_{D_2}) e média (D_2) estabelecido inicialmente, como demonstrado na equação (40), que puxa do estoque, a quantidade necessária para atendimento do pedido.

$$Dc_{2_t} = Normal(D_2, SD_{D_2}) \quad (40)$$

Esse estoque é alimentado através do sistema de produção, ilustrado na Figura , que é impactado diretamente pelo sistema de manutenção. Dessa forma, a abordagem conjunta entre a estratégia de manutenção e a política de estoque de *SP* tem um impacto direto no nível de estoque de produto acabado disponível do elo, refletindo em toda cadeia.

Figura 9- SD sistema de produção elo 2



Fonte: O autor (2020)

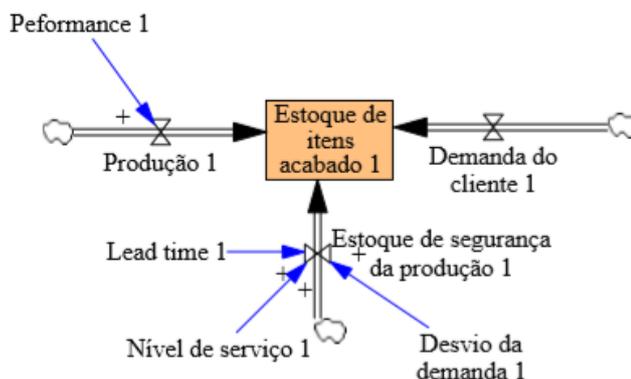
Para assegurar a performance do seu sistema de produção, o elo 1, ilustrado na Figura , deverá manter um percentual de disponibilidade que satisfaça a necessidade do elo 2, uma vez que a demanda do elo 1 será conforme a quantidade produzida no elo 2, juntamente com um fator de risco para atender à produção, como descrito nas equações (41) e (42):

$$Dc_{1t} = Prod_{2t} + fp_{2 \rightarrow 1} \tag{41}$$

Onde,

$$fp_{2 \rightarrow 1} = 0.1 * Prod_{2t} \tag{42}$$

Figura 10- SD sistema de produção elo 1



Fonte: O autor (2020)

O estoque (ESP_{e_t}) é alimentado pelo sistema de produção ($Prod_{e_t}$) estabelecendo uma relação causal positiva, juntamente com o estoque de segurança e reduzido pela demanda imposta ao elo (Dc_{e_t}), como descrito na equação (43). A produtividade do sistema ($Prod_{e_t}$), mensurado por meio da performance (P_{e_t}), possui uma capacidade produtiva (C_e) estabelecida

inicialmente, e é afetada pela disponibilidade do sistema, ao longo do período, como descrito nas equações (43) e (44):

$$ESP_{e_t} = Prod_{e_t} - Dc_{e_t} + EsProd_e \quad (43)$$

$$Prod_{e_t} = P_{e_t} \quad (44)$$

Onde,

$$P_{e_t} = A_{e_t} * (C_e - EsProd_e) \quad (45)$$

$$EsProd_e = NS_{prode} * \sqrt{LT_{prode}} * SD_{D2} \quad (46)$$

O estoque de segurança, equação (46), mantido pela empresa para assegurar a produção, devido às incertezas da demanda, será baseado no nível de serviço; *lead time* no sistema de produção e o desvio da demanda fornecido do elo 2, sendo todos os parâmetros fixos e estabelecidos previamente.

A partir das relações descritas, por meio de expressões matemáticas, torna-se possível a análise do comportamento dinâmico do sistema ao longo do tempo e a agregação do gerenciamento de estoque de *SP* à definição das estratégias de manutenção, estabelecendo uma conexão quantitativa e qualitativa entre os elementos que interferem na performance da cadeia de suprimentos. Cada seta e elementos interligados demonstram como os fatores acima descritos possuem um impacto significativo no outro, dessa forma, no próximo capítulo, uma aplicação numérica será realizada com o objetivo de responder os questionamentos levantados no início do capítulo e quantificar o impacto mencionado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação foi realizada para 1.000 semanas, para cada cenário, visando garantir um maior grau de confiança na convergência dos resultados da simulação. A coordenação conjunta proposta pela pesquisa possibilitou a combinação das estratégias de manutenção às políticas de estoques potenciais a serem adotadas, resultando em 4.344 cenários simulados, modificando a variável de decisão de cada política de reabastecimento de estoque e a taxa de falha do elo subjacente, com o objetivo de responder as hipóteses e questionamentos levantados na pesquisa.

Utilizando a notação descrita no capítulo 4, a Tabela 2 demonstra *inputs* utilizados para cada elo.

Tabela 2- *Inputs* para aplicação numérica do modelo proposto

Elo 1		Elo 2	
Parâmetro	Input	Parâmetro	Input
λ_1	0.1	λ_2	0.15
μ_{10}	0.35	μ_{20}	0.40
E_1	20000	E_2	25000
C_1	10000	C_2	9000
E_{q1}	10000	E_{q2}	12000
TP_{rsp1}	2	TP_{rsp2}	1
SD_{rsp1}	0.5	SD_{rsp2}	0.5
NS_{sp1}	1.65	NS_{sp2}	2.326
LT_{prod1}	1	LT_{prod2}	1
NS_{prod1}	1.65	NS_{prod2}	2.326
C_{aq1}	80	C_{aq2}	60
$C_{aqE1=}$	90	$C_{aqE2=}$	70
CE_1	12	CE_2	9
C_{T1}	3000	C_{T2}	2500
C_{TE1}	6000	C_{TE2}	5000
C_{c1}	5000	C_{c2}	5000
C_{emp1}	500	C_{emp2}	500
		D_2	8000
		SD_{p2}	150

Fonte: O autor, 2020.

Cada cenário foi avaliado conforme: a disponibilidade resultante; o número de pedidos de *SP* realizados; o número de *stockout* de *SP* no sistema de manutenção; o número de ocorrências de *stockout* no sistema de produção e o custo total necessário, incluindo o custo de manutenção, custo do pedido, manutenção de estoque, o custo de pedidos de emergência e aquisição de *SP*.

5.1 Review Period, Order Up to Level (R, S)

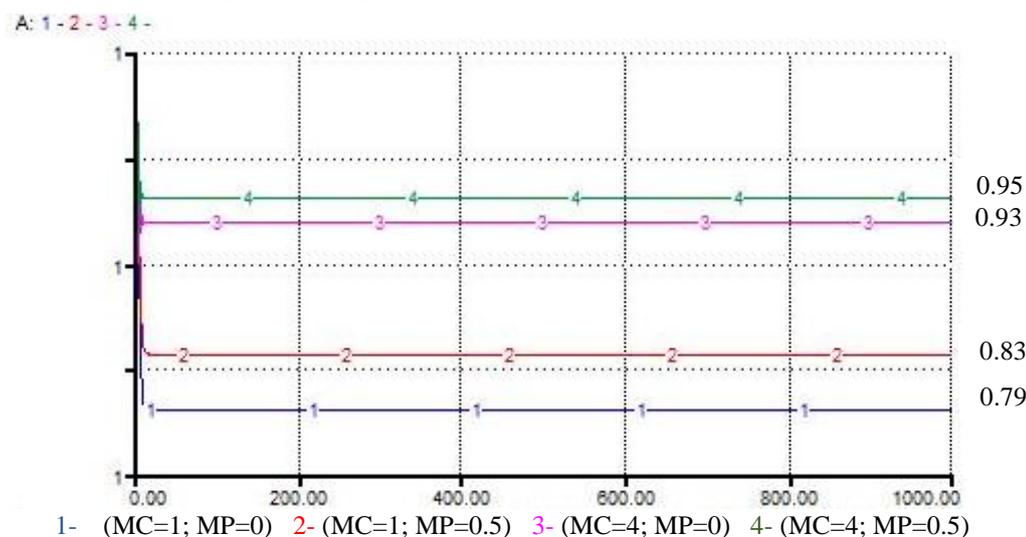
Os cenários foram estabelecidos através da seguinte estrutura: (MC1; MP1; R1; MC2; MP2; R2), onde, *MC*, *MP* e *R* são as variáveis de decisões a serem determinadas, correspondendo a quantidade de equipes de manutenção corretiva, percentual de substituição preventiva e período de reposição, respectivamente. Essas variáveis podem ser alteradas pelo decisor, formando diversas combinações, gerando múltiplos cenários.

Para a política de revisão periódica, implementada a partir do modelo proposto no tópico 4.2.1.2, o período de reposição do sistema (*R*) pode assumir quatro valores distintos, de 1 à 4 semanas, a variável referente à manutenção corretiva (*MC*) pode variar de 1 à 4 equipes de manutenção e a variável correspondente à substituição preventiva (*MP*) pode assumir dois valores, 0 e 50%, em cada elo. De forma combinada, essas variáveis geram 2.040 cenários, considerando duas possíveis taxa de falha no elo 2. A seguir os principais pontos comportamentais serão discutidos:

1.6.2 Impacto do gerenciamento da manutenção

A determinação do número de equipes empregadas às atividades de manutenção irão impactar diretamente na disponibilidade do sistema e nos custos totais associados a cada cenário, como observado na Figura , onde, a cada equipe incrementada, um ganho percentual significativo é encontrado.

Figura 11- Disponibilidade do sistema Elo 1, Política (R,S)



Fonte: O autor (2020)

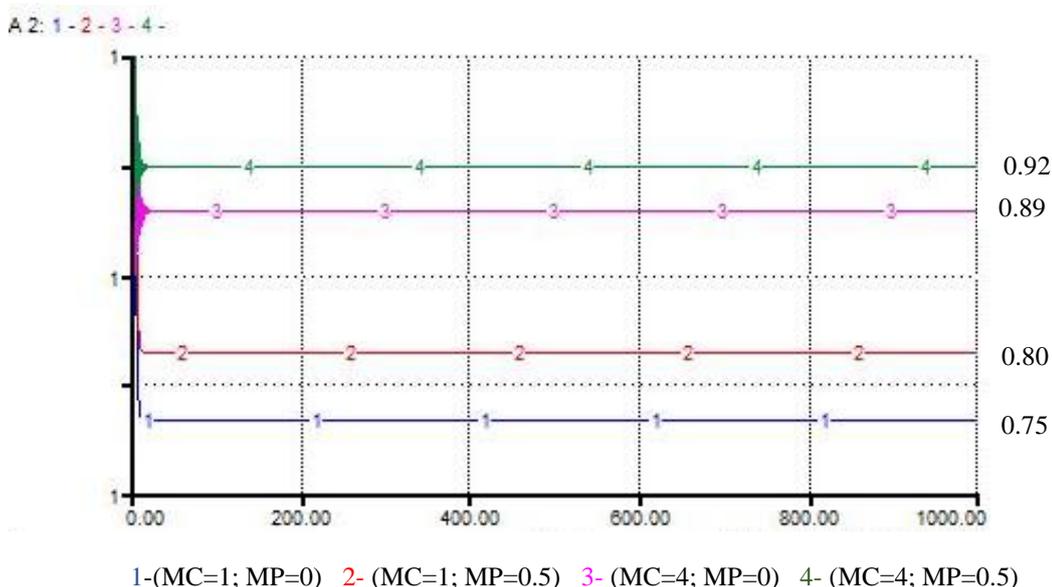
Essa relação ocorre devido ao aumento de mão-de-obra operacional em prontidão para atender o sistema de manutenção sempre que necessário, ampliando a capacidade de reparo,

agilizando os processos e tornando os equipamentos aptos para a função, reestabelecendo o funcionamento do sistema. Conseqüentemente, os custos de manutenção se elevam a cada equipe adicional incrementada.

Ao implementar a manutenção preventiva, a empresa se antecipa e previne possíveis falhas e interrupções. Dessa forma, observou-se que em todos os cenários simulados, a substituição preventiva dos componentes eleva a disponibilidade do sistema. Observe que na Figura , para apenas uma equipe de manutenção corretiva em atividade e nenhum percentual de substituição preventiva (MC=1; MP=0), a disponibilidade atinge 79% quando se estabiliza, enquanto que ao incluir a manutenção preventiva e substituir 50% dos equipamentos, esse grau de disponibilidade alcança 83%, resultando em maior produtividade e atendimento da demanda, fortalecendo toda a cadeia.

O maior nível de disponibilidade atingindo no elo 1 é de 95% quando se tem quatro equipes de manutenção e 50% de substituição preventiva dos componentes (MC=4; MP=0.5). O mesmo comportamento é encontrado no elo 2, ilustrado na Figura , onde o maior grau de disponibilidade atingido no sistema é de 92%, uma vez que a taxa de falha do elo 2 ($\lambda=0,15$) é maior que a do elo 1 ($\lambda=0,10$).

Figura 12- Disponibilidade do sistema Elo 2 ($\lambda=0,15$), Política (R, S)



Fonte: O autor (2020)

Entretanto, as substituições exigem maior número de *SP* em estoque, resultando em pedidos maiores e por tanto, custos elevados de pedido, estocagem e aquisição. Dessa maneira, quanto maior o grau de disponibilidade do sistema desejado, maior o custo despendido pela empresa, condizendo com a discussão existente há anos na literatura de que a gestão da manutenção desempenha um papel estratégico dentro da organização e não deve ser encarado

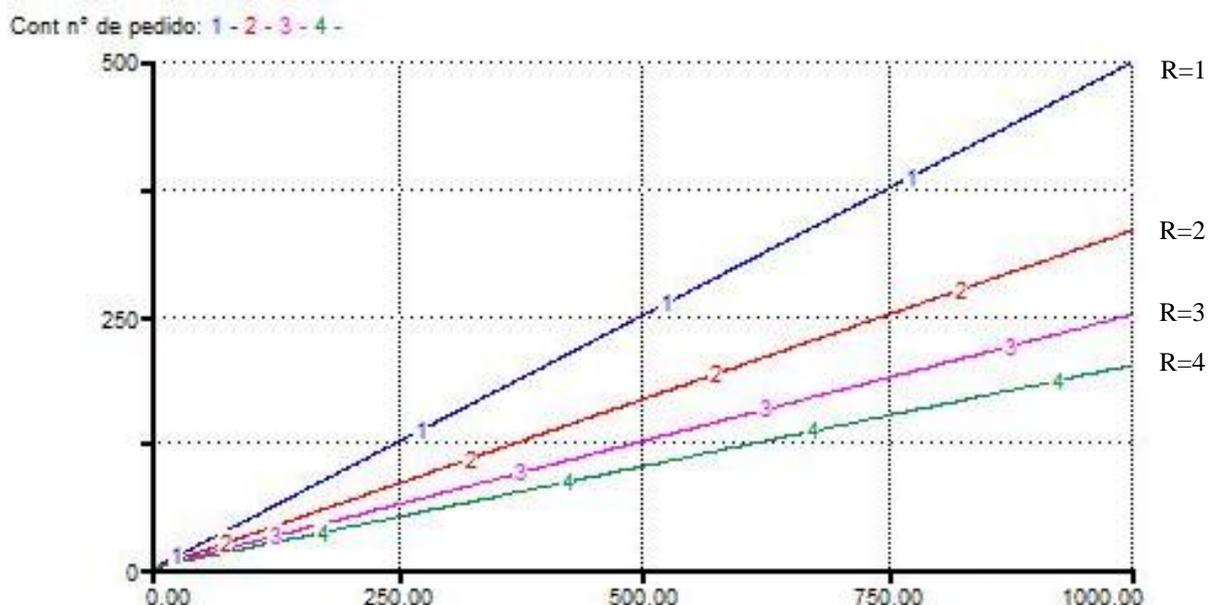
como custo, mais sim como um investimento. Por meio de uma boa gestão da manutenção, os gestores podem prever e controlar as falhas e conseqüentemente elevar os indicadores de desempenho e lucratividade, pois, o setor de manutenção possui uma influência direta na produtividade e melhoria dos resultados operacionais.

O mesmo comportamento se manterá para demais políticas abordadas, visto que a configuração das equipes e recursos operacionais serão os mesmos, o que irá diferenciar as políticas será a forma de como o gerenciamento de *SP* será conduzido. Para isso, a quantidade de peças a serem pedidas na política selecionada e a quantidade de pedidos de emergência em cada política, caso seja necessário, de modo que a taxa de reparo não sofra interferência e a regularidade e estabilidade do sistema seja mantido, serão alvos de estudo a seguir para que o desempenho das atividades de manutenção ocorra como planejado.

1.6.3 Impacto do gerenciamento de estoque de *Spare Parts*

A definição do período de reposição (R) é a questão trivial discutida na política (R,S), a quantificação do impacto e a influência sobre os demais elementos no funcionamento do elo, são pontos a serem abordados abaixo, tomando como exemplo o cenário ($MC=2$; $MP=0.5$) e uma taxa de falha de 10% no elo 1:

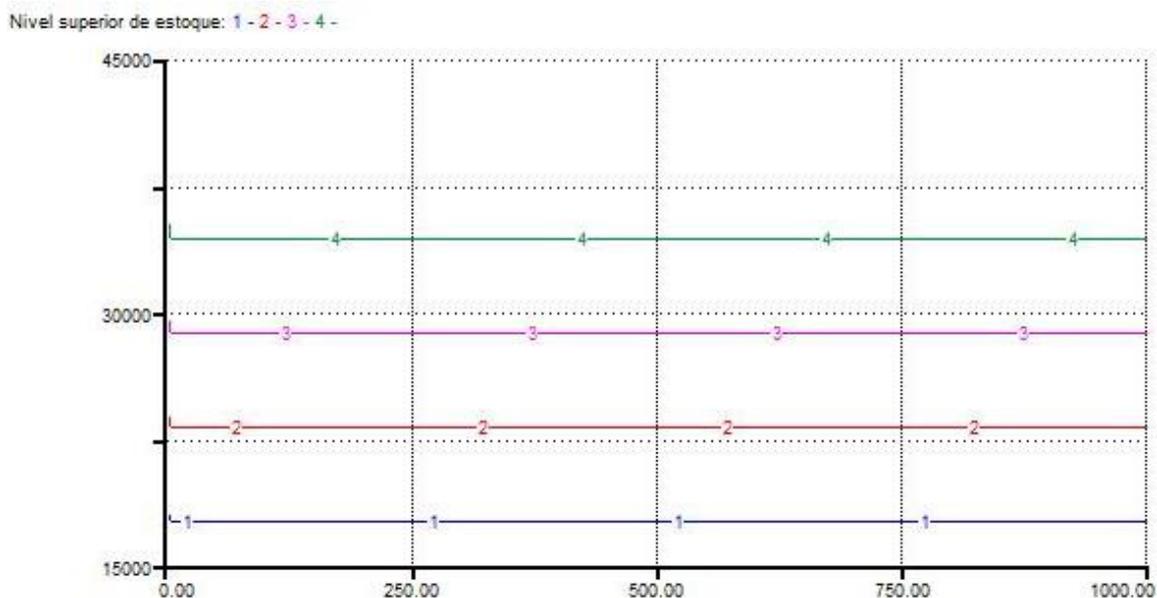
Figura 13- Número de pedidos por períodos (R) distintos (R,S), em semanas.



Fonte: O autor (2020)

Períodos de reposição (R) mais longos resultam em menor número de pedidos ao longo do período de simulação, em decorrência da redução da frequência de pedidos, como observado na Figura . Por exemplo: para $R=1$, o número de pedidos varia na faixa de 480-500 pedidos nas mil semanas simuladas, enquanto que para $R=4$ esse número cai para média de 200 pedidos.

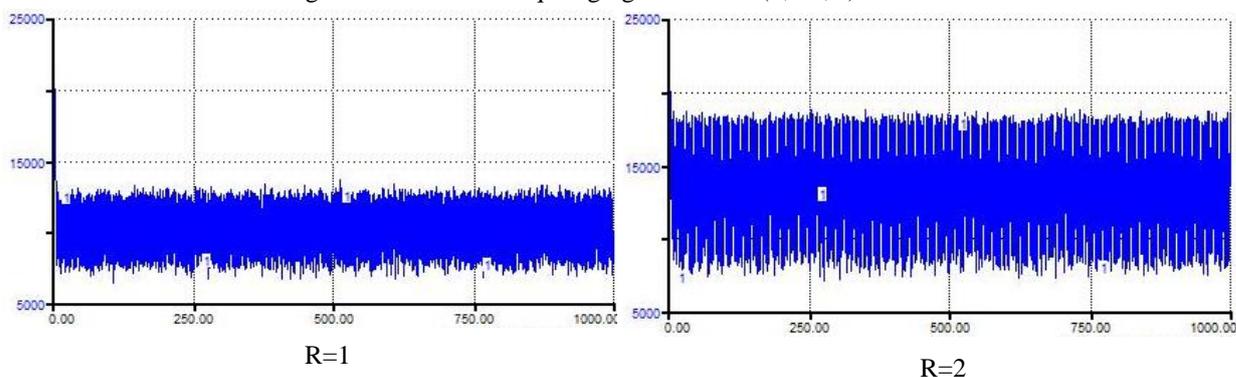
Figura 14- Nível superior de estoque para cenário (2;0.5; R) no elo 1

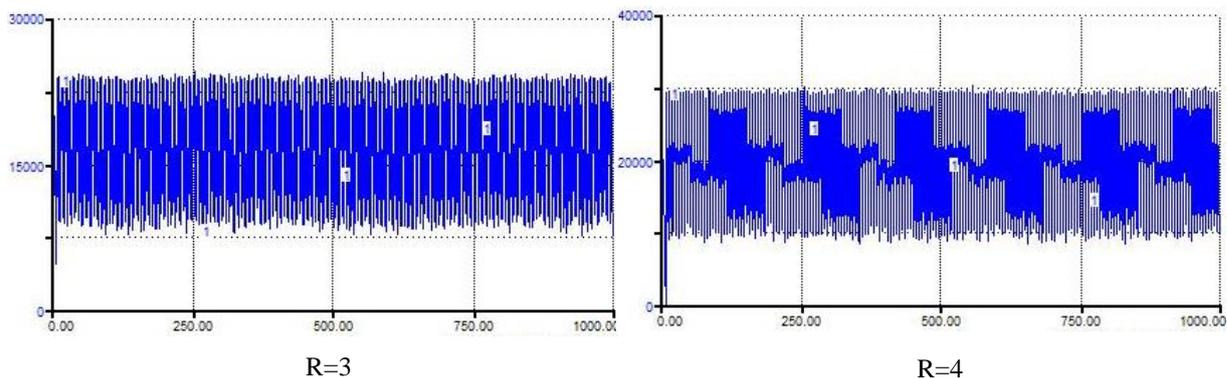


Fonte: O autor (2020)

Essa redução implicará na necessidade de maiores quantidades de peças a serem adquiridas para suprir o estoque de SP até a chegada do próximo pedido, devido ao aumento do ponto de ressuprimento, interligado à demanda média esperada durante o tempo de reposição (considerando o *lead time* do fornecedor e do tempo de realimentação no elo), refletindo em maiores níveis superior de estoque ao longo do período de simulação, como demonstrado na Figura .Conseqüentemente, os níveis de estoque agregado para cada período se comportarão de maneiras distintas, dispostas nas figuras abaixo:

Figura 2- Nível de estoque agregado cenário(2;0.5, R) no elo 1

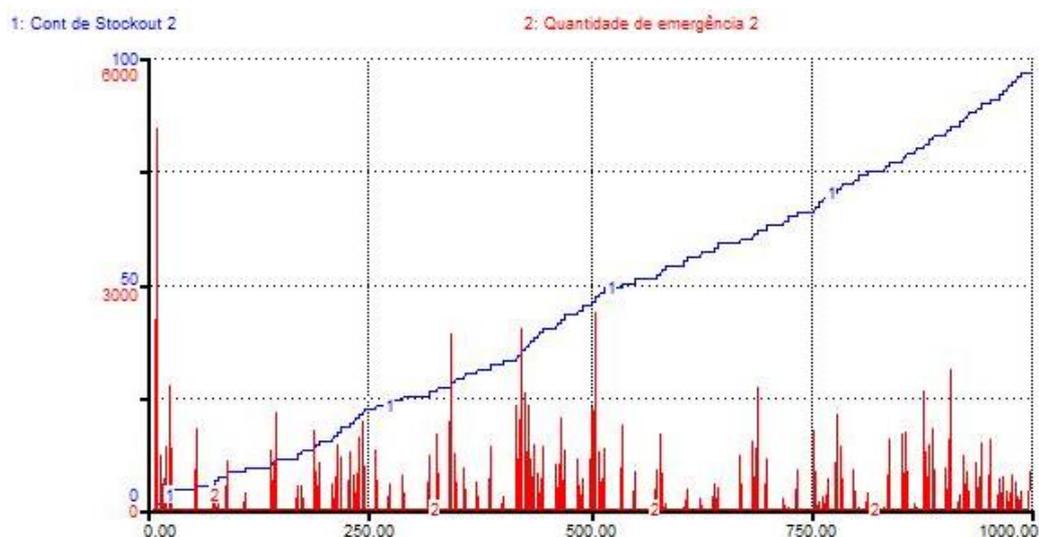




Fonte: O autor (2020)

No conjunto de cenários simulados, o elo 1 apresentou cerca de 240 cenários com pontos de *Stockout de SP*. Para períodos de revisão menores como R=1 e R=2, apenas 4 cenários foram identificados, com cerca de 1 ou 2 semanas sem atendimento da demanda. Para R=3 e R=4, o número de cenários se elevam para 112 e 120 respectivamente.

Figura 16- Número de *Stockout SP* cenário (2;0;2;3;0.5;4) elo 2



Fonte: O autor (2020)

No elo 2, para os inputs fornecidos ao modelo, todos os cenários apresentaram a necessidade de pedidos de emergência, variando entre 85 – 498 pontos de *stockout de SP*, em cada cenário, como o exemplo ilustrado na Figura para o cenário (2;0;2;3;0.5;4), em que a quantidade de peças adquiridas ao longo da simulação varia de acordo com a necessidade da demanda da oficina de manutenção

Períodos de revisão maiores implicam em maiores níveis de estoque para compensar o tempo de reposição. Entretanto o estoque pode ser o aliado do gestor quando bem dimensionado e utilizado, pois assegura a produção e mantém o desempenho da cadeia. A seguir, o impacto

da disponibilidade sobre o sistema de produção será explorado para que as relações entre eles sejam melhor visualizadas.

1.6.4 Gestão da manutenção x Sistema de produção

Observando inicialmente o comportamento do elo 2, que atende uma demanda com distribuição normal, a Tabela 3 descreve a relação entre os recursos planejados para as atividades de manutenção e o número de *Stockout* de produção gerado (semana em que não há atendimento completo da demanda).

Tabela 3- *Stockout* de produção elo 2 ($\lambda=0,15$)

Cenário	A	Atendimento	<i>Stockout</i> produção (semanas por cenário)
(1;0;R)	0,75	Não atende	1000
(2;0;R)	0,84	Não atende	1000
(3;0;R)	0,88	Não atende	1000
(4;0;R)	0,89	Atendimento Parcial	56-148
(1;0.5;R)	0,80	Não atende	1000
(2;0.5;R)	0,88	Não atende	1000
(3;0.5;R)	0,91	Atendimento Parcial	24-43
(4;0.5;R)	0,92	Atendimento Parcial	17-28

Fonte: O autor (2020)

Os resultados obtidos possibilitaram a visualização do efeito direto da disponibilidade sobre a produtividade da organização, impactando o nível de serviço prestado ao cliente. comprovando o papel primordial do planejamento das atividades de manutenção quando se deseja ter um sistema orientado à resultados.

A Tabela 3 também fornece o menor índice de disponibilidade que o elo 2 deve possuir, A=89%, pois uma taxa inferior não é capaz de atender a demanda imposta em nenhuma das semanas do período simulado, sendo esse um fator importante para o desdobramento de metas e planejamento do gestor. Para um melhor atendimento, uma taxa de disponibilidade de 92% (Elo 2) apresenta os melhores resultados, com o menor número de *stockout* de produção, atendendo a maior parte dos pedidos completos.

Os resultados também demonstraram que em algumas combinações de cenários entre os elos, o elo 1 não conseguirá atender a demanda empurrada pelo elo 2, como visto na Tabela 4 abaixo:

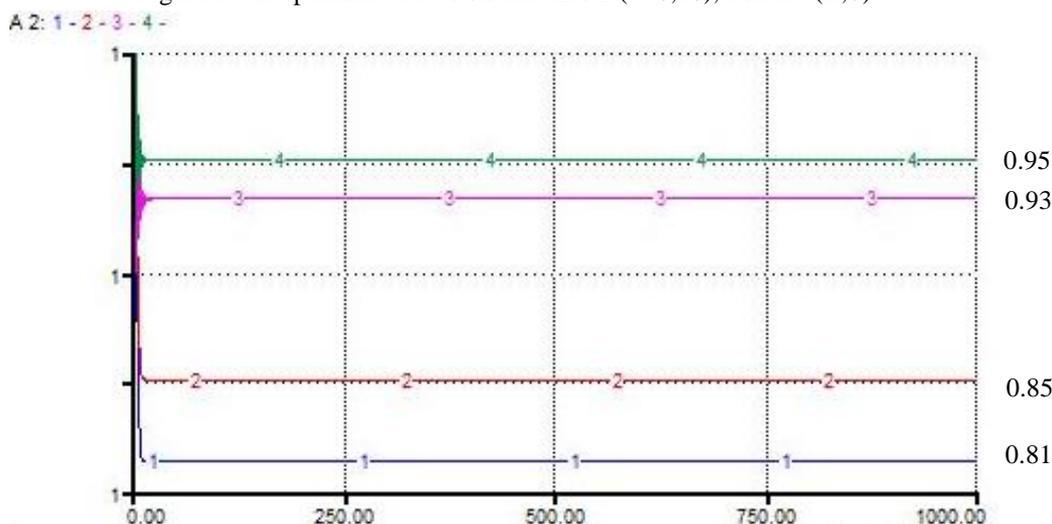
Tabela 4- Stockout de produção elo 1 ($\lambda=0,15$)

		Stockout Produção (Semanas por cenário)
A1	A2	
0,79	0,84	541 semanas
0,79	0,88	988 semanas
0,79	0,89	988 semanas
0,79	0,91	988 semanas
0,79	0,92	988 semanas
0,83	0,89	970 semanas

Fonte: O autor (2020)

Essa análise é de suma importância para avaliação dos cenários potenciais, excluindo os cenários que não atendem aos objetivos. Ao forçar a queda da taxa de falha do elo 2 para ($\lambda=0,10$), a disponibilidade reage positivamente, elevando seus percentuais em até 6% comparando-se a Figura e a Figura .

Figura 17- Disponibilidade do sistema Elo 2 ($\lambda=0,10$), Política (R,S)



Fonte: O autor (2020)

A minimização da taxa de falha reduz o número de equipamentos inoperantes, potencializando a produtividade do sistema. Contudo, ao elevar o grau de disponibilidade do elo subsequente, o elo a montante sofre impactos significativos devido ao aumento da demanda exigida. Quando se reduz a taxa de falha do elo 2 para $\lambda=0,10$, a disponibilidade mínima do sistema cai para 80%, ampliando o conjunto de cenários potenciais, como visto na Tabela 5. Em relação ao elo 1, uma disponibilidade de 79% não atende à demanda em quase todas as combinações com elo 2, eliminando todos os cenários em que se tenha apenas 1 equipe de manutenção, ver Tabela 6.

Tabela 5- *Stockout* de produção elo 2 ($\lambda=0,10$)

Cenário	A	Atendimento	<i>Stockout</i> produção (semanas por cenário)
(1;0;R)	0,75	Não atende	1000
(2;0;R)	0,84	Atendimento Parcial	22-253
(3;0;R)	0,88	Atendimento Parcial	18 - 31
(4;0;R)	0,89	Atendimento Parcial	16 - 22
(1;0.5;R)	0,80	Não atende	1000
(2;0.5;R)	0,88	Atendimento Parcial	22 – 37
(3;0.5;R)	0,91	Atendimento Parcial	14 – 20
(4;0.5;R)	0,92	Atendimento Parcial	12 – 18

Fonte: O autor (2020)

Tabela 6- *Stockout* de produção elo 1, ($\lambda=0,10$)

A1	A2	<i>Stockout</i> Produção (Semanas por cenário)
0,79	0,85	974
0,79	0,89	992
0,79	0,92	992
0,79	0,93	992
0,79	0,94	992
0,79	0,95	992

O autor (2020)

Todos esses levantamentos e observações são importantes para avaliação e definição da melhor política proposta pela coordenação conjunta, considerando não só o custo, mas, todos os fatores que impactam no desempenho da cadeia. Para uma taxa de falha $\lambda=0,15$ no elo 2, 320 cenários são elencados. A Tabela 7 demonstra os sete melhores cenários para a política de revisão periódica quando se considera o custo como objetivo principal, selecionando o Cenário 1 com o menor custo conjunto.

O maior número de pedidos leva a pedidos menores e mais frequentes, minimizando o tempo de ciclo da peça em estoque e conseqüentemente menores custos de aquisição e estocagem, dessa forma, há uma compensação entre os custos, o que ocorre no elo 1, onde os dois melhores cenários apresentam maior número de pedidos e um tempo de revisão menor, aumentando a frequência e rotatividade de estoque.

Tabela 7- Melhores cenários para política (R,s) mín. custo - $\lambda=0,15$

Cenário	MC1	MP1	R1	MC2	MP2	R2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de stockout SP 2	Nº de stockout Prod 2	CT Total (Elo 2)	CT cadeia
1	2	0	1	4	0	4	0,88	487	R\$ 82.239,03	0,89	198	97	72	R\$ 139.628,06	R\$ 221.867,09
2	2	0	1	4	0	3	0,88	487	R\$ 82.545,81	0,89	754	246	101	R\$ 141.744,42	R\$ 224.290,24
3	2	0	2	4	0	4	0,88	325	R\$ 86.846,79	0,89	198	95	70	R\$ 139.635,21	R\$ 226.482,00
4	2	0	2	4	0	3	0,88	325	R\$ 86.953,53	0,89	755	245	100	R\$ 140.593,54	R\$ 227.547,07
5	2	0	1	4	0	2	0,88	487	R\$ 82.440,20	0,89	673	327	116	R\$ 148.901,27	R\$ 231.341,46
6	2	0	3	4	0	4	0,88	244	R\$ 91.803,28	0,89	197	103	70	R\$ 139.754,56	R\$ 231.557,83
7	2	0	3	4	0	3	0,88	244	R\$ 91.733,59	0,89	755	245	92	R\$ 140.947,00	R\$ 232.680,59

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 8- Melhores cenários para política (R,s) máx atendimento - $\lambda=0,15$

Cenário	MC1	MP1	R1	MC2	MP2	R2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	Nº de stockout SP 1	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de stockout SP 2	Nº de stockout Prod 2	CT Total (Elo 2)	CT cadeia
8	1	0,5	1	4	0,5	4	0,83	500	0	R\$ 519.219,60	0,92	200	118	17	R\$ 578.393,33	R\$ 1.097.612,93
9	2	0,5	4	4	0,5	3	0,9	200	2	R\$ 647.427,66	0,92	751	249	17	R\$ 573.773,95	R\$ 1.221.201,61
10	3	0	4	4	0,5	1	0,91	196	0	R\$ 108.737,63	0,92	502	498	18	R\$ 707.971,96	R\$ 816.709,58
11	1	0,5	1	4	0,5	1	0,83	500	0	R\$ 519.637,24	0,92	502	498	18	R\$ 706.452,78	R\$ 1.226.090,02
12	4	0,5	1	4	0,5	1	0,95	500	0	R\$ 545.597,99	0,92	502	498	18	R\$ 705.838,53	R\$ 1.251.436,52
13	3	0	1	4	0,5	1	0,91	488	0	R\$ 93.207,99	0,92	502	498	19	R\$ 711.346,41	R\$ 804.554,39
14	4	0	1	4	0,5	1	0,93	489	0	R\$ 101.386,05	0,92	502	498	19	R\$ 708.407,51	R\$ 809.793,56

Fonte: O autor (2020)

Analisando o elo 2, os cenários que apresentam menor custo possuem um balanceamento entre o número de pedidos e o número de *stockout* de *SP*. O cenário 2 da Tabela 7, por exemplo, apresenta um maior número de pedidos, implicando em custos de estoques menores, em compensação o número de pedidos de emergência também se eleva substancialmente em comparação ao cenário 3 (Tabela 7), devido a necessidade de suprir a demanda imposta.

Em todos os cenários apontados, o elo 1 atende a demanda do elo 2 em todas as semanas, enquanto que para o elo 2, haverá um número considerável de semanas em que a demanda do cliente não será atendida. Quando o foco se torna o atendimento máximo de pedidos, os cenários presentes na Tabela 8, indicam que a implementação da substituição preventiva é de extrema importância para que se tenha os melhores resultados possíveis. Contudo, além do custo atrelado à manutenção corretiva, níveis maiores de estoque de *SP* são exigidos, elevando os custos totais.

O cenário 8 da Tabela 8, fornece o melhor atendimento, com um total de 98,3% do total de semanas. Entretanto, o cenário 10, descrito na Tabela 8, atende 98,2% dos pedidos e possui um custo 26% menor, além disso, esse cenário fornece ao elo 1 uma disponibilidade de 91%, possibilitando maior segurança de atendimento. Dessa forma, o percentual de atendimento reduzido do elo 2 torna-se ínfimo perto dos benefícios alcançados com essa mudança.

A redução da taxa de falha no elo 2, provoca mudança nos cenários encontrados, apresentados na Tabela 9 e Tabela 10. Entre os cenários potenciais para a taxa de falha de 10%, observa-se uma redução nos custos totais médios associados a cada cenário, devido a redução dos custos de manutenção, aquisição e estocagem. Uma menor incidência de falhas entre os equipamentos, resultam em um sistema mais confiável e com menor necessidade de reparo.

O cenário 15 da Tabela 9, apresenta o menor custo total, porém 127 pontos de *Stockout* de *SP* foram apontados no elo 2. Quando o objetivo se torna o máximo atendimento, os resultados contidos na Tabela 10, demonstram que a redução da taxa de falha possibilita um menor número de *stockout* de produção à um menor custo, em comparação a uma taxa de falha de 15%. Para a taxa de falha de 15%, o cenário 8 (Tabela) impõe um custo de R\$ 1.097.612,93 e apresenta 17 semanas sem atendimento, enquanto que para a taxa de falha de 10% é possível obter apenas 12 pontos de *stockout* de produção, com um custo de R\$ 679.355,33, ou seja, um custo aproximadamente 38% menor, como visto no cenário 24 da Tabela 10.

Tabela 9 -Melhores cenários para política (R, s) mín custo - $\lambda=0,10$

Cenário	MC1	MP1	R1	MC2	MP2	R2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> SP 2	Nº de <i>stockout</i> Prod 2	CT Total (Elo 2)	CT Cadeia
15	2	0	1	2	0	4	0,88	487	R\$82.396,49	0,89	195	103	127	R\$83.802,87	R\$166.199,36
16	2	0	1	2	0	3	0,88	487	R\$82.561,26	0,89	244	229	133	R\$84.916,32	R\$167.477,58
17	2	0	2	2	0	4	0,88	325	R\$86.880,30	0,89	195	99	149	R\$83.598,46	R\$170.478,76
18	2	0	2	2	0	3	0,88	325	R\$86.907,06	0,89	244	233	102	R\$85.084,05	R\$171.991,11
19	2	0	3	2	0	4	0,88	244	R\$91.806,94	0,89	195	90	117	R\$83.506,03	R\$175.312,97
21	2	0	3	2	0	3	0,88	244	R\$91.707,94	0,89	244	227	97	R\$84.580,81	R\$176.288,75
22	2	0	1	2	0	2	0,88	325	R\$86.927,63	0,89	324	323	128	R\$89.922,34	R\$176.849,97
23	2	0	1	3	0	4	0,88	487	R\$82.459,12	0,92	196	107	25	R\$94.503,11	R\$176.962,24

Fonte: O autor (2020)

Tabela 10 -Melhores cenários para política (R, s) máx atendimento - $\lambda=0,10$

Cenário	MC1	MP1	R1	MC2	MP2	R2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	Nº de <i>stockout</i> SP 1	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> SP 1	Nº de <i>stockout</i> Prod 1	CT Total (Elo 2)	CT Cadeia
24	4	0	3	4	0,5	2	0,93	245	0	R\$112.114,75	0,95	333	332	12	R\$567.240,58	R\$679.355,33
25	4	0	3	4	0,5	1	0,93	245	0	R\$112.096,43	0,95	499	498	12	R\$667.296,33	R\$779.392,76
26	2	0,5	2	4	0,5	4	0,9	333	0	R\$569.821,48	0,95	200	112	12	R\$539.662,27	R\$1.109.483,74
27	2	0,5	4	4	0,5	4	0,9	200	2	R\$646.658,77	0,95	200	107	12	R\$540.942,53	R\$1.187.601,29
28	3	0,5	1	4	0,5	1	0,93	500	0	R\$539.517,82	0,95	499	499	12	R\$666.945,53	R\$1.206.463,34
29	2	0	1	4	0,5	3	0,88	487	0	R\$82.363,02	0,95	250	229	13	R\$537.658,92	R\$620.021,93
30	3	0	1	4	0,5	4	0,91	488	0	R\$93.266,99	0,95	200	109	13	R\$540.166,49	R\$633.433,48

Fonte: O autor (2020)

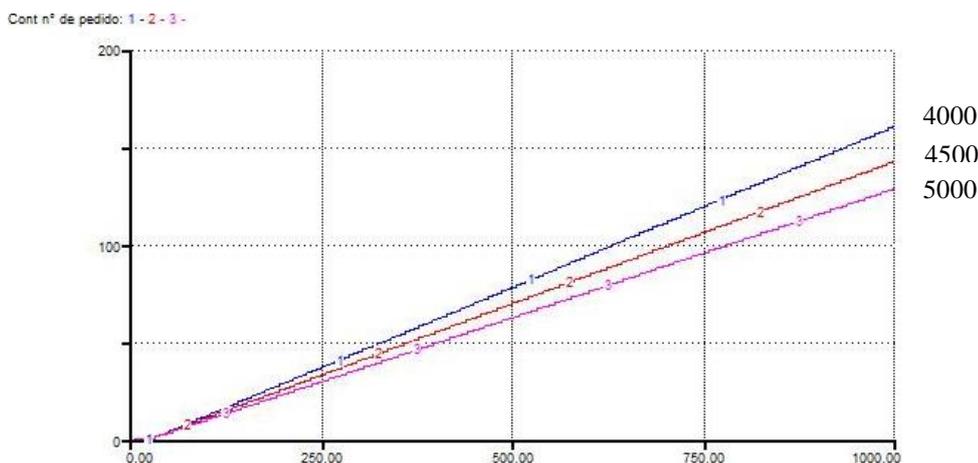
Um custo ainda menor é encontrado no cenário 29, com custo total médio por semana de R\$ 620.091,93 e apenas 13 pontos de *Stockout* de produção. Esses resultados demonstram os ganhos expressivos provenientes da gestão da manutenção e do controle efetivo do índice de falha do sistema. Seguindo esse raciocínio, para determinação da melhor estratégia, as demais políticas serão analisadas nos tópicos a seguir.

5.2 Order Point, Order Quantity (s, Q)

Para a política (s, Q), variou-se o lote de compra (Q) em 4000; 4500 e 5000 unidades de *SP*, no elo 1, combinando com os diferentes valores para as variáveis das estratégias de manutenção, onde, *MC* assume valores de 1 à 4 e *MP* 0 ou 50%, e os lotes de compra de 5500; 5750 e 6000 para o elo 2. A partir da combinação das variáveis na estrutura ($MC1;MP1;Q1;MC2;MP2;Q2$), 576 cenários são gerados, para cada taxa de falha no elo 2.

O impacto do gerenciamento da manutenção se comporta de forma similar à política anterior, uma vez que o mesmo perfil é mantido. Entretanto, o gerenciamento de *SP* difere quanto ao número de pedidos, quantidade de pedidos de emergência e conseqüentemente os custos associados. As Figuras 18 e 19 apresentam o número de pedidos de *SP* necessários no elo 1 e elo 2, para o cenário (2;0;Q1;4;0.5;Q2), para cada Q citado.

Figura 18- Número de pedidos de *SP* elo 1 (2;0;Q;4;0.5;Q)

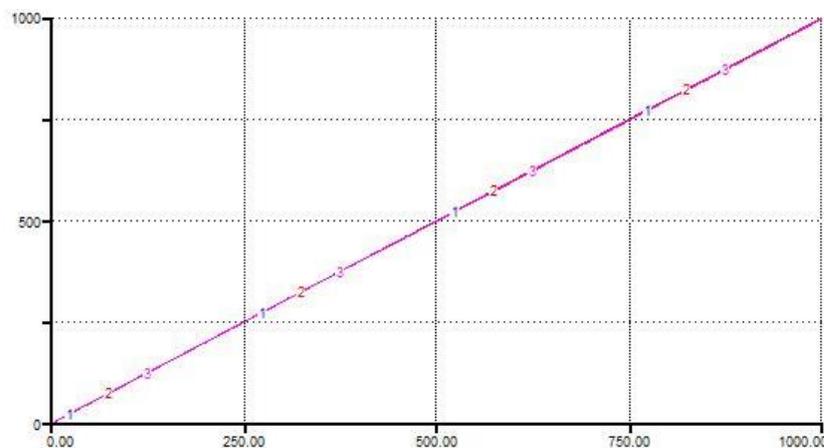


Fonte: O autor (2020)

No exemplo ilustrado, quando se tem 2 equipes de manutenção e nenhuma prática de substituição preventiva, no elo 1, à medida que o Q aumenta o número de pedidos o número de pedidos diminui, devido à elevação do estoque e a redução da necessidade de novas aquisições de *SP* durante alguns períodos. Para o elo 2, a quantidade de pedidos será o mesmo, ilustrado na Figura 3, pois, a demanda de peças quando se tem 4 equipes de manutenção trabalhando e

50% de equipamentos a serem substituídos é muito maior, sendo necessário pedidos em todas as semanas e pedidos de emergência em alguns casos, como será visto posteriormente.

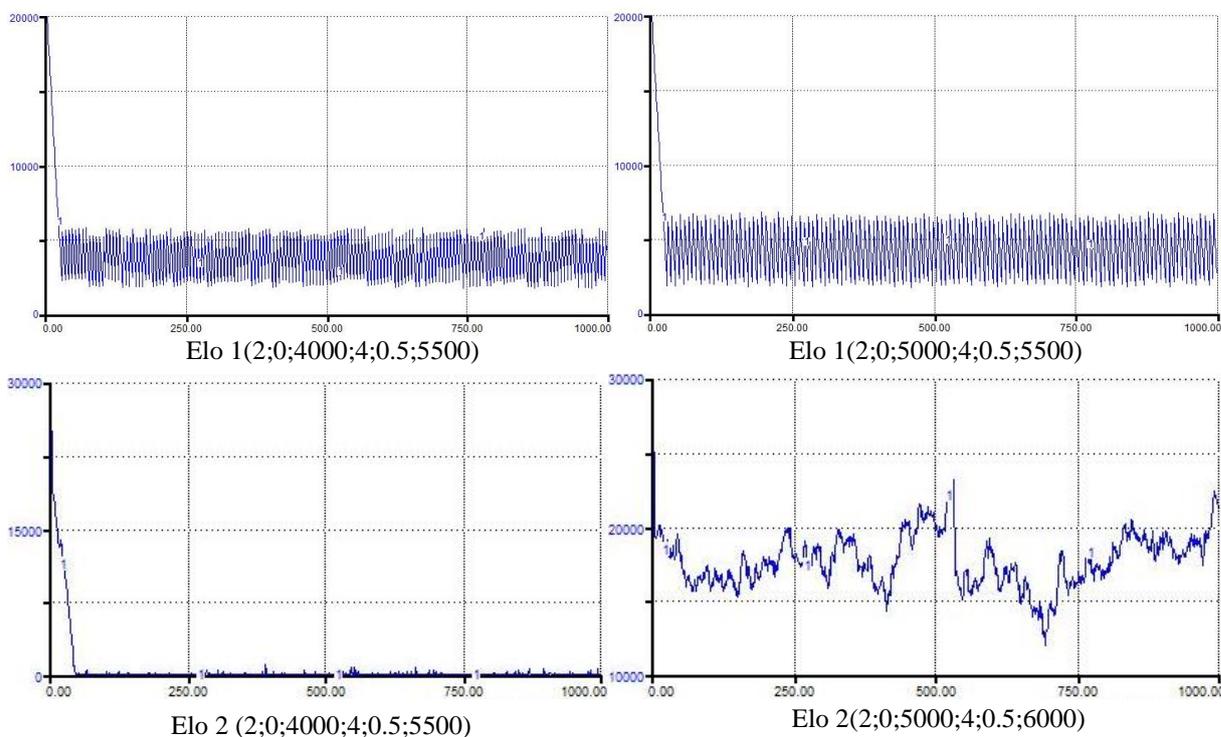
Figura 3- Número de pedidos de SP elo 2 (2;0;Q1;4;0.5;Q2)



Fonte: O autor (2020)

Os níveis de estoque se comportam com padrões bem distintos entre o elo 1 e o elo 2, a depender da estratégia de manutenção adotada e da demanda a ser atendida, como ilustrado na Figura .

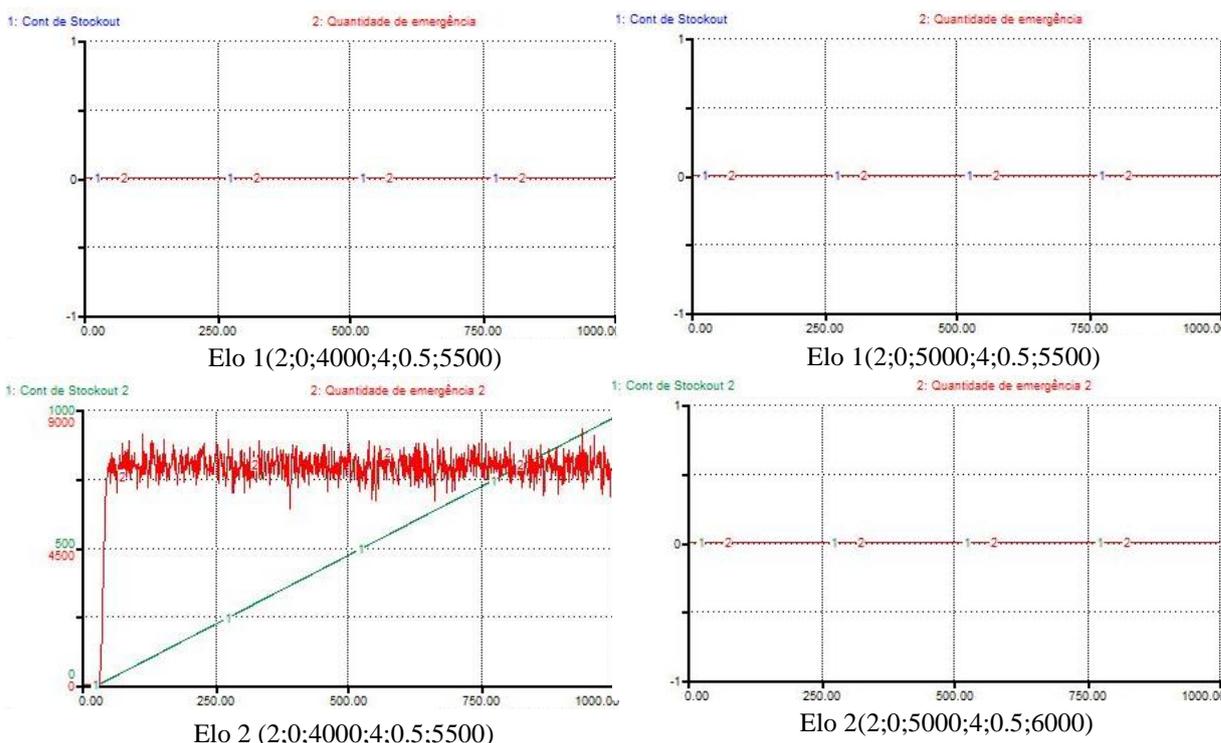
Figura 20-Níveis de estoque agregado (s, Q) ($\lambda=0,15$)



Fonte: O autor (2020)

A partir da Figura 21, é possível verificar que um lote de compra de 4000 unidades supre as necessidades do estoque do elo 1, visto que nenhum ponto de *stockout* de *SP* é encontrado e o estoque se mantém a um nível estável ao longo do período de simulação. Para o elo 2, o lote de 5500 unidades resultam em níveis muito baixos, ocasionando *stockout* de *SP* e necessidades de pedidos de emergência para suprir a demanda como observado na Figura , que descreve a quantidade de peças e o número de pedidos de emergência realizados, necessitando de um lote de 6000 unidades, delimitando os limiares para o parâmetro da política.

Figura 21- Quantidade de Pedidos de emergência (s, Q) ($\lambda=0,15$)



Fonte: O autor (2020)

Assim como na política anterior, o número de *stockout* de produção para cada elo é avaliado, visando estabelecer um limiar para a taxa de disponibilidade necessária para o atendimento máximo da demanda. Em 316 dos 576 cenários simulados para a taxa de falha de $\lambda=0,15$ a demanda não é atendida, sendo desclassificados. Nos demais, 123 cenários apresentam um número de *stockout* de produção inferior a 20 semanas, restringindo essa área para análise combinada com o elo 1.

A combinação entre o elo 1 e o elo 2 geram 32 casos em que o elo 1 é capaz de atender a demanda por completa do elo 2, sendo essa a região de cenários potenciais a ser explorada para determinação do melhor cenário para a política em pauta. A Tabela 11 lista esses cenários, e demonstra que para alcançar o melhor resultado possível de desempenho, a disponibilidade do

elo 2 deve estar entre 94% e 95%. O cenário 1, da Tabela 11, apresenta o menor número de semanas sem atendimento, com 12 semanas de *stockout* de produção e uma disponibilidade de 88% para o elo 1 e 95% para o elo 2, resultando um custo total médio da cadeia em R\$ 634.447,21 por semana.

Por outro lado, o cenário 21, também da Tabela 11, apresenta o menor custo, totalizando R\$ 610.600,14, uma economia considerável à longo prazo. Porém, 4 pontos a mais de *stockout* de produção são encontrados, ou seja, ao longo dos 1000 períodos simulados em 16, o cliente não será atendido. Essa avaliação deve ser feita com cautela a depender de como a empresa deseja se comportar frente ao mercado e até onde a mesma está disposta a gastar para buscar excelência.

A inserção da substituição preventiva no elo 1, elevam os custos em quase 74%, devido a necessidade de pedidos de emergência, uma vez que os tamanhos dos lotes fixos não são suficientes. Dessa forma, para a política (s,Q) o interessante é deixar correr até a falha para o elo 1, com uma média de duas equipes de manutenção corretiva e 3 a 4 equipes de manutenção corretiva e a substituição preventiva para o elo 2, com um lote de SP mínimo de 5750 peças.

Comparando os resultados da política de reposição de lote fixo (s,Q) com a política de revisão periódica (R,S) , para uma taxa de falha de $\lambda=0,15$, é possível observar ganhos significativos em termos de custos e de atendimento. Os cenários potenciais apontados na Tabela 11 indicam que é possível obter apenas 12 semanas sem atendimento, com um custo de R\$ 634.447,71. Enquanto que, para a política anterior, o menor número de *stockout* de produção é de 17 semanas com um custo médio total de R\$ 1.097.612,93, podendo comprovar que a política com lotes fixo se adequam melhor ao problema proposto.

Ao reduzir a taxa de falha para 10%, no elo 2, observa-se que o número de mão-de-obra necessária para realizar reparos no elo 1 aumenta para 4 equipes de manutenção corretiva (Tabela 12) devido ao aumento de necessidade de atender uma maior demanda fornecida pelo elo 2. Uma vez que o índice de falha diminui, a produtividade do sistema aumenta e consequentemente o elo à montante, que possui à demanda orientada ao elo a jusante, necessita de esforços maiores para atender a produção, comprovando a relação existente entre os elos.

Consequentemente, os custos totais médios associados também se elevam, devido ao aumento do custo total do elo 1, totalizando R\$ 650.897,66 para o cenário 8, descrito na Tabela 12. Pontos de *stockout* de produção no elo 1 também veem a surgir, em detrimento do aumento da produtividade do elo 2, restringindo a disponibilidade mínima do elo 1 para 93% para que se tenha um atendimento mais eficiente da cadeia. A seguir, a política de revisão contínua é avaliada, para que se compare todos os cenários possível.

Tabela 11 -Melhores cenários para política (s,Q) - $\lambda=0,15$

Cenário	MC1	MP1	Q1	MC2	MP2	Q2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	CT Total (ELO 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> Prod 2	CT Total (ELO 2)	CT cadeia
1	2	0	4000	4	0,5	5750	0,88	161	R\$ 108.015,11	0,95	991	12	R\$ 526.432,10	R\$ 634.447,21
2	3	0	4500	4	0,5	5750	0,91	156	R\$ 122.130,31	0,95	989	12	R\$ 528.014,16	R\$ 650.144,47
3	2	0	5000	4	0,5	5750	0,88	129	R\$ 113.661,87	0,95	990	13	R\$ 522.840,55	R\$ 636.502,41
4	2	0,5	5000	4	0,5	5750	0,9	959	R\$ 582.326,72	0,95	989	13	R\$ 532.575,34	R\$ 1.114.902,05
5	4	0	4000	4	0,5	5750	0,93	181	R\$ 127.112,63	0,95	992	14	R\$ 526.183,17	R\$ 653.295,80
6	1	0	4500	4	0,5	5750	0,79	114	R\$ 91.773,65	0,95	989	14	R\$ 530.818,19	R\$ 622.591,84
7	4	0	4500	4	0,5	5750	0,93	162	R\$ 129.928,10	0,95	990	14	R\$ 521.930,13	R\$ 651.858,23
8	4	0	5000	4	0,5	5750	0,93	145	R\$ 132.773,91	0,95	989	14	R\$ 528.833,39	R\$ 661.607,30
9	1	0,5	5000	4	0,5	5750	0,83	944	R\$ 570.318,94	0,95	989	14	R\$ 528.882,13	R\$ 1.099.201,07
10	1	0	4000	3	0,5	5750	0,79	128	R\$ 88.683,74	0,94	985	15	R\$ 520.060,13	R\$ 608.743,87
11	2	0	4000	3	0,5	5750	0,88	160	R\$ 107.420,07	0,94	985	15	R\$ 525.316,78	R\$ 632.736,85
12	4	0	4000	3	0,5	5750	0,93	182	R\$ 127.141,58	0,94	986	15	R\$ 523.611,82	R\$ 650.753,40
13	1	0	4500	3	0,5	5750	0,79	114	R\$ 91.752,39	0,94	986	15	R\$ 523.864,54	R\$ 615.616,93
14	2	0,5	5000	3	0,5	5750	0,9	960	R\$ 582.820,98	0,94	989	15	R\$ 521.176,58	R\$ 1.103.997,56
15	3	0,5	5000	3	0,5	5750	0,93	971	R\$ 590.806,22	0,94	988	15	R\$ 519.578,50	R\$ 1.110.384,72
16	1	0	4000	4	0,5	5750	0,79	129	R\$ 89.044,04	0,95	989	15	R\$ 522.931,53	R\$ 611.975,58
17	1	0	5000	4	0,5	5750	0,79	103	R\$ 94.738,93	0,95	987	15	R\$ 528.634,85	R\$ 623.373,78
18	3	0,5	5000	4	0,5	5750	0,93	965	R\$ 588.906,55	0,95	989	15	R\$ 526.382,04	R\$ 1.115.288,59
19	4	0,5	5000	4	0,5	5750	0,95	972	R\$ 597.060,10	0,95	988	15	R\$ 528.745,22	R\$ 1.125.805,32
20	3	0	4000	3	0,5	5750	0,91	174	R\$ 118.797,02	0,94	985	16	R\$ 521.959,03	R\$ 640.756,05
21	1	0	5000	3	0,5	5750	0,79	103	R\$ 94.587,29	0,94	987	16	R\$ 516.012,85	R\$ 610.600,14
22	1	0,5	5000	3	0,5	5750	0,83	946	R\$ 571.121,86	0,94	983	16	R\$ 522.412,23	R\$ 1.093.534,09
23	4	0,5	5000	3	0,5	5750	0,95	971	R\$ 593.894,79	0,94	985	16	R\$ 523.365,01	R\$ 1.117.259,80
24	3	0	4000	4	0,5	5750	0,91	174	R\$ 118.591,71	0,95	989	16	R\$ 523.204,19	R\$ 641.795,90
25	2	0	4500	4	0,5	5750	0,88	143	R\$ 110.435,25	0,95	991	16	R\$ 523.707,67	R\$ 634.142,92
26	3	0	5000	4	0,5	5750	0,91	140	R\$ 124.430,51	0,95	990	16	R\$ 520.289,56	R\$ 644.720,07
27	2	0	4500	3	0,5	5750	0,88	143	R\$ 110.684,50	0,94	986	17	R\$ 521.672,93	R\$ 632.357,43
28	3	0	4500	3	0,5	5750	0,91	155	R\$ 121.824,32	0,94	986	17	R\$ 522.092,36	R\$ 643.916,68
29	4	0	4500	3	0,5	5750	0,93	162	R\$ 130.586,76	0,94	988	17	R\$ 526.780,15	R\$ 657.366,91
30	2	0	5000	3	0,5	5750	0,88	129	R\$ 113.644,97	0,94	987	18	R\$ 525.717,61	R\$ 639.362,59

31	3	0	5000	3	0,5	5750	0,91	140	R\$ 124.079,75	0,94	986	18	R\$ 521.856,02	R\$ 645.935,77
32	4	0	5000	3	0,5	5750	0,93	145	R\$ 132.865,04	0,94	989	18	R\$ 522.992,79	R\$ 655.857,83

Fonte: O autor (2020)

Tabela 12- Melhores cenários para política (s,Q) - $\lambda=0,10$

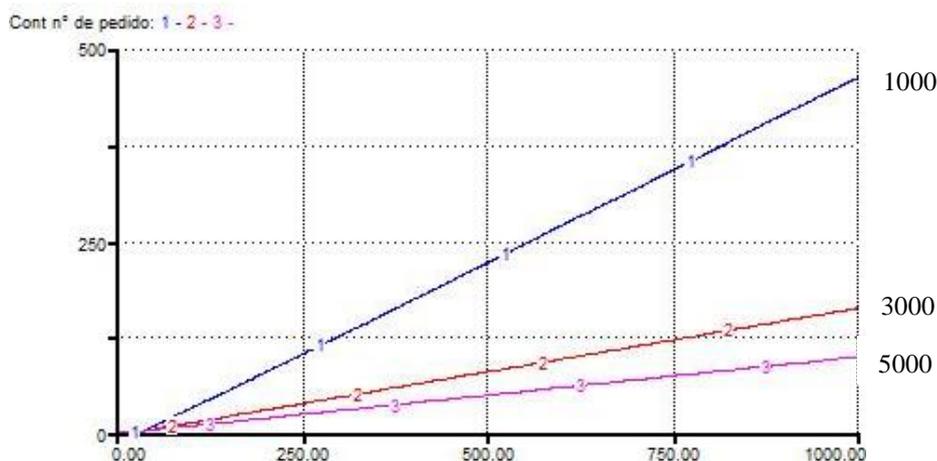
Cenário	MC1	MP1	Q1	MC2	MP2	Q2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	Nº de <i>stockout</i> SP	Nº de <i>stockout</i> Prod	CT total (ELO 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> SP	Nº de <i>stockout</i> Prod	CT total (ELO 2)	CT cadeia
1	4	0	4000	4	0,5	6000	0,93	182	0	14	R\$127.193,25	0,95	950	0	12	R\$535.042,99	R\$662.236,24
2	4	0,5	4000	4	0,5	5500	0,95	999	988	11	R\$854.690,54	0,95	999	914	13	R\$789.837,71	R\$1.644.528,24
3	2	0,5	4500	4	0,5	5500	0,9	999	968	19	R\$868.704,22	0,95	999	949	13	R\$800.905,03	R\$1.669.609,25
4	3	0,5	4000	4	0,5	6000	0,93	999	985	13	R\$847.455,78	0,95	949	0	13	R\$534.356,70	R\$1.381.812,49
5	2	0,5	4500	4	0,5	6000	0,9	999	967	19	R\$869.509,83	0,95	949	0	13	R\$534.077,05	R\$1.403.586,87
6	3	0,5	4500	4	0,5	6000	0,93	999	966	13	R\$876.717,02	0,95	945	0	13	R\$532.562,31	R\$1.409.279,33
7	4	0	5000	4	0,5	6000	0,93	145	0	14	R\$132.635,79	0,95	947	0	13	R\$532.536,83	R\$665.172,62
8	4	0	4000	4	0,5	5750	0,93	181	0	14	R\$127.029,94	0,95	990	0	13	R\$523.867,72	R\$650.897,66

Fonte: O autor (2020)

5.3 Order Point, Order Up to Level (s,S)

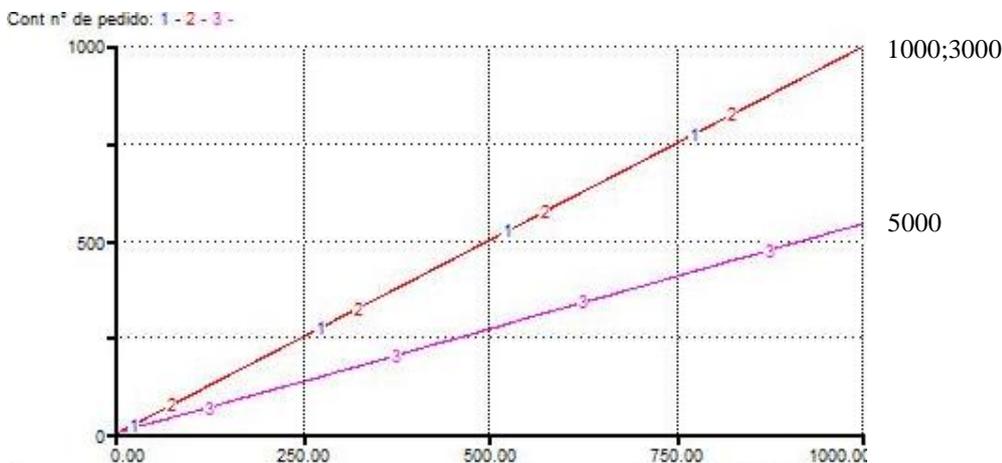
A terceira política de revisão a ser implantada e explorada foi a política de revisão contínua, onde lotes de compra (Q) podem assumir os valores 1000; 3000 e 5000, gerando 576 cenários para cada taxa de falha, quando combinados com as 4 variáveis (1 à 4 equipes) de MC e 2 variáveis de MP (0;0.5). O tamanho o lote impactará diretamente na quantidade de pedidos a serem realizados ao longo do período de simulação, tomando como exemplo os resultados quando se tem apenas uma equipe de manutenção corretiva trabalhando em cada elo, com uma taxa de falha de 15%. Observa-se na Figura que para $Q1=1000$ a quantidade de pedidos é muito maior (464 pedidos) do que $Q3=5000$ unidades (97 pedidos), reduzindo assim a frequência de pedidos realizados. Quando a substituição preventiva é implementada, esse número cresce consideravelmente, como demonstrando na Figura 4.

Figura 22- Número de pedidos elo 1 (1;0;Q;1;0;Q) ($\lambda=0,15$)



Fonte: O autor (2020)

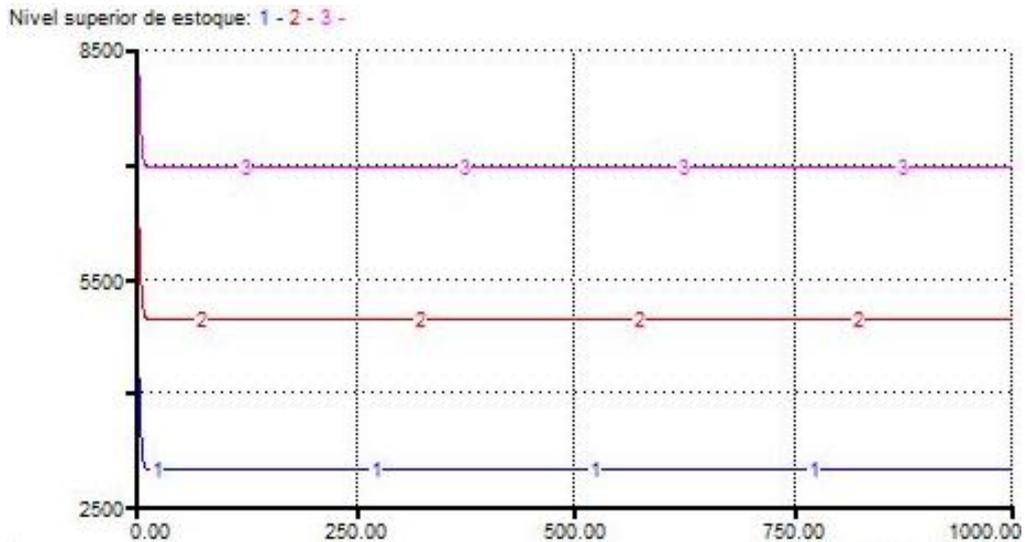
Figura 4- Número de pedidos elo 1 (1;0.5; Q;1;0.5; Q) ($\lambda=0,15$)



Fonte: O autor (2020)

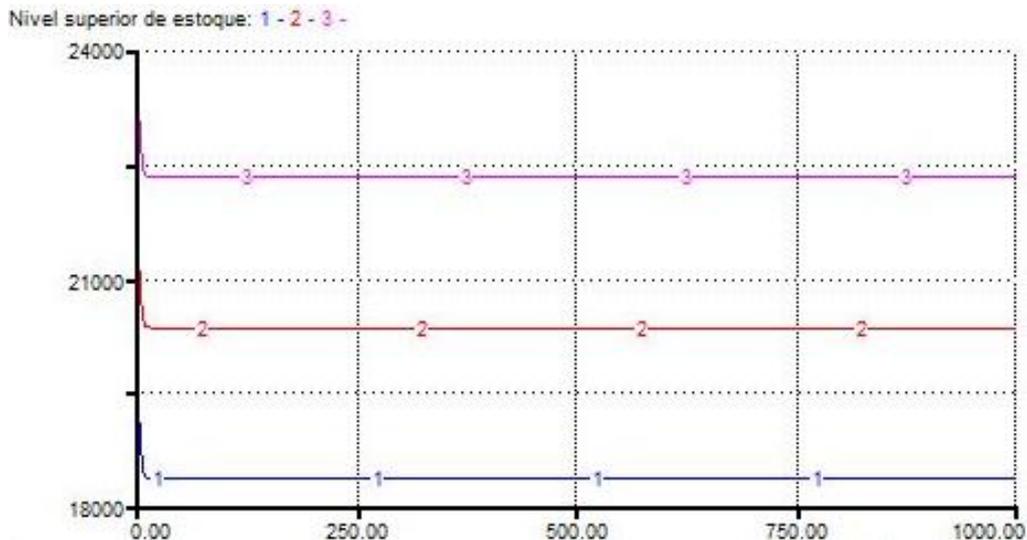
Para $Q_1=1000$ e $Q_2=3000$ são realizados pedidos em todas as semanas, devido à grande demanda de *SP* necessária para as substituições preventiva, estabelecendo elevados níveis superior de estoque, ilustrado nas Figura e Figura 5, resultando em investimentos maiores.

Figura 24- Nível superior de estoque elo 1 (1;0; Q;1;0;Q) ($\lambda=0,15$)



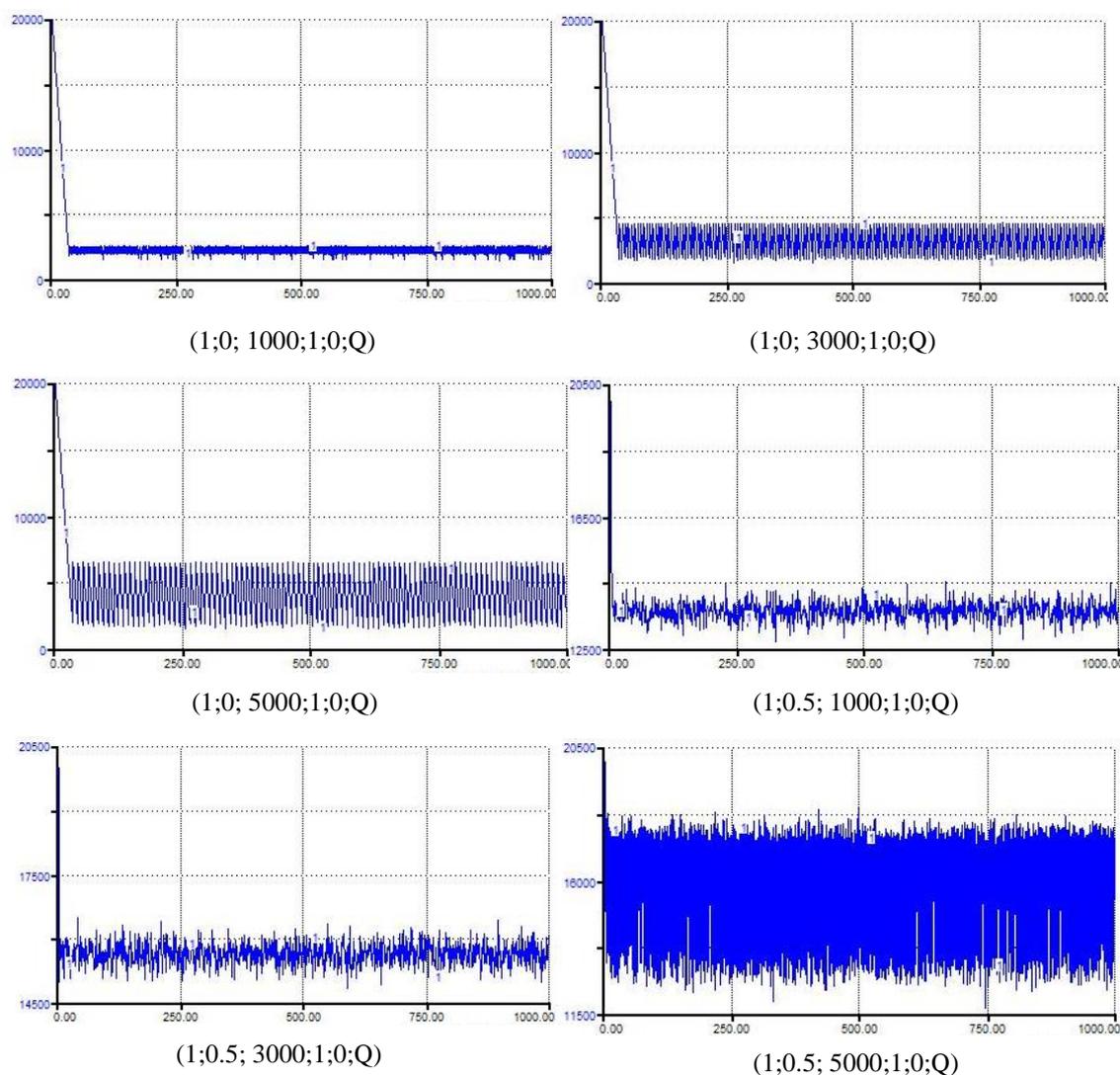
Fonte: O autor (2020)

Figura 5- Nível superior de estoque elo 1 (1;0.5; Q;1;0.5;Q) ($\lambda=0,15$)



Fonte: O autor (2020)

Quanto à necessidade de pedidos de emergência, observou-se que para a política de revisão contínua, em nenhum dos cenários ocorreram pontos de *stockout* de *SP*, isto ocorre pelo fato de que a cada necessidade da oficina de manutenção um novo pedido já é acionado para alimentação imediata do estoque, como visto na Figura 6.

Figura 6- Nível de estoque agregado elo 1 ($\lambda=0,15$)

Fonte: O autor (2020)

Avaliando a relação entre a disponibilidade e a produtividade do sistema, observou-se que quanto maior a disponibilidade do elo 2 em relação ao elo 1, maior o não atendimento da demanda do elo 1 em relação ao elo 2, uma vez que seu sistema não é capaz de suportar toda a demanda empurrada pelo elo 2. Um balanceamento entre os elos torna-se necessário, enfatizando a importância da integração entre os elos da cadeia. Tais relações são demonstradas na Tabela 13.

Tabela 13- Número de *Stockout* de produção (s,S) ($\lambda=0,15$)

MC1	MP1	Q1	MC2	MP2	Q2	A1	Nº <i>Stockout</i> prod	A2	Nº <i>Stockout</i> prod
1	0	1000	1	0	1000	0.79	7	0.75	1000
1	0	1000	2	0	1000	0.79	14	0.84	1000
2	0	1000	1	0.5	3000	0.88	12	0.89	100
4	0	3000	3	0.5	3000	0.93	9	0.91	36
3	0.5	5000	4	0.5	5000	0.93	10	0.92	18

Fonte: O autor (2020).

Para uma melhor coordenação entre os dois elos, enfatizando o máximo atendimento da demanda, o elo 2 deve apresentar uma disponibilidade de pelo menos 92% para a política (s,S) e o elo 1 pelo menos 88%, restringindo uma região onde se tem 8 cenários potenciais dos 576 simulados, considerando uma taxa de falha de 15% no elo 2, como visto na Tabela 14.

O cenário 1, da Tabela 14, apresenta o menor custo (R\$ 571.837,86), indicando a necessidade de duas equipes de manutenção corretiva e um lote de compra de 1000 peças por pedido, para o elo 1 e quatro equipes de manutenção corretiva, 50% de substituição preventiva e um lote de compra de 3000 peças, para o elo 2, resultando em 20 pontos de *stockout* de produção, no elo 2 e 18 no elo 1.

Se optar por um melhor atendimento, é possível estabelecer uma disponibilidade de 91% no elo 1 e com isso reduzir o número de *stockout* de produção para 12 semanas, com um acréscimo de 3,57% nos custos, acrescentando mais uma equipe de manutenção corretiva e aumentando o lote de compra do elo 1 para 3000, como visto no cenário 3 na Tabela 14.

Ao reduzir a taxa de falha no elo 2 para 10%, um novo conjunto de cenários potenciais é formado por 135 cenários que possuem entre 12 - 20 pontos de *stockout* de produção para o elo 2, com pelo menos 92% de disponibilidade e 9-18 para o elo 1, com 88%. A Tabela 15 apresenta os melhores cenários para a política, visando o melhor atendimento da demanda nos dois elos e o menor custo associado, destacando o cenário 9, com um custo total de R\$ 1.054.181,84. Ao flexibilizar o atendimento e permitir um número de *stockout* um pouco maior, é possível obter um custo expressivamente menor, como no cenário 12, despertado maior atratividade em relação ao balanceamento entre custo e atendimento.

Tabela 14 - Cenários potenciais para política (s,S) ($\lambda=0,15$)

Cenário	MC1	MP1	Q1	MC2	MP2	Q2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	Nº de <i>stockout</i> Prod 1	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> Prod 2	CT Total (Elo 2)	CT cadeia
1	2	0	1000	4	0,5	3000	0,88	487	18	R\$ 93.354,72	0,92	999	20	R\$ 478.483,14	R\$ 571.837,86
2	2	0	3000	4	0,5	3000	0,88	195	18	R\$ 104.191,05	0,92	999	20	R\$ 478.728,61	R\$ 582.919,66
3	3	0	3000	4	0,5	3000	0,91	197	12	R\$ 114.183,96	0,92	999	19	R\$ 478.030,60	R\$ 592.214,56
4	2	0,5	3000	4	0,5	3000	0,9	999	12	R\$ 591.174,24	0,92	999	18	R\$ 478.492,37	R\$ 1.069.666,60
5	4	0,5	3000	4	0,5	3000	0,95	999	9	R\$ 604.060,82	0,92	999	20	R\$ 478.121,13	R\$ 1.082.181,95
6	4	0,5	1000	4	0,5	5000	0,95	999	9	R\$ 581.187,40	0,92	649	20	R\$ 480.578,85	R\$ 1.061.766,25
7	2	0,5	5000	4	0,5	5000	0,9	570	12	R\$ 589.692,68	0,92	658	19	R\$ 481.724,93	R\$ 1.071.417,60
8	3	0,5	5000	4	0,5	5000	0,93	594	10	R\$ 599.863,01	0,92	669	18	R\$ 482.594,56	R\$ 1.082.457,57

Fonte: O autor (2020)

Tabela 15 - Cenários potenciais para política (s,S) ($\lambda=0,10$)

Cenário	MC1	MP1	Q1	MC2	MP2	Q2	A1	Nº de pedidos de SP (ELO 1)	Nº de <i>stockout</i> Prod 1	CT Total (Elo 1)	A2	Nº de pedidos de SP (ELO 2)	Nº de <i>stockout</i> Prod 2	CT Total (ELO 2)	CT cadeia
9	4	0,5	5000	4	0,5	3000	0,95	587	11	R\$ 603.880,32	0,95	999	12	R\$ 450.301,52	R\$ 1.054.181,84
10	3	0	1000	4	0,5	1000	0,91	488	17	R\$ 103.949,49	0,95	999	13	R\$ 432.559,82	R\$ 536.509,31
11	3	0	3000	4	0,5	1000	0,91	196	17	R\$ 113.993,36	0,95	999	13	R\$ 432.011,56	R\$ 546.004,93
12	4	0	5000	4	0,5	5000	0,93	139	14	R\$ 135.862,65	0,95	556	13	R\$ 449.599,94	R\$ 585.462,58
13	2	0,5	1000	4	0,5	3000	0,9	999	18	R\$ 566.792,50	0,95	999	13	R\$ 449.658,93	R\$ 1.016.451,43
14	4	0,5	1000	4	0,5	5000	0,95	999	11	R\$ 579.875,10	0,95	544	13	R\$ 448.808,72	R\$ 1.028.683,82

Fonte: O autor (2020)

Em síntese, analisando as 3 políticas descritas, a Tabela 16 fornece os melhores resultados obtidos dentro do conjunto de todos os cenários simulados.

Tabela 16- Melhores resultados para as três políticas de reposição de estoque avaliadas

$\lambda=0,15$						
Política	Cenário	Stockout		Stockout		CT Cadeia
		A1	Prod 1	A2	Prod 2	
(R,S)	8; Tabela 8	83%	0	92%	17	R\$1.097.612,93
(R,S)	10;Tabela 8	91%	0	92%	18	R\$816.709,58
(s,Q)	1; Tabela 11	88%	0	95%	12	R\$634.447,21
(s,S)	1; Tabela 11	88%	18	92%	20	R\$571.837,86
(s,S)	3; Tabela 14	91%	12	92%	19	R\$592.214,56
$\lambda=0,10$						
Política	Cenário	Stockout		Stockout		CT Cadeia
		A1	Prod 1	A2	Prod 2	
(R,S)	24; Tabela 10	93%	0	95%	12	R\$679.355,33
(R,S)	29; Erro! Fonte de referência não encontrada.				13	R\$620.021,93
(R,S)	10	88%	0	95%		
(s,Q)	8; Erro! Fonte de referência não encontrada.				13	R\$650.897,66
(s,Q)	12	93%	14	95%		
(s,S)	9; Tabela 15	95%	11	95%	12	R\$1.054.181,84
(s,S)	12; Tabela 15	93%	14	95%	13	R\$585.462,58

Fonte: O autor (2020)

Para uma taxa de falha de 15%, o melhor cenário a ser selecionado, considerando um melhor atendimento da demanda e conseqüentemente um melhor desempenho, é a política (s,Q) com duas equipes de manutenção corretiva e um lote fixo de 4000 peças para o elo 1 e 4 equipes de manutenção corretiva e 50% de substituição preventiva dos equipamentos no elo 2, com um lote fixo de compra de 5750 peças, apresentando um custo total médio por semana de R\$ 634.447,21 e apenas 12 semanas sem atendimento no elo 2.

Ao reduzir a taxa de falha para 10%, observa-se que o melhor cenário é o da política de revisão periódica (R,S), com duas equipes de reparo e um período de revisão de 1 semana para o elo 1 e 4 equipes de manutenção corretiva, 50% de substituição preventiva e um período de revisão de 3 semanas para o elo 2. Nota-se ainda que o custo associado aos melhores cenários para uma taxa de falha menor, são menores, bem como o número de semanas sem atendimento, ressaltando a importância da redução do índice de falha do sistema.

5.4 Implicações gerenciais do modelo

A busca incessante das empresas por excelência no mercado, tornou-se uma tarefa desafiadora para os gestores que precisam desenvolver habilidades, competências e

principalmente direcionar os resultados à níveis cada vez mais altos, dessa forma, o gerenciamento e planejamento das atividades a serem desempenhadas são triviais para a sustentabilidade e sobrevivência da organização.

Muitas empresas focam na redução de custos e direcionam suas atividades para o alcance desse objetivo, outras focam em qualidade ou diferenciação, mesmo que paguem mais caro por isso. O direcionamento da gestão está condicionado aos objetivos e propósitos de cada empresa, entretanto quase todas elas possuem algo em comum: melhoria e foco na redução de perdas, pois ambos levam ao aumento da lucratividade.

Essa redução tornou-se foco de abordagem em muitas pesquisas acadêmicas, projetos de melhorias, planejamentos estratégicos, modelos de gestão, entre outros, desde perdas de eficiência de mão de obra à perda de eficiência de energia. A coordenação conjunta alcançada pelo modelo proposto na pesquisa, serve como metodologia de apoio a decisão que possibilita o gestor minimizar as perdas existentes no gerenciamento de *SP*, considerando a demanda a ser atendida e o desempenho da cadeia, através de um planejamento eficiente das atividades de manutenção e da gestão de estoques.

Os questionamentos levantados no Capítulo 4, puderam ser respondidos durante a análise dos resultados, observando que:

- i) O gerenciamento efetivo de *SP* tem um impacto significativo nos custos e na disponibilidade do sistema, uma vez que, para a manutenibilidade dos reparos da oficina de manutenção, as peças devem estar disponíveis quando requisitadas, tendo como penalidade o comprometimento da disponibilidade do sistema caso haja falta no estoque. No modelo, essa tratativa é compensada através dos pedidos de emergência que suprem esse *stockout* entretanto, custos elevados são acrescidos no valor a ser dispendido. Em relação a gestão de estoque de *SP*, o modelo proporciona a determinação do melhor tamanho do lote de compra para os dois elos, eliminando desperdícios e obsolescência e cumprindo o nível de serviço estabelecido.
- ii) Os diversos cenários gerados possibilitam a exploração do vasto mundo de possibilidades, para que o desempenho desejado seja alcançado, por meio de um planejamento eficiente de recursos. A escolha da estratégia de manutenção definirá o quão disponível o sistema estará para executar os planos de produção, constatando que quanto maior o investimento em ações de manutenção, maior os níveis de disponibilidade e conseqüentemente maior produtividade do sistema, atendendo maior número de pedidos. Dessa forma, destaca-se a importância do

papel estratégico da manutenção, ressaltando que a manutenção e produção devem trabalhar em conjunto, como discutido há anos, e não serem tratadas como setores isolados. Os equipamentos não podem ser vistos como fonte de problemas, mas sim como recursos essenciais a serem zelados, evitando interrupções das linhas, falhas, refugos, perda de performance e disponibilidade, melhorando a eficiência global do sistema e consequentemente da cadeia de suprimentos como todo.

- iii) A abordagem de gestão integrada impulsiona tomadas de decisão mais eficientes pois, permite que o gestor tenha uma visão ampla e macro dos pontos importantes que permeiam as decisões aqui abordadas, englobando toda a cadeia de suprimentos. O sistema dinâmico possibilitou a visualização completa de todas as variáveis envolvidas, mapeando todas as ligações existentes e as relações causais, que estabelecem um comportamento ao longo do tempo, dessa forma, torna-se possível a compreensão do comportamento dinâmico que a cadeia de suprimentos pode assumir e planejar a melhor forma de alocação de recursos em termos de equipes de manutenção e *Spare Parts*.

Outras influências também puderam ser exploradas no modelo, como por exemplo: como o impacto da taxa de falha de um elo sobre o outro; como a falta de um nivelamento adequado sobre os elos podem levar a *stockout* de produção de um elo em relação à outro; como a escolha dos fornecedores é importante para determinação dos custos, *lead time*, e outros fatores que irão impactar o fornecimento das peças à oficina de manutenção.

Modelos como esse são de extrema importância para planejamentos estratégicos e decisões gerenciais, pois a simulação permite a visualização do sistema a longo prazo refletindo o impacto das ações tomadas, podendo ser utilizado para evitar decisões errôneas e maximizar a utilização dos seus recursos, objetivando o maior retorno possível.

6 CONCLUSÕES

O interesse por soluções eficientes acerca do gerenciamento de *SP* vem sendo demonstrando atualmente por várias empresas de diversos segmentos, devido aos custos associados e o impacto causado pela interrupção do sistema, caso não haja a peça em estoque. Sob esse contexto, o presente trabalho teve como objetivo elucidar o impacto da gestão eficiente de *SP* em conjunto com a gestão das atividades de manutenção sobre uma cadeia de suprimentos, através de um modelo de apoio à decisão.

A definição adequada da política de gerenciamento de estoque e a estratégia de manutenção a ser adotada são de extrema importância para indústrias que desejam se manter no mercado de forma competitiva pois, realiza o balanceamento entre o nível de serviço a ser prestado e os custos associados, permitindo um melhor atendimento da demanda, com viabilidade econômica. Em uma cadeia de suprimentos, a criticidade torna-se ainda mais evidente pois, decisões tomadas em um elo, refletem em toda a cadeia, podendo comprometer o resultado da cadeia como um todo.

Em posse disto, o modelo identificou a melhor decisão, diante dos vários cenários simulados, comparando várias políticas de estoque e sua eficácia quando relacionadas às estratégias de manutenção em uma cadeia de suprimentos. Buscou-se encontrar não só a melhor solução, como também apresentar os resultados e particularidades para cada política, de modo que o trabalho possa ser explorado sob diversos aspectos e possa ser replicado em vários contextos industriais.

Para os inputs e políticas consideradas, constou-se que a taxa de falha é o principal determinante da política de estocagem a ser selecionada pois, os resultados obtidos demonstraram que para uma taxa de falha de 15% a política (s,Q) é a mais indicada, sendo a política de revisão mais encontrada na revisão da literatura. Ao reduzir a taxa de falha para 10% a política de revisão periódica assume o melhor lugar, apresentando menores custos.

Observa-se que para ambas as taxas de falha, a estratégia de manutenção indicada será a mesma com duas equipes de manutenção corretiva para o elo 1 e quatro equipes de manutenção corretiva e 50% de substituição preventiva para o elo 2. Esse resultado demonstra que necessariamente, para a configuração imposta pelo modelo, o elo 1 deve apresentar pelo menos 88% de disponibilidade e o elo 2, 95% para que ambos possam atender ao máximo seus pedidos.

Outro fator determinante corresponde ao custo total do pedido de emergência, impactando diretamente no custo a ser despendido pela empresa e conseqüentemente influenciando na escolha final do cenário a ser selecionado pois, a minimização do custo também deve ser considerada para o aumento da lucratividade da organização.

O modelo apresentado pode ser estendido para várias modelagens de situações reais, que envolvam problemas de decisões complexos como esse, sendo de grande impacto para as indústrias e para a pesquisa pois, possibilita um vasto campo de trabalhos que possam a vim ser desenvolvidos, preenchendo a lacuna encontrada na literatura, citada na introdução do trabalho.

Como pesquisa futura, mais um elo pode ser integrado ampliando o poder de análise e captação de resultados para avaliação de uma cadeia de suprimentos mais complexa, bem como a aplicação de um modelo de decisão multiobjetivo atrelado à escolha do melhor cenário, considerando os objetivos custo e disponibilidade.

REFERÊNCIAS

- A. RAHMATI, S. H.; AHMADI, A.; KARIMI, B. Developing Simulation Based Optimization Mechanism for Novel Stochastic Reliability Centered Maintenance Problem. *Scientia Iranica*, v. 25, n. 5, p. 2788-2806, 2017.
- ALABDULKARIM, A. A.; BALL, P.; TIWARI, A. Assessing asset monitoring levels for maintenance operations: A simulation approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 26, p. 632–659, 2015.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A.; SAVILL, M. Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 44, p. 191–206, 2017.
- ALTAY GUVENIR A'*, H.; EREL, E. Multicriteria inventory classification using a genetic algorithm. *European Journal of Operational Research*, v. 105, n. 97, p. 29–37, 1998.
- ANGERHOFER, B. J.; ANGELIDES, M. C. System dynamics modelling in supply chain management: research review. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. *Anais...Wyndham Palace Resort & Spa, Orlando, FL, USA, December 10–13: 2000*
- ANTOSZ, K.; RATNAYAKE, R. M. C. Classification of spare parts as the element of a proper realization of the machine maintenance process and logistics - case study. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 12, p. 1389–1393, 2016.
- ANTOSZ, K.; RATNAYAKE, R. M. C. Spare parts' criticality assessment and prioritization for enhancing manufacturing systems' availability and reliability. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 50, n. October 2018, p. 212–225, 2019.
- AZADEH, A. et al. An integrated multi-criteria taguchi computer simulation-DEA approach for optimum maintenance policy and planning by incorporating learning effects. *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 18, p. 5374–5385, 2013.
- AZADEH, A. et al. An integrated fuzzy simulation-fuzzy data envelopment analysis approach for optimum maintenance planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 27, n. 2, p. 181–199, 2014.
- AZADEH, A. et al. Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system - A combined Markovian simulation model. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 142, p. 357–368, 2015.

- BA, K. et al. Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory for an optimal production plan with consideration of CO₂emission. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 149, p. 172–186, 2016.
- BACCHETTI, A.; SACCANI, N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, v. 40, n. 6, p. 722–737, 2012.
- BALUGANI, E. et al. Clustering for inventory control systems. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1174–1179, 2018.
- BARABADI, A.; BARABADY, J.; MARKESSET, T. Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization - A case study. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 123, p. 1–7, 2014.
- BARBOSA-POVOA, A. P.; PINTO, J. M. Process supply chains: Perspectives from academia and industry. *Computers and Chemical Engineering*, v. 132, p. 0098-1354, 2020.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P.; PINTO, J. M. Challenges and Perspectives of Process Systems Engineering in Supply Chain Management. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 44, p.87-96, 2018.
- BARLAS, Y.; ÖZEVİN, M. G. Analysis of stock management gaming experiments and alternative ordering formulations. *Systems Research and Behavioral Science*, v. 21, p. 439–470, 2004.
- BASTEN, R. J. I.; RYAN, J. K. The value of maintenance delay flexibility for improved spare parts inventory management. *European Journal of Operational Research*, v. 278,n.2, p.646-657, 2019.
- BASTEN, R. J. I.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; SCHUTTEN, J. M. J. Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks. *European Journal of Operational Research*, v. 222, n. 3, p. 474–483, 2012.
- BASTEN, R. J. I.; VAN HOUTUM, G. J. System-oriented inventory models for spare parts. *Surveys in Operations Research and Management Science*, v. 19, n. 1, p. 34–55, 2014.
- BAYKASOLLU, A.; SUBULAN, K.; KARASLAN, F. S. A new fuzzy linear assignment method for multi-attribute decision making with an application to spare parts inventory classification. *Applied Soft Computing Journal*, v. 42, p. 1–17, 2016.
- BERGH, J. VAN DEN et al. Expert Systems with Applications A three-stage approach for

- aircraft line maintenance personnel rostering using MIP , discrete event simulation and DEA. *Expert Systems With Applications*, v. 40, n. 7, p. 2659–2668, 2013.
- BOSCHIAN, V.; REZG, N.; CHELBI, A. Contribution of simulation to the optimization of maintenance strategies for a randomly failing production system. *European Journal of Operational Research*, v. 197, n. 3, p. 1142–1149, 2009.
- BOTHA, A.; GROBLER, J.; YADAVALLI, V. S. S. System dynamics comparison of three inventory management models in an automotive parts supply chain. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, v. 11, p. 1–12, 2017.
- BOULOIZ, H. et al. A system dynamics model for behavioral analysis of safety conditions in a chemical storage unit. *Safety Science*, v. 58, p. 32–40, 2013.
- BOUNOU, O.; EL BARKANY, A.; EL BIYAALI, A. Inventory Models for Spare Parts Management: A Review. *International Journal of Engineering Research in Africa*, v. 28, p. 182–198, 2017.
- BOUTSELIS, P.; MCNAUGHT, K. Using Bayesian Networks to forecast spares demand from equipment failures in a changing service logistics context. *International Journal of Production Economics*, v. 209, p. 325–333, 2019.
- BOYLAN, J. E.; SYNTETOS, A. A. Spare parts management: A review of forecasting research and extensions. *Journal of Management Mathematics*, v. 21, n. 3, p. 227–237, 2010.
- BÜLBÜL, P.; BAYINDIR, Z. P.; BAKAL, İ. S. Exact and heuristic approaches for joint maintenance and spare parts planning. *Computers & Industrial Engineering*, v. 129, p. 239–250, 2019.
- CAKIR, O.; CANBOLAT, M. S. A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. *Expert Systems with Applications*, v. 35, n. 3, p. 1367–1378, 2008.
- CAMPUZANO, F.; MULA, J.; PEIDRO, D. Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. [International Journal of Production Research](#) , v. 161, n. 11, p. 1530–1542, 2010.
- CHEMWENO, P. K.; PINTELON, L.; MUCHIRI, P. N. Evaluating the impact of spare parts pooling strategy on the maintenance of unreliable repairable systems. *IFAC-PapersOnLine*, v. 28, n. 3, p. 989–994, 2015.

- CHEN, F. L.; CHEN, Y. C.; KUO, J. Y. Applying Moving back-propagation neural network and Moving fuzzy-neuron network to predict the requirement of critical spare parts. *Expert Systems with Applications*, v. 37, n. 9, p. 6695–6704, 2010.
- CHEN, Y.; BOUFERGUENE, A.; AL-HUSSEIN, M. Analytic Hierarchy Process–Simulation Framework for Lighting Maintenance Decision-Making Based on the Clustered Network. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 32, n. 1, p. 04017114, 2017.
- CHENG, Y. H.; TSAO, H. L. Rolling stock maintenance strategy selection, spares parts' estimation, and replacements' interval calculation. *International Journal of Production Economics*, v. 128, n. 1, p. 404–412, 2010.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Gestão Da Cadeia de Suprimentos, Estratégia, Planejamento e Operações*. 4ª Ed. São Paulo: Pearson, 2013.
- CHOUDHARI, S.; GAJJAR, H. Simulation modeling for manpower planning in electrical maintenance service facility. *Business Process Management Journal*, v. 24, n. 1, p. 89–104, 2017.
- CONN, A. R. et al. A simulation model for improving the maintenance of high cost systems, with application to an offshore oil installation. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 26, n. 7, p. 733–748, 2010.
- COSTANTINO, F. et al. Spare parts management for irregular demand items. *Omega*, v. 81, p. 57–66, 2018.
- COSTANTINO, F.; DI GRAVIO, G.; TRONCI, M. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 119, p. 95–101, 2013.
- DATTA, P. P.; SRIVASTAVA, A.; ROY, R. A simulation study on maintainer resource utilization of a fast jet aircraft maintenance line under availability contract. *Computers in Industry*, v. 64, n. 5, p. 543–555, 2013.
- DE ANGELIS, M.; PATELLI, E.; BEER, M. Forced Monte Carlo Simulation Strategy for the Design of Maintenance Plans with Multiple Inspections. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, v. 3, n. 2, p. D4016001, 2016.
- DE SMIDT-DESTOMBES, K. S. et al. A spare parts model with cold-standby redundancy on system level. *Computers and Operations Research*, v. 38, n. 7, p. 985–991, 2011.

- DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems. *International Journal of Production Economics*, v. 118, n. 1, p. 260–268, 2009.
- DEKKER, R. et al. On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice. *International Journal of Production Economics*, v. 143, n. 2, p. 536–545, 2013.
- DELGADO-MACIEL, J. et al. A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems. *Procedia CIRP*, v. 70, p. 259–264, 2018.
- DIXON, D. et al. Alternatively Improving automotive supply chain performance through maintenance strategy development. *EuroMaintenance*, 2016.
- DRIESSEN, M. et al. Maintenance spare parts planning and control: A framework for control and agenda for future research. *Production Planning and Control*, v. 26, n. 5, p. 407–426, 2015.
- DURÁN, O.; MACCHI, M.; RODA, I. On the relationship of spare parts inventory policies with Total Cost of Ownership of industrial assets. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 28, p. 19–24, 2016.
- EN13306, 2010. Maintenance-maintenance Terminology. *British Standards Institution BS 1330*.
- FANG, L.; ZHAODONG, H. System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments. *Procedia Engineering*, v. 99, p. 150–155, 2015.
- FENG, Y. System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing. *Physics Procedia*, v. 25, p. 1463–1469, 2012.
- FERREIRA, L. M. D. F. et al. A Multicriteria Decision Framework for the Management of Maintenance Spares - A Case Study. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 531–537, 2018.
- FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- FRANCIOSI, C.; LAMBIASE, A.; MIRANDA, S. Sustainable Maintenance: a Periodic Preventive Maintenance Model with Sustainable Spare Parts Management. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 13692–13697, 2017.
- FRANCISCO J., T. U. et al. An Inventory-Location Modeling Structure for Spare Parts Supply Chain Network Design Problems in Industrial End-User Sites. *IFAC-PapersOnLine*,

v. 51, n. 11, p. 968–973, 2018.

FRAZZON, E. M. et al. Spare parts supply chains' operational planning using technical condition information from intelligent maintenance systems. *Annual Reviews in Control*, v. 38, n. 1, p. 147–154, 2014.

GAN, S. et al. Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system. *Applied Mathematical Modelling*, v. 39, n. 19, p. 6032–6042, 2015.

GARCIA-HERREROS, P. et al. Optimizing inventory policies in process networks under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, v. 92, p. 256–272, 2016.

GARCÍA, S. G.; GARCÍA, M. G. Design and simulation of production and maintenance management applying the Viable System Model: The case of an OEM plant. *Materials*, v. 11, n. 8, 2018.

GARY, L.; AMOS, N. H. C.; TEHSEEN, A. Towards strategic development of maintenance and its effects on production performance by using system dynamics in the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, v. 200, p. 151–169, 2018.

GARZA, R.; HILL, R. R.; MATTIODA, D. D. Using simulation to analyze the maintenance architecture for a USAF weapon system. *Simulation*, v. 89, n. 3, p. 294–305, 2012.

GENG, D. et al. The Optimization Analysis of Equipment Maintenance Based on Monte-Carlo Simulation. *Advanced Materials Research*, v. 189–193, p. 424–427, 2011.

GENG, J. et al. A semi-automatic approach to implement rapid non-immersive virtual maintenance simulation. *Assembly Automation*, v. 38, n. 3, p. 291–302, 2018.

GHADGE, A. et al. Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 29 n.5, p. 846-865, 2018.

GILABERT, E. et al. Simulation of predictive maintenance strategies for cost-effectiveness analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, v. 231, n. 13, p. 2242–2250, 2015.

GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. A decision-making framework to integrate maintenance contract conditions with critical spares management. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 131, p. 102–108, 2014.

GONUL KOCHAN, C. et al. Impact of cloud-based information sharing on hospital supply

chain performance: A system dynamics framework. *International Journal of Production Economics*, v. 195, p. 168–185, 2018.

GU, J.; ZHANG, G.; LI, K. W. Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *Journal of Air Transport Management*, v. 42, p. 101–109, 2015.

GUO, F. et al. A double-level combination approach for demand forecasting of repairable airplane spare parts based on turnover data. *Computers and Industrial Engineering*, v. 110, p. 92–108, 2017.

HORENBEEK, A. VAN et al. The Effect of Maintenance Quality on Spare Parts Inventory for a Fleet of Assets. [IEEE Transactions on Reliability](#), v. 62, n. 3, p. 596–607, 2013.

HOSSEINI, S.; IVANOV, D.; DOLGUI, A. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 125, n. December 2018, p. 285–307, 2019.

HU, Q. et al. Spare parts classification in industrial manufacturing using the dominance-based rough set approach. *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 3, p. 1136–1163, 2017.

HU, Q. et al. OR in spare parts management: A review. *European Journal of Operational Research*, v. 266, n. 2, p. 395–414, 2018.

HUR, M.; KESKIN, B. B.; SCHMIDT, C. P. End-of-life inventory control of aircraft spare parts under performance based logistics. *International Journal of Production Economics*, v. 204, n. July, p. 186–203, 2018.

ISHII, N.; OHBA, M. A supply chain analysis and design method based on the value of information. [Computer Aided Chemical Engineering](#), v.44, p.1591-1596, 2018.

ISRAEL, E. F. et al. Operational Supply Chain Planning Method for Integrating Spare Parts Supply Chains and Intelligent Maintenance Systems. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 12428–12433, 2017.

JANAMANCHI, B.; BURNS, J. R. Reducing bullwhip oscillation in a supply chain: a system dynamics model-based study. *International Journal of Information Systems and Change Management*, v. 2, n. 4, p. 350, 2008.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. 2^o ed. Boca Ranton: Taylor & Francis Group, 2013.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, M. SWOT analysis for Planned Maintenance strategy-a case study. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 12, p. 674–679, 2016.

JIANG, Y.; CHEN, M.; ZHOU, D. Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 35, p. 191–205, 2015.

JIN, T.; LIAO, H. Spare parts inventory control considering stochastic growth of an installed base. *Computers and Industrial Engineering*, v. 56, n. 1, p. 452–460, 2009.

JIN, T.; TIAN, Z.; XIE, M. A game-theoretical approach for optimizing maintenance, spares and service capacity in performance contracting. *International Journal of Production Economics*, v. 161, p. 31–43, 2015.

JOUNI, P.; HUISKONEN, J.; PIRTTILÄ, T. Improving global spare parts distribution chain performance through part categorization: A case study. *International Journal of Production Economics*, v. 133, n. 1, p. 164–171, 2011.

KABIR, A. B. M. Z.; AL-OLAYAN, A. S. A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 90, n. 1, p. 171–181, 1996.

KADER, B. et al. Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan. *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 2139–2144, 2015.

KADER, B. et al. Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory for an optimal production plan with consideration of CO₂ emission. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 149, p. 172–186, 2016.

KAEGI, M.; MOCK, R.; KRÖGER, W. Analyzing maintenance strategies by agent-based simulations: A feasibility study. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 9, p. 1416–1421, 2009.

KAHROBAEE, S.; ASGARPOOR, S. A hybrid analytical-simulation approach for maintenance optimization of deteriorating equipment : Case study of wind turbines. *Electric Power Systems Research*, v. 104, p. 80–86, 2013.

KAZEMI ZANJANI, M.; NOURELFATH, M. Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers. *International Journal of Production Economics*, v. 158, p. 44–53, 2014.

- KEILHACKER, M. L.; MINNER, S. Supply chain risk management for critical commodities: A system dynamics model for the case of the rare earth elements. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 125, n. July 2016, p. 349–362, 2017.
- KEIZER, M. C. A. O.; TEUNTER, R. H.; VELDMAN, J. Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research*, v. 257, p. 209–222, 2017.
- KENNEDY, W. J.; WAYNE PATTERSON, J.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, v. 76, n. 2, p. 201–215, 2002.
- KHORSHIDI, H. A.; GUNAWAN, I.; IBRAHIM, M. Y. Reliability centered maintenance using system dynamics approach. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, v. 2015-June, n. June, p. 1932–1936, 2015.
- KLEBER, R.; ZANONI, S.; ZAVANELLA, L. On how buyback and remanufacturing strategies affect the profitability of spare parts supply chains. *International Journal of Production Economics*, v. 133, n. 1, p. 135–142, 2011.
- KNOFIUS, N.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; ZIJM, W. H. M. Consolidating spare parts for asset maintenance with additive manufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 208, n. October 2018, p. 269–280, 2019.
- KUMAR, D.; KUMAR, D. Modelling rural healthcare supply chain in India using system dynamics. *Procedia Engineering*, v. 97, p. 2204–2212, 2014.
- KUMAR, S.; NIGMATULLIN, A. A system dynamics analysis of food supply chains - Case study with non-perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 19, n. 10, p. 2151–2168, 2011.
- KUMAR, U. et al. Maintenance performance metrics: A state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 19, n. 3, p. 233–277, 2013.
- LANGER, R. et al. Simulation study of a bottleneck-based dispatching policy for a maintenance workforce. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 6, p. 1745–1763, 2010.
- LANGROODI, R. R. P.; AMIRI, M. A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty. *Expert Systems with Applications*, v. 51, p. 231–244, 2016.

- LANZA, G.; NIGGESCHMIDT, S.; WERNER, P. Optimization of preventive maintenance and spare part provision for machine tools based on variable operational conditions. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 58, n. 1, p. 429–432, 2009.
- LEE, D. S.; LEE, D. S. Scientific Method as a Stage Process. *Dialectica*, v. 22, n. 1, p. 28–44, 1968.
- LEI, Y. et al. Production line simulation using STPN for maintenance scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 21, n. 2, p. 213–221, 2010.
- LENGU, D.; SYNTETOS, A. A.; BABAI, M. Z. Spare parts management: Linking distributional assumptions to demand classification. *European Journal of Operational Research*, v. 235, n. 3, p. 624–635, 2014.
- LI, C.; REN, J.; WANG, H. A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems. *Computers and Chemical Engineering*, v. 89, p. 71–83, 2016.
- LINNÉUSSON, G., NG, A. H., ASLAM, T. Justifying Maintenance Studying System Behavior: A Multipurpose Approach Using Multi-objective Optimization. J. Sterman, N. Repenning (ed.), *35th International Conference of the System Dynamics Society*, p. 1061–1081, 2017.
- LINNÉUSSON, G.; NG, A. H. C.; ASLAM, T. Quantitative analysis of a conceptual system dynamics maintenance performance model using multi-objective optimisation. *Journal of Simulation*, v. 12, n. 2, p. 171–189, 2018.
- LIU, Q.; DONG, M.; PENG, Y. A dynamic predictive maintenance model considering spare parts inventory based on hidden semi-Markov model. *Sage Journals*, v. 227, n. 9, p. 2090–2103, 2012.
- M. MACCHI, L. FUMAGALLI, R. P. AND S. C. A Decision Making Framework for Managing Maintenance Spare Parts in Case of Lumpy Demand: Action Research in the Avionic Sector. [Service Parts Management: Demand Forecasting and Inventory Control](#), p. 171–201, 2011.
- MANZINI, R. et al. The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model. *Computers and Industrial Engineering*, v. 87, p. 561–568, 2015.
- MARSARO, M. F.; CAVALCANTE, C. A. V. Random preventive maintenance policy based on inspection for a multicomponent system using simulation. *Eksploracja i niezawodność* -

Maintenance and Reliability, v. 19, n. 4, p. 552–559, 2017.

MATTHEW, G. et al. Renewable Integration in Island Electricity Systems – A System Dynamics Assessment. *Anais Switzerland*: Springer International Publishing, 2016

MATTILA, V.; VIRTANEN, K. Maintenance scheduling of a fleet of fighter aircraft through multi-objective simulation-optimization. *Simulation*, v. 90, n. 9, p. 1023–1040, 2014.

MEHDIZADEH, M. Integrating ABC analysis and rough set theory to control the inventories of distributor in the supply chain of auto spare parts. *Computers and Industrial Engineering*, v.139, p. 1–21, 2019.

MEHMETI, X.; MEHMETI, B.; SEJDIU, R. The equipment maintenance management in manufacturing enterprises. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 30, p. 800–802, 2018.

MINGERS, J.; WHITE, L. A review of the recent contribution of systems thinking to operational research and management science. *European Journal of Operational Research*, v. 207, n. 3, p. 1147–1161, 2010.

MIRANDA, S. et al. A criticality-driven methodology for the selection of spare parts stock management policies : the case of a beverage industry company. *Proceedings of XIX Summer School “Francesco Turco”*, 2014.

MITROFF, I. I. et al. On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. *Interfaces*, v. 4, n. 3, p. 46–58, 1974.

MITROFF, I. I. Towards a Theory of Systemic Problem Solving: Prospects and Paradoxes. *International Journal of General Systems*, v. 4, n. 1, p. 47–59, 1977.

MJIRDA, A. et al. On the joint optimization of the periodic preventive maintenance and the spare parts inventory problem. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 12, p. 881–885, 2016.

MOBARAKEH, N. A. et al. Improved Forecasts for uncertain and unpredictable Spare Parts Demand in Business Aircraft’s with Bootstrap Method. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 15241–15246, 2017.

MOLENAERS, A. et al. Criticality classification of spare parts: A case study. *International Journal of Production Economics*, v. 140, n. 2, p. 570–578, 2012.

MORECROFT, J. D. W.; VAN DER HEIJDEN, K. A. J. M. Modelling the oil producers - Capturing oil industry knowledge in a behavioural simulation model. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 1, p. 102–122, 1992.

- MOREIRA, D. A. *Administração da Produção e Operações*. 2^a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- MUCHIRI, P. N. et al. Modelling maintenance effects on manufacturing equipment performance: Results from simulation analysis. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 11, p. 3287–3302, 2013.
- MULA, J. et al. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, v. 204, n. 3, p. 377–390, 2010.
- NAJIM, K.; IKONEN, E.; DAOUD, A.-K. *Stochastic Processes Estimation, Optimization & Analysis*. 1^a ed. Butterworth-Heinemann, 2004.
- NGUYEN, D.; BAGAJEWICZ, M. Optimization of Preventive Maintenance Scheduling Processing Plants. *Computer Aided Chemical Engineering*, v.25, p. 319–324, 2008.
- NGUYEN, K.; DO, P.; GRALL, A. Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using Birnbaum ' s structural importance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, n. May, p. 249–261, 2017.
- NGUYEN, T. P. K.; YEUNG, T. G.; CASTANIER, B. Optimal maintenance and replacement decisions under technological change with consideration of spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, v. 143, n. 2, p. 472–477, 2013.
- NOSOOHI, I.; HEJAZI, S. R. A multi-objective approach to simultaneous determination of spare part numbers and preventive replacement times. *Applied Mathematical Modelling*, v. 35, n. 3, p. 1157–1166, 2011.
- NZUKAM, C. et al. Opportunistic maintenance scheduling with stochastic opportunities duration in a predictive maintenance strategy. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 453–458, 2018.
- OEHMEN, J. et al. Risk management in product design: current state, conceptual model and future research. Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE. *Anais...* August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada: 2010
- OLDE KEIZER, M. C. A.; TEUNTER, R. H.; VELDMAN, J. Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research*, v. 257, n. 1, p. 209–222, 2017.

- PAKNAFS, B.; AZADEH, A. Integrated Simulation Modeling of Business, Maintenance and Production Systems for Concurrent Improvement of Lead Time, Cost and Production Rate. *Industrial Engineering and Management Systems*, v. 15, n. 4, p. 403–431, 2016.
- PANAGIOTIDOU, S. Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures. *European Journal of Operational Research*, v. 235, n. 1, p. 300–314, 2014.
- PARK, C.; LEE, H. Computers & Operations Research A multi-class closed queueing maintenance network model with a parts inventory system. *Computers and Operation Research*, v. 38, n. 11, p. 1584–1595, 2011.
- PARK, J.; BAE, H.; BAE, J. Cross-evaluation-based weighted linear optimization for multi-criteria ABC inventory classification. *Computers and Industrial Engineering*, v. 76, n. 1, p. 40–48, 2014.
- PASCUAL, R. et al. Optimal repairable spare-parts procurement policy under total business volume discount environment. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 159, p. 276–282, 2017.
- PENG, M.; PENG, Y.; CHEN, H. Post-seismic supply chain risk management: A system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. *Computers and Operations Research*, v. 42, p. 14–24, 2014.
- PENNINGS, C. L. P.; DALEN, J. VAN; LAAN, E. A. VAN DER. Exploiting elapsed time for managing intermittent demand for spare parts. *European Journal of Operational Research*, v. 258, n.3, p. 958-969, 2016.
- PÉREZ, E.; NTAIMO, L.; DING, YU. Multi-component wind turbine modeling and simulation for wind farm operations and maintenance. *Simulation*, v. 91, n. 4, p. 360–382, 2015.
- PETTIT, T. J. *Supply chain resilience : development of a conceptual framework , an assessment tool and an implementation process*. Ohio,2018.419f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Graduate School of The Ohio State University, Ohio, 2008.
- POPPE, J. et al. Numerical study of inventory management under various maintenance policies. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, p. 262–273, 2017.
- QU, C. Z. et al. Maintenance Process Simulation Model Considered Sharing Resource and its Application. *Advanced Materials Research*, v. 189–193, p. 2530–2534, 2011.

QU, Z.; RAFF, H.; SCHMITT, N. Incentives through inventory control in supply chains. *International Journal of Industrial Organization*, v. 59, p. 486–513, 2018.

RAHIMI-GHAHROODI, S. et al. Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging. *International Journal of Production Economics*, v. 212, p. 39–50, 2019.

RAHMATI, S. H. A.; AHMADI, A.; GOVINDAN, K. A novel integrated condition-based maintenance and stochastic flexible job shop scheduling problem : simulation-based optimization approach. *Annals of Operations Research*, 2017.

RAHMATI, S. H. A.; AHMADI, A.; KARIMI, B. Multi-objective evolutionary simulation based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 40, p. 255–271, 2018.

RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, J. A. et al. Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing systems: Software tool and simulation case studies. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, v. 23, n. 3, p. 477–489, 2010.

RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, J. A.; FERNANDEZ, E. Optimization of preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing models using a simulation-based approximate dynamic programming approach. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, p. 3944–3949, 2010.

RAUSCH, M.; LIAO, H. Joint Production and Spare Part Inventory Control Strategy Driven by Condition Based Maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 59, n. 3, p. 507–516, 2010.

REBS, T.; BRANDENBURG, M.; SEURING, S. System dynamics modeling for sustainable supply chain management : A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 208, p. 1265–1280, 2019.

REGO, J. R. DO; MESQUITA, M. A. DE. Spare parts inventory control: a literature review. *Production*, v. 21, n. 4, p. 645–666, 2011.

REGO, J. R. DO; MESQUITA, M. A. DE. Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts. *International Journal of Production Economics*, v. 161, p. 1–16, 2015.

REMÉNYI, C.; STAUDACHER, S. Systematic simulation based approach for the identification and implementation of a scheduling rule in the aircraft engine maintenance.

International Journal of Production Economics, v. 147, n. PART A, p. 94–107, 2014.

REZAEI, H. et al. A new methodology to optimize target stock level for unpredictable demand of spare parts: A Case Study in Business Aircrafts' Industry. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 538–543, 2018.

REZAEI, J.; DOWLATSHAHI, S. A rule-based multi-criteria approach to inventory classification. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 23, p. 7107–7126, 2010.

ROMEIJNDERS, W.; TEUNTER, R.; VAN JAARSVELD, W. A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs. *European Journal of Operational Research*, v. 220, n. 2, p. 386–393, 2012.

RONZONI, C.; FERRARA, A.; GRASSI, A. A stochastic methodology for the optimal management of infrequent demand spare parts in the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine*, v. 28, n. 3, p. 1405–1410, 2015.

ROUX, O. et al. Optimization of preventive maintenance through a combined maintenance-production simulation model. *International Journal of Production Economics*, v. 143, n. 1, p. 3–12, 2013.

ROZHKOVA, M.; IVANOV, D. Contingency Production-Inventory Control Policy for Capacity Disruptions in the Retail Supply Chain With Perishable Products. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1448–1452, 2018.

SAADA, Y. et al. Mathematical Simulation Methods to Evaluate the Effects of Actions on Conditional Preventive Maintenance of Complex System. v. 35, p. 38–59, 2018.

SAMAL, N. K.; PRATIHAR, D. K. Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory using genetic algorithms and particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, v. 6, n. 3, p. 248–258, 2015.

SANTOS, F. P.; TEIXEIRA, Â. P.; SOARES, C. G. Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates. *Simulation*, v. 95, n. 5, p. 461–478, 2019.

SEITI, H.; HAFEZALKOTOB, A.; FATTAHI, R. Extending a pessimistic–optimistic fuzzy information axiom based approach considering acceptable risk: Application in the selection of maintenance strategy. *Applied Soft Computing Journal*, v. 67, p. 895–909, 2018.

- SELLITTO, M. A.; BALUGANI, E.; LOLLI, F. Spare Parts Replacement Policy Based on Chaotic Models. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 945–950, 2018.
- SHEIKHALISHAHI, M. An integrated simulation-data envelopment analysis approach for maintenance activities planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 27, n. 9, p. 858–868, 2013.
- SHERBROOKE, C. C. An Evaluator for the Number of Operationally Ready Aircraft in a Multilevel Supply System. *Operations Research*, v. 19, n. 3, p. 618–635, 1971.
- SIDDIQUI, M. A. et al. A Novel Idea for Optimizing Condition-Based Maintenance Using Genetic Algorithms and Continuous Event Simulation Techniques. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, p. 1–10, 2017.
- SINGH, D.; VERMA, A. Inventory Management in Supply Chain. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 3867–3872, 2018.
- SLEPTCHENKO, A. et al. Cross-training policies for repair shops with spare part inventories. *International Journal of Production Economics*, v. 209, n. August 2017, p. 334–345, 2019.
- SLEPTCHENKO, A.; AL, A.; ZIJM, H. Joint planning of service engineers and spare parts. *European Journal of Operational Research*, v. 271, n. 1, p. 97–108, 2018.
- SLEPTCHENKO, A.; HEIJDEN, M. VAN DER. Joint optimization of redundancy level and spare part inventories. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 153, p. 64–74, 2016.
- SOARES, C. G.; SANTOS, F. P. Modeling , simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi- unit systems by stochastic Petri nets with predicates. *Simulation* v. 25, n.3, 2018.
- SOUZA, A.; HADDUD, A. Supply Chain Management Integration in Maintenance and Repair Services Sector. *Operations and Supply Chain Management: International Journal*, v. 10, n. 4, p. 200, 2018.
- STERMAN, J. D. *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Cambridge, MA: McGraw-Hill, Irwin, 2000.
- SUN, X. Simulations on the Spare Parts Inventory Management of Equipment Maintenance in manufacturing enterprise based on Flexsim. *Advanced Materials Research*, v. 715, p. 3181–3186, 2013.
- SURYANI, E.; CHOU, S. Y.; CHEN, C. H. Air passenger demand forecasting and passenger

terminal capacity expansion: A system dynamics framework. *Expert Systems with Applications*, v. 37, n. 3, p. 2324–2339, 2010.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, v. 52, n. 4, p. 802–815, 2012.

TEIXEIRA, C.; LOPES, I.; FIGUEIREDO, M. Multi-criteria Classification for Spare Parts Management: A Case Study. *Procedia Manufacturing*, v. 11, n. June, p. 1560–1567, 2017.

TERKAJ, W.; TOLIO, T.; URGO, M. A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 64, n. 1, p. 451–454, 2015.

TOPAN, E. et al. A review of operational spare parts service logistics in service control towers. *European Journal of Operational Research*, v.282, n.2,p.401-414, 2019.

TOPAN, E.; BAYINDIR, Z. P.; TAN, T. Heuristics for multi-item two-echelon spare parts inventory control subject to aggregate and individual service measures. *European Journal of Operational Research*, v. 256, n. 1, p. 126–138, 2017.

TOPAN, E.; PELIN BAYINDIR, Z.; TAN, T. An exact solution procedure for multi-item two-echelon spare parts inventory control problem with batch ordering in the central warehouse. *Operations Research Letters*, v. 38, n. 5, p. 454–461, 2010.

TRACHT, K. et al. Failure probability prediction based on condition monitoring data of wind energy systems for spare parts supply. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 62, n. 1, p. 127–130, 2013.

TSOLAKIS, N.; SRAI, J. S. Inventory planning and control in ‘green’ pharmacies supply chains – A System Dynamics modelling perspective. *Computer aided chemical engineering*, v. 40,p. 1285-1290, 2017.

TSOLAKIS, N.; SRAI, J. S. Mapping supply dynamics in renewable feedstock enabled industries: A systems theory perspective on ‘green’ pharmaceuticals. *Operations Management Research*, v. 11, n. 3–4, p. 83–104, 2018.

TURRINI, L.; MEISSNER, J. Spare parts inventory management: New evidence from distribution fitting. *European Journal of Operational Research*, v. 273, n. 1, p. 118–130, 2019.

- VAN DER AUWERAER, S.; BOUTE, R. N.; SYNTETOS, A. A. Forecasting spare part demand with installed base information: A review. *International Journal of Forecasting*, v. 35, n. 1, p. 181–196, 2019.
- VAN GILS, T. et al. Formulating and solving the integrated batching, routing, and picker scheduling problem in a real-life spare parts warehouse. *European Journal of Operational Research*, v. 277, n. 3, p. 814–830, 2019.
- VAN HORENBEEK, A. et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. *International Journal of Production Economics*, v. 143, n. 2, p. 499–508, 2013.
- VAN JAARVELD, W.; DEKKER, R. Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 96, n. 11, p. 1576–1586, 2011.
- VAN WINGERDEN, E.; TAN, T.; VAN HOUTUM, G. J. The impact of an emergency warehouse in a two-echelon spare parts network. *European Journal of Operational Research*, v. 276, n. 3, p. 983–997, 2019.
- VLACHOS, D.; GEORGIADIS, P.; IAKOVOU, E. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, v. 34, n. 2, p. 367–394, 2007.
- WAKIRU, J. M. et al. A simulation-based optimization approach evaluating maintenance and spare parts demand interaction effects. *International Journal of Production Economics*, v. 208, p. 329–342, 2019.
- WALTHER, G.; JÖRG WANSART, KARSTEN KIECKHÄFER, E. S. AND T. S. S. Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies. *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, p. 239–261, 2007.
- WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied Mathematical Modelling*, v. 32, n.11, p. 2274–2289, 2008.
- WANG, S.-L.; YANG, N.; SCHONFELD, P. Simulation-Based Network Maintenance Planning and Scheduling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2100, n. 1, p. 94–102, 2009.
- WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 96, n. 11, p. 1535–1541, 2011.

- WANG, W. A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. *European Journal of Operational Research*, v. 216, n. 1, p. 127–139, 2012.
- WANG, W.; SYNTETOS, A. A. Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 47, n. 6, p. 1194–1209, 2011.
- WANG, Y.; PAN, Y.; WANG, Y. Numerical simulation of a torrential rain event in the northeast of Huaihe Basin. Part II: Instability conditions and the mechanism of intensification and maintenance. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 47, n. 1, p. 79–90, 2011.
- WU, M. C.; HSU, Y. K.; HUANG, L. C. An integrated approach to the design and operation for spare parts logistic systems. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 4, p. 2990–2997, 2011a.
- WU, M.; HSU, Y.; HUANG, L. Expert Systems with Applications An integrated approach to the design and operation for spare parts logistic systems. *Expert Systems With Applications*, v. 38, n. 4, p. 2990–2997, 2011b.
- XIE, W.; LIAO, H.; JIN, T. Maximizing system availability through joint decision on component redundancy and spares inventory. *European Journal of Operational Research*, v. 237, n. 1, p. 164–176, 2014.
- YONGQUAN, S. et al. Ordering decision-making methods on spare parts for a new aircraft fleet based on a two-sample prediction. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 156, p. 40–50, 2016.
- YOUNUS, J.; FAHAD, M.; A. KHAN, M. Evaluation and Benchmarking of Maintenance Organization and Planning/Scheduling at Automotive Industries of Pakistan. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 711–715, 2016.
- YUE, W. H.; WANG, X. J.; HUANG, L. P. Cost Modeling and Simulation for Mining Mechanical Equipment Undergoing Maintenance. *Advanced Materials Research*, v. 418–420, p. 2122–2125, 2012.
- ZAHEDI-HOSSEINI, F.; SCARF, P.; SYNTETOS, A. Joint optimisation of inspection maintenance and spare parts provisioning: a comparative study of inventory policies using simulation and survey data. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, n. March, p. 306–316, 2017.
- ZAHEDI-HOSSEINI, F.; SCARF, P.; SYNTETOS, A. Joint maintenance-inventory

optimisation of parallel production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 48, n. January, p. 73–86, 2018.

ZAMORYONOV, M. V et al. Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. v. 574, 2017.

ZARRIN, M. Simulation optimization of lean production strategy by considering resilience engineering in a production system with maintenance policies. *Simulation*, v. 93, n. 1, p. 49–68, 2016.

ZHANG, X.; ZENG, J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems. *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 2, p. 479–498, 2017.

ZHANG, Y.; YANG, H. W.; WANG, S. F. Modeling and Simulation Research on the Maintenance System of Armored Equipment. *Advanced Materials Research*, v. 383–390, p. 7265–7269, 2011.