

Benefícios da otimização do estoque de peças de reposição em conjunto com as operações de manutenção

Benefits of spare parts inventory optimization jointly with the maintenance operations

Renan Stenico Campos¹

Alexandre Tadeu Simon²

Resumo

Peças de reposição são componentes de estoque que satisfazem as necessidades de manutenção nos sistemas industriais. Essas peças são colocadas em uso quando existem falhas ou algum componente necessita ser substituído. O gerenciamento eficaz do estoque de peças de reposição diminui o tempo de inatividade dos equipamentos, reduz os custos associados aos estoques e/ou manutenção e melhora a segurança operacional. A otimização do estoque de peças de reposição em conjunto com as operações de manutenção traz reais benefícios para as empresas. A literatura apresenta dezoito modelos com esse enfoque, cada um com suas peculiaridades, não existindo, no entanto, uma análise conjunta dos mesmos que mostre as vantagens de um sobre o outro e as melhorias a serem abordadas no futuro. O objetivo deste trabalho é analisar estes modelos conjuntamente, destacar os benefícios atribuídos a cada um deles e apresentar as possíveis oportunidades para trabalhos futuros na área.

Palavras-chave: Otimização de estoques. Peças de reposição. Operações de manutenção.

Abstract

Spare parts are inventory components that meet the maintenance needs in industrial systems. These parts are used when there are failures or some component needs to be replaced. The effective management of spare parts inventory decreases equipments downtime, reduces inventory and/or maintenance costs and improves operational safety. The optimization of spare parts inventory jointly with the maintenance operations brings real advantages to the companies. The literature presents eighteen models with this approach, each one with its peculiarities, without a joint analysis of them that shows the advantages of one over the other and the improvements to be approached in future. The objective of this work is to analyze these models jointly, to emphasize the benefits attributed to each them and to present possible future work opportunities in the area.

Keywords: Inventory Optimization. Spare Parts. Maintenance Operations.

¹ Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP. UNIMEP - Universidade Metodista de Piracicaba renanstenico@hotmail.com

² Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP. Professor na graduação/pós-graduação no departamento de Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP. UNIMEP - Universidade Metodista de Piracicaba alexandre.simon@unimep.br

1 Introdução

A concorrência obriga as empresas a oferecerem aos seus clientes produtos com alta qualidade, com custos cada vez menores e dentro dos prazos. Diante desse cenário, garantir um sistema de produção eficaz, com poucas interrupções dos equipamentos, é uma vantagem competitiva importante para as organizações (Antosz & Ratnayake, 2016).

O conjunto de ações responsáveis pela disponibilidade dos equipamentos e das instalações, fornecendo confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e redução dos custos associados aos processos de produção ou de serviço, constituem o objetivo central da manutenção (Pinto & Xavier, 2009). Segundo os autores, a manutenção tem como funções: reparar o equipamento ou instalação no menor tempo possível; manter os equipamentos disponíveis para a operação; evitar e eliminar as consequências de falhas; além de reduzir os riscos de uma parada de produção não planejada.

Para que as atividades de manutenção sejam executadas com sucesso, é preciso que diversos recursos estejam disponíveis nas instalações, como ferramentas adequadas, equipamentos de testes, funcionários treinados e peças de reposição (Jones, 2006). Em relação às peças de reposição, a manutenção depende da disponibilidade dessas peças para reduzir o tempo de inatividade dos equipamentos e permitir que o sistema desempenhe, com maior produtividade, suas funções requeridas (Riis; Luxhøj & Thorsteinsson, 1997). A falta de peças de reposição em estoque aumenta o tempo de inatividade dos equipamentos em um sistema de produção, adia os procedimentos de manutenção e gera custos desnecessários à empresa. Em contrapartida, altas quantidades de peças de reposição também geram altos custos para as empresas (Jiang, Chen, & Zhou, 2015).

Por meio de uma revisão da literatura envolvendo manutenção e gerenciamento de estoques, Horenbeek *et al.* (2013a) concluiu que a otimização do estoque de peças de reposição em conjunto com as operações de manutenção traz reais benefícios para as empresas - como a redução dos custos de manutenção e dos custos associados aos estoques, além de melhorar a segurança operacional - se comparado à otimização separada de ambas as operações. A título de exemplo, ao adotar a otimização conjunta em uma linha de fabricação de blocos de motor, houve uma redução de 3% nos custos anuais de manutenção e 6% de melhoria na produção mensal (Ilgin & Tunali, 2007).

A complexidade das atividades de manutenção decorrentes das inovações tecnológicas e da necessidade de melhorar a eficiência dos sistemas de produção, junto à necessidade do planejamento dos estoques de peças de reposição para evitar falta de itens e custos desnecessários, resultou no desenvolvimento de modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção, um assunto importante tanto na área acadêmica quanto na indústria (Adebimpe *et al.*, 2015).

Atualmente, houve um aumento de pesquisas contendo modelos de otimização de estoque de peças de reposição em conjunto com a manutenção corretiva e/ou manutenção preventiva e/ou manutenção baseada em condição, direcionados para a previsão das demandas de peças de reposição (Zanjani & Nourelfath, 2014; Zhang & Guan, 2016), para suporte às tomadas de decisões (Gu, Zhang & Li, 2015; Bousdekis *et al.*, 2017) e para aprimoramento das políticas dos estoques (Cai *et al.* 2017; Poppe *et al.*, 2017). No entanto, esses modelos são apresentados isoladamente na literatura, não havendo uma análise conjunta dos mesmos que mostre as vantagens de um sobre o outro e as melhorias a serem abordadas no futuro.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar os modelos existentes conjuntamente, destacar os benefícios atribuídos a cada um deles e apresentar as possíveis oportunidades para trabalhos futuros na área.

O trabalho está estruturado em cinco seções, incluindo esta introdução que apresenta o objetivo da pesquisa; na sequência são abordados os conceitos e teorias pertinentes; o método de pesquisa adotado; a análise e discussão dos resultados obtidos; e, por fim, as considerações finais.

2 Revisão da literatura

2.1 Gerenciamento de estoques de peças de reposição

As peças de reposição são itens de estoque que possuem como função satisfazer a necessidade das operações de manutenção nos sistemas de fábrica (Kennedy *et al.*, 2002). Os serviços de peças de reposição possuem grande presença no mercado e sua necessidade surge quando ocorre falha em um componente ou requer substituição deste componente (Yang & Niu, 2009).

Boylan e Syntetos (2008) comentam que em grandes indústrias, como indústrias aeroespaciais e automotivas, há uma ampla gama de peças de reposição mantidas em estoque, com importância significativa para o desempenho dos equipamentos. Estocar as quantidades certas de peças é difícil, especialmente para componentes caros, com pequena frequência de uso e com longos tempos de espera após o pedido da demanda de reposição. No mundo militar, por exemplo, os prazos de entrega das peças podem chegar a mais de um ano (Basten, 2010). Assim, a gestão de estoque de peças de reposição é muito importante.

O estoque, segundo Freire (2007), é uma quantidade de bens ou materiais, sob controle da empresa, em um estado relativamente ocioso, es-

perando por seu uso ou venda. O gerenciamento de estoques visa aperfeiçoar o investimento em estoques, aumentando o uso eficiente dos meios internos da empresa, minimizando as necessidades de capital investido (Dias, 2000).

Quanto aos estoques de peças de reposição, esse tipo de estoque se difere dos outros por vários motivos. Um desses motivos é ter como função dar suporte às operações de manutenção. A função do estoque de peças de reposição é assistir à manutenção em manter os equipamentos em condições de operar (Kennedy *et al.*, 2002; Yang & Niu, 2009). O gerenciamento de estoques de peças de reposição é muito importante para que haja esse suporte na empresa, além de oferecer benefícios significativos em termos de redução de custos e aumento da produtividade do departamento de manutenção (Noor *et al.*, 2013).

Para que haja o desenvolvimento de um método de gerenciamento de estoques de peças de reposição, a empresa deve estabelecer: a estratégia de gerenciamento de produção ou os conceitos e abordagens utilizadas no planejamento do processo de produção e atividades auxiliares; a frequência das inspeções e reparações planejadas; e possuir um departamento de manutenção separado dos demais. Esses fatores, combinados ou não, influenciam no nível de estoque de peças de reposição, mais especificamente, sobre o estoque de segurança e os níveis mínimos e máximos de itens específicos (Grondys, Kadlubek & Starostka-Patyk, 2014).

2.2 Dificuldades tratadas no gerenciamento de estoques de peças de reposição

Uma das dificuldades tratadas no gerenciamento de estoques de peças de reposição é a questão da classificação da criticidade das peças de reposição em estoque. É comum muitas empresas armazenarem milhares de peças de reposição

essenciais para o funcionamento da linha de fabricação, porém, uma parte dessas peças merece atenção e controle preciso da administração (Sharaf & Helmy, 2001). As peças de reposição que apresentam alta taxa de utilização e baixo nível de estoque (responsáveis por 80% dos custos com peças de reposição) são classificadas como alta importância para a empresa. Já as peças com baixa utilização (responsáveis por 5% dos custos acumulativos) e alta taxa de deterioração (razão preço/validade maior que 5% do orçamento da peça de reposição) em estoque são classificadas como baixa importância, havendo a necessidade de mudanças na política de estoque para esse tipo de item (Braglia, Grassi & Montanari, 2004; Yang & Niu, 2009).

Na literatura, é possível encontrar modelos de classificação para as peças de reposição em estoque, baseados em um critério de classificação (por exemplo, a análise ABC e classificação pelo modo de manutenção, consumo de peças de reposição, custo de falta em estoque e tempo médio de demanda) ou baseados em múltiplos critérios de classificação (Braglia, Grassi & Montanari, 2004; Yang & Niu, 2009; Noor *et al.*, 2013; Maukar, Widaningasih & Putra, 2016).

Outra dificuldade tratada são as demandas para reposição dos estoques de peças de reposição. A não disponibilidade de uma peça de reposição em estoque poderá atrasar a produção devido à inatividade dos equipamentos e gerar custos desnecessários, afetando o nível de eficiência operacional (Famfulík *et al.*, 2014). Segundo Wang e Syntetos

(2011), as demandas em estoques de peças de reposição são tipicamente de natureza intermitente, isto é, os estoques podem apresentar longos períodos sem nenhuma demanda. Além disso, quando a demanda ocorre, ela normalmente não é específica para uma única unidade, ou os tamanhos das demandas são muito baixos (demanda lenta), representando de 5 a 10% o tamanho de uma demanda típica de peças de reposição, ou apresentam exigência constante (demanda agrupada). Isso quer dizer que os tamanhos de demanda podem ser altamente variáveis, conhecida como demanda “grumosa”. A Figura 1 exemplifica o caso da demanda intermitente ao longo do tempo para duas peças de reposição da Royal Air Force, fábrica presente no Reino Unido. É possível notar, em ambos os casos, os diferentes perfis de tamanho da demanda.

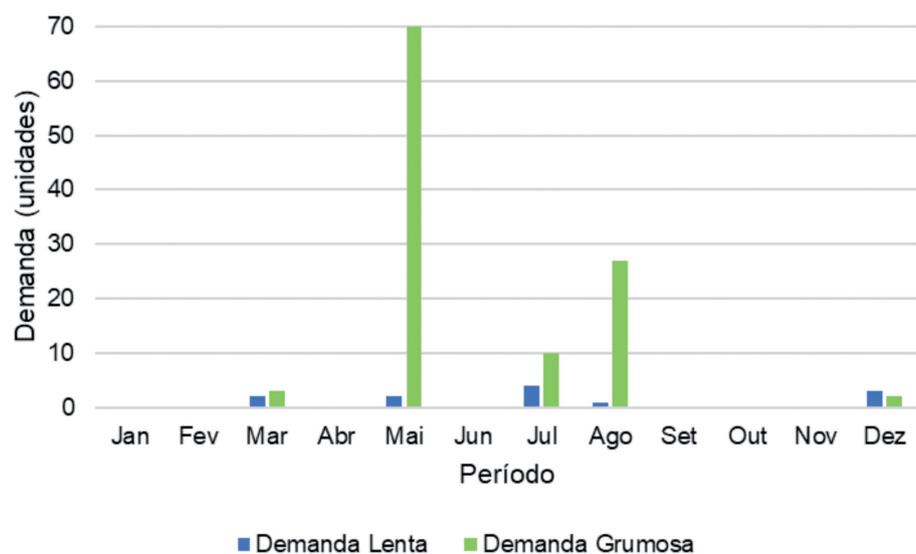


Figura 1: Exemplificação da demanda intermitente para peças de reposição
Fonte: Adaptado de Wang e Syntetos (2011).

As demandas por peças de reposição são caracterizadas conforme o tipo de manutenção a ser realizada em um processo operacional e pelas características das falhas identificadas no sistema (Wang, 2012). Falhas aleatórias ocorridas nos equipamentos são solucionadas normalmente por

manutenção corretiva, e a demanda intermitente de peças de reposição é tipicamente de baixo volume. Além da substituição por falha aleatória, a demanda por peças de reposição também pode surgir sob uma política de desligamento programado do equipamento e substituição das peças por meio da manutenção preventiva. Em contraste com a demanda de substituição de falhas de baixo volume, a manutenção preventiva pode apresentar um cenário de demanda agrupada, no qual um número maior de unidades é necessário (Vaughan, 2005; Poppe *et al.*, 2017).

Segundo Wang e Syntetos (2011), a demanda decorrente da manutenção preventiva, quando a reparação está agendada, é estocástica (evento aleatório) em relação ao tamanho da demanda, mas determinística (evento previsível) quanto aos pedidos, sendo esses fixos e regulares. A demanda decorrente da manutenção corretiva, após a ocorrência de uma falha, é estocástica em relação ao pedido da demanda, mas determinística na quantidade. Para ambos os casos, é muito importante a previsão por parte do armazenista.

Inúmeros modelos foram e estão sendo desenvolvidos na literatura para estimar o consumo das peças de reposição, melhorar a previsão das demandas das peças de reposição e as quantidades corretas de peças a serem pedidas, requisitos esses associados às operações de manutenção (Gu, Zhang & Li, 2015; Moharana & Sarmah, 2016).

Além da classificação da criticidade e das demandas, outra dificuldade presente no gerenciamento dos estoques das peças de reposição é a definição da política de manutenção adequada. Para que um sistema de manutenção cumpra sua função de suporte ao sistema produtivo das empresas, é preciso que as ações típicas de manutenção, incluindo o gerenciamento de peças de reposição, estejam alinhadas com os objetivos corporativos declarados, que visam aumento de

participação no mercado, resultados econômicos, produtividade, qualidade, fluxo, questões ambientais e segurança. Para tanto, é preciso definir a política de manutenção adequada para que as operações de manutenção cumpram os objetivos corporativos estabelecidos pelas empresas (Riis; Luxhøj & Thorsteinsson, 1997). Entre as políticas de manutenção existentes, as mais utilizadas pelas empresas são: manutenção corretiva, manutenção preventiva e a manutenção baseada na condição (Shin & Jun, 2015).

3 Método de pesquisa

Para o cumprimento do objetivo desta pesquisa, foram utilizadas três etapas principais: revisão dos conceitos teóricos (Etapa 1), identificação dos modelos (Etapa 2) e análise dos modelos identificados (Etapa 3), conforme apresentado na Figura 2.

Na Etapa 1, encontra-se a revisão teórica sobre o gerenciamento de estoques de peças de reposição e as dificuldades tratadas durante o gerenciamento, estas contempladas na Seção 2 desta pesquisa.

Na Etapa 2, para identificação dos modelos de otimização conjunta de estoque de peças de reposição e operações de manutenção, foi utilizada a revisão sistemática da literatura.

A revisão sistemática da literatura consiste em identificar, avaliar e interpretar as pesquisas relevantes relacionadas a um específico problema, tópico, área ou fenômeno de interesse (Galvão & Pereira, 2014). Para esse trabalho, a revisão sistemática se baseou nos seguintes passos apresentados no estudo de Cooper (2010): formulação da questão de pesquisa; definição das palavras-chave de busca; seleção das bases de dados para consulta; adoção de refinamentos de pesquisa nas bases; exclusão de artigos duplicados; avaliação dos ar-

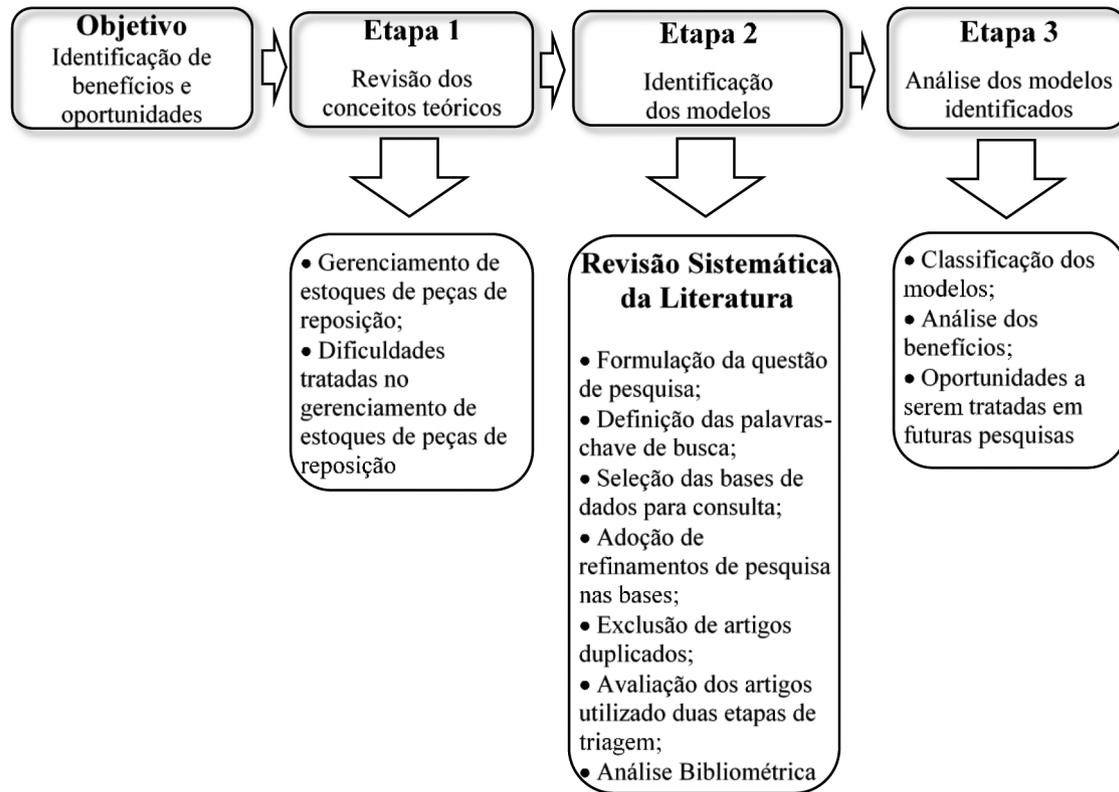


Figura 2. Etapas do desenvolvimento da pesquisa

Fonte: elaborado pelos autores.

tigos utilizado duas etapas de triagem e análise bibliométrica.

A revisão sistemática iniciou-se a seguinte formulação de pergunta “Quais são os modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção existentes?”. A partir dessa pergunta, houve a definição das palavras-chave de busca. Para obter melhores resultados de pesquisa, foram feitas combinações de termos relacionados ao tema do trabalho, nesse caso agrupando os termos “*Logistic**”, “*Inventory*” e “*Stock*” com os termos “*Spare Parts*” e “*Maintenance*”. Em seguida, selecionou-se três bases de dados internacionais para encontrar os trabalhos científicos contendo os modelos, no caso a *Web Of Science*, a *Scopus* e a *Science Direct*. A escolha dessas três bases de dados se baseou na facilidade de acesso a milhares de títulos em diversas áreas de conheci-

mento, permissão para o uso de outros *softwares* durante o processo de triagem dos resultados encontrados e maior detalhamento sobre os trabalhos selecionados. Quanto ao processo de refinamento, apenas artigos publicados em revistas ou conferências foram selecionados (pensando no acesso aos seus conteúdos) e em áreas específicas que abordam o tema dessa pesquisa. Foram encontrados, no total, 880 artigos no processo de refinamento.

Dos 880 artigos encontrados no processo de refinamento, 290 artigos foram excluídos da amostra por estarem presentes em duas ou mais bases de dados. Em seguida, foram feitas duas triagens para a seleção dos artigos. Na primeira triagem, ao verificar o título, o resumo e as palavras-chave das publicações, foram eliminados 506 artigos por não apresentarem estudos envolvendo as atividades de estoque de peças de reposição com

manutenção industrial. Os outros 84 trabalhos acadêmicos seguiram para a segunda triagem, havendo a exclusão dos artigos que não apresentam modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção. Por fim, foram identificados 18 modelos. O detalhamento da revisão sistemática é apresentado na Tabela 1.

Como último passo da revisão sistemática, a análise bibliométrica tem como objetivo mostrar, através de avaliações quantitativas, o número de publicações que ocorreram ao longo dos anos, os autores mais citados, os principais periódicos que publicam os estudos relacionados com os temas pesquisados e as metodologias empregadas nos artigos.

Primeiramente, foram catalogados todos os 18 artigos contendo os modelos de otimização conjunta de peças de reposição em conjunto com as operações de manutenção, considerando os respectivos anos de publicação e outras informações relevantes conforme a Tabela 2. Nota-se que os trabalhos de Elwany e Gebrael (2008), Vaughan (2005) e Braglia, Grassi e Montanari (2004) contém os modelos com mais citações na literatura, onde juntos, somam cerca de 60% do total de citações da amostra de artigos.

Dispondo do ano em que o texto foi publicado, criou-se uma linha cronológica das pesquisas. Conforme o gráfico que consta na Figura 3, é possível observar que as investigações contendo os modelos apresentam publicações relevantes a partir de 2004, havendo maior número em 2016 e 2017. Nota-se também que existe uma concentração de mais de 50% das publicações nos últimos três anos. Esse aumento nos trabalhos expostos mostra uma expectativa para um crescimento nesse campo de pesquisa.

Tabela 1: Detalhamento da revisão sistemática da literatura

Revisão sistemática da literatura			
Formulação da questão de pesquisa	Quais são os modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção existentes?		
Combinações de palavras-chave	(logistic* AND spare parts AND maintenance) OR (inventory AND spare parts AND maintenance) OR (stock AND spare parts AND maintenance)		
Bases de dados internacionais selecionadas	Web of Science	Scopus	Science Direct
Resultados contendo as combinações de palavras-chave em títulos, resumos e palavras-chave dos trabalhos identificados. Não houve restrição quanto à data de publicação.	338 artigos	735 artigos	114 artigos
Refinamentos: tipo de documento (apenas artigos publicados em revistas ou conferências) e área de pesquisa (Engineering; Operations Research Management Science; Mathematics)	257 artigos	524 artigos	99 artigos
Total de artigos após refinamento	880 artigos		
Total de artigos sem duplicações	(-290) = 590 artigos		
Seleção de artigos (1ª triagem): ao verificar título, resumo e palavras-chave, foram excluídos os artigos que não apresentavam estudos envolvendo as atividades de estoque de peças de reposição com manutenção industrial	(-506) = 84 artigos		
Seleção de artigos (2ª triagem): artigos que apresentam modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção	(-66) = 18 artigos		
Total de modelos identificados	18 modelos		

Fonte: elaborado pelos autores.

**Tabela 2. Artigos selecionados que compõem o portfólio bibliográfico**

Nº	Autores	Título do artigo	Ano de publicação	Nº de citação
1	Elwany e Gebraeel	<i>Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory</i>	2008	102
2	Vaughan	<i>Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy</i>	2005	74
3	Braglia, Grassi e Montanari	<i>Multi-attribute classification method for spare parts inventory management</i>	2004	73
4	Wang	<i>A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation</i>	2012	54
5	Ilgin e Tunali	<i>Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms</i>	2007	39
6	Jiang, Chen e Zhou	<i>Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory</i>	2015	18
7	Gu, Zhang e Li	<i>Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty</i>	2015	13
8	Zanjani e Nourelfath	<i>Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers</i>	2014	8
9	Keizer, Teunter e Veldman	<i>Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components</i>	2017	6
10	Moharana e Sarmah	<i>Determination of optimal order-up to level quantities for dependent spare parts using data mining</i>	2016	2
11	Poppe et al.	<i>Numerical study of inventory management under various maintenance policies</i>	2017	1
12	Bousdekis et al.	<i>A proactive event-driven decision model for joint equipment predictive maintenance and spare parts inventory optimization</i>	2017	1
13	Frazzon, Silva e Pires	<i>Simulation-based performance evaluation of a concept for integrating intelligent maintenance systems and spare parts supply chains</i>	2016	1
14	Noor et al.	<i>An EOQ based multi-storage location of spare part Inventories: a case study</i>	2013	1
15	Yang e Niu	<i>Research on the Spare Parts Inventory</i>	2009	1
16	Cai et al.	<i>Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory with appointment policy</i>	2017	0
17	Zhang e Guan	<i>Inventory management for spare parts on engineering machinery</i>	2016	0
18	Maukar, Widaninggih e Putra	<i>Probabilistic periodic review system to determine minimum and maximum inventory replenishment levels in Acme Company</i>	2016	0

Fonte: elaborado pelos autores.

Outra informação relevante sobre os modelos encontrados está relacionada aos periódicos em que foram publicados. Nesse sentido, quantificaram-se todos os periódicos selecionados, possibilitando mostrar quais são as revistas de maior importância dentro dos tópicos pesquisados (Tabela 3). Nota-se que a revista com maior número de publicações é a revista *European Journal of Operational Research*, com 3 artigos contendo modelos em sua base. O

motivo de haver várias publicações na revista é o fato dela permitir submissões de trabalhos que contenham ferramentas de otimização ou ferramentas de tomadas de decisão voltadas para a área de manufatura e logística. Assim, os artigos da amostra publicados na revista *European Journal of Operational Research* apresentam ferramentas de otimização envolvendo estoques de peças de reposição e as operações de manutenção.

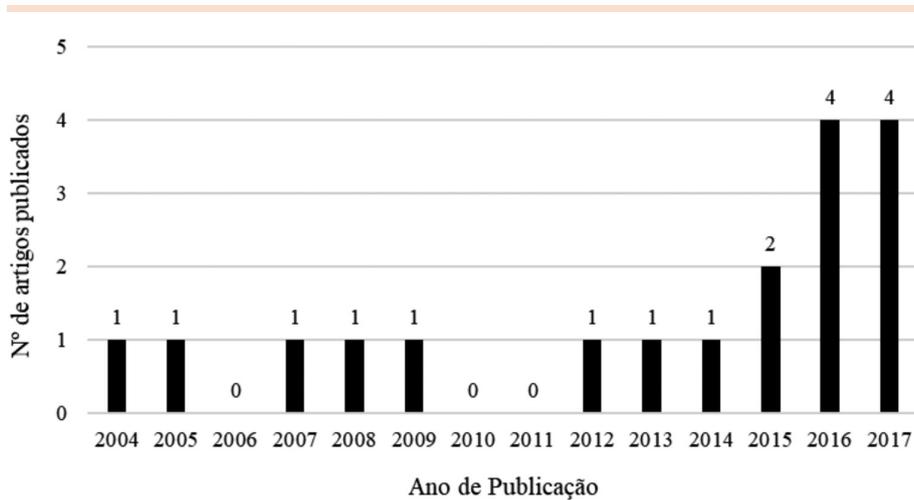


Figura 3: Quantidade de publicações por ano contendo modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 3: Número de publicações contendo modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção por periódico

Periódico	Nº Publicações
<i>European Journal of Operational Research</i>	3
<i>Applied Mechanics and Materials</i>	1
<i>Chinese Automation Congress</i>	1
<i>Computers & Industrial Engineering</i>	1
<i>IFAC PapersOnLine</i>	1
<i>IIE Transactions</i>	1
<i>Industrial Engineering and Engineering Management</i>	1
<i>International Journal of Production Economics</i>	1
<i>Journal of Air Transport Management</i>	1
<i>Journal of Engineering and Applied Sciences</i>	1
<i>Journal of Manufacturing Systems</i>	1
<i>Journal of Quality in Maintenance Engineering</i>	1
<i>Mathematical Problems in Engineering</i>	1
<i>Procedia CIRP</i>	1
<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	1
<i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>	1
Total	18

Fonte: elaborado pelos autores.

O último fator analisado foi a quantificação das metodologias utilizadas nos modelos. Na Tabela 4, verifica-se que a metodologia mais empregada foi a modelagem matemática, presente em metade dos modelos da amostra, seguido pelas metodologias estudo de caso e simulação, respectivamente.

Na Etapa 3 do desenvolvimento de pesquisa, estão presentes a classificação dos modelos encontra-

dos de acordo com a sua utilidade na otimização de estoques de peças de reposição e as políticas de manutenção contempladas, bem como uma discussão sobre os benefícios trazidos pelos modelos e possíveis oportunidades a serem tratadas em futuras pesquisas.

Tabela 4: Metodologias utilizadas nos modelos encontrados

Metodologia	Quantidade de modelos	%
Modelagem matemática	9	50
Estudo de caso	6	35
Simulação	3	15
Total	18	100

Fonte: elaborado pelos autores.

4 Análises e discussão dos modelos identificados

4.1 Classificação dos modelos

Com o intuito de oferecer uma visão geral sobre os modelos identificados pela revisão sistemática, foi desenvolvido o Quadro 1, onde consta a classificação dos modelos quanto a sua utilidade

na otimização de estoques de peças de reposição e as políticas de manutenção abordadas por eles.

Alguns modelos concentram-se em caracterizar e otimizar as políticas de pedidos de peças de reposição como suporte às operações de manutenção (Zhang & Guan, 2016). Esses modelos procuram determinar como realizar o pedido, o quanto pedir em cada demanda e quando fazer o pedido. As demandas de peças de reposição consideradas podem ser reconhecidas como determinísticas, quando os fatores incluídos no modelo são conhecidos com precisão, ou como estocásticas, quando os fatores utilizados são incertos.

Manter um estoque de peças de reposição disponível para as operações de manutenção, sem que haja excesso ou falta de peças, é uma tarefa crítica e importante para os gerentes de produção e manutenção. A fim de facilitar as tarefas dos gerentes quanto às tomadas de decisões para o planejamento dos estoques de peças de reposição, foram desenvolvidos modelos de decisão visando à disponibilidade das peças. O desenvolvimento de modelos de decisão pode seguir duas abordagens: modelos matemáticos ou abordagens de classificação (Huiskonen, 2001).

Outros modelos fazem uso de simulações ou das equações matemáticas para aprimoramento das políticas dos estoques de peças de reposição, considerando também as operações de manutenção, a fim de melhorar a disponibilidade e os registros das peças; a redução de custos associados (ex. custo de compra, custo de manutenção e custo de escassez); além de capturar todos os aspectos dinâmicos e estocásticos do sistema.

Quanto às políticas de manutenção, ao analisar os modelos identificados pela revisão sistemática, três políticas são abordadas. A manutenção corretiva (*corrective maintenance* - CM) é a política de manutenção utilizada quando ocorre uma falha aleatória de um componente, onde a falta de peças de reposição em estoque leva ao adian-

tamento da manutenção e, eventualmente, a altos tempos de inatividade dos equipamentos. A segunda política presente nos modelos é a manutenção preventiva (*preventive maintenance* - PM), cujo objetivo é melhorar a vida útil dos equipamentos por meio da inspeção periódica em tempos específicos (idade ou tempo de calendário), independentemente da condição da máquina.

Já a manutenção baseada em condição (*condition-based maintenance* - CBM), também denominada manutenção preditiva, utiliza dados coletados por meio do monitoramento de vibração, análise de lubrificação, testes ultrassônicos, entre outros, para analisar as condições dos elementos que constituem os equipamentos (Vaughan, 2005; Wang, 2012; Horenbeek *et al.*, 2013b).

4.2 Discussão sobre os modelos identificados

4.2.1 Modelos utilizando políticas baseadas na demanda de peças de reposição

Na amostra, Vaughan (2005) foi o primeiro a desenvolver um modelo de programação dinâmica estocástica para caracterizar e otimizar a política de pedidos intermitentes de peças de reposição. O modelo utiliza o tempo entre as operações de PM para otimizar as demandas de peças de reposição. Por meio de exemplificações numéricas da política otimizada, constatou-se que a utilização do tempo entre as inspeções de PM permite a realização dos pedidos de peças de reposição um pouco antes das operações preventivas, ocasionando economias nos custos por pedido. Porém, a programação dinâmica utilizada considera algumas variáveis constantes, fatores estes aleatórios na vida real.

A não inclusão de fatores aleatórios por parte de modelos os tornam muitas vezes ineficientes e inaplicáveis nas empresas. Isso é evidente no estudo de Yang e Niu (2009), onde os autores desenvolveram um modelo para encontrar um nível

Trabalhos Científicos	Modelos para otimização do estoque de peças de reposição						Políticas de manutenção		
	Políticas baseadas na demanda de peças de reposição		Ferramentas de suporte para as tomadas de decisão		Ferramentas para aprimoramento das políticas dos estoques		Manutenção corretiva	Manutenção preventiva	Manutenção baseada em condição
	Demanda determinística	Demanda estocástica	Modelos matemáticos	Modelos de classificação	Modelos de simulação	Modelos matemáticos			
Braglia, Grassi e Montanari (2004)				✓			✓	✓	✓
Vaughan (2005)		✓					✓	✓	
Ilgin e Tunali (2007)					✓			✓	
Elwany e Gebraeel (2008)			✓				✓	✓	✓
Yang e Niu (2009)	✓						✓	✓	✓
Wang (2012)		✓						✓	
Noor <i>et al.</i> (2013)						✓	✓	✓	✓
Zanjani e Nourelfath (2014)		✓					✓	✓	✓
Gu, Zhang e Li (2015)						✓	✓	✓	✓
Jiang, Chen e Zhou (2015)					✓			✓	
Maukar, Widaningasih e Putra (2016)						✓	✓	✓	✓
Frazzon, Silva e Pires (2016)					✓		✓	✓	✓
Moharana e Sarmah (2016)						✓	✓	✓	✓
Zhang e Guan (2016)		✓					✓	✓	✓
Keizer, Teunter e Veldman (2017)						✓			✓
Bousdekis <i>et al.</i> (2017)			✓						✓
Cai <i>et al.</i> (2017)					✓			✓	
Poppe <i>et al.</i> (2017)					✓		✓	✓	✓

Quadro 1: Classificação dos modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção

Fonte: elaborado pelos autores.

mínimo de estoque para cada peça de reposição, considerando determinístico o tempo de entrega do pedido para os fornecedores e o tempo de espera das peças de reposição pelos clientes. Os autores propuseram o modelo, porém, não houve continuidade por meio de exemplos numéricos ou estudo de caso para mostrar a aplicabilidade do modelo proposto.

Como forma de otimizar o estoque de peças de reposição em conjunto com os intervalos

de inspeção da PM, tomando como base o estudo de Vaughan (2005), o modelo desenvolvido por Wang (2012) procura encontrar o intervalo ideal de pedidos de peças de reposição, o intervalo de inspeção periódica baseado no *delay time* (período entre o surgimento de um defeito e a efetiva ocorrência de uma falha causada por este) e a quantidade de pedidos essencial por meio da programação dinâmica estocástica. Ao simular o modelo utilizando dados reais de uma peça específica

utilizada em uma máquina de fabricação de papel, o autor comprova que o modelo consegue prever o custo total semanal (valor este representando a somatória dos custos associados aos pedidos de peças de reposição e inatividade do equipamento) baseado na variação do *delay time*. Como uma das sugestões de trabalhos futuros, Wang (2012) propõem a utilização do monitoramento de condição para uma melhor previsão da vida residual dos equipamentos, permitindo melhores decisões sobre a aquisição de peças de reposição.

Saindo do escopo da manutenção interna, Zanjani e Nourelfath (2014) criaram um modelo de programação matemática que coordena os estoques de peças de reposição para prestadores de serviços de manutenção, com o propósito de que as operações e as entregas dos produtos reparados aos clientes fossem concluídas dentro do tempo programado. Os autores utilizaram um programa estocástico multiestágio (em que todas as tomadas de decisões são realizadas em vários estágios ao longo do tempo) e constataram que a programação leva em considerações vários cenários de demanda, melhorando as estimativas do custo de aquisição, de estoque e de escassez das peças de reposição.

Para o desenvolvimento de novos modelos ou melhoramento dos existentes voltados à caracterização e otimização das demandas de peças de reposição, o uso de ferramentas estocásticas aperfeiçoadas, como o sistema multiestágio, em conjunto com ferramentas para o monitoramento da condição dos componentes das máquinas, são considerações fundamentais a serem tratadas em futuras pesquisas, conforme a Figura 4.

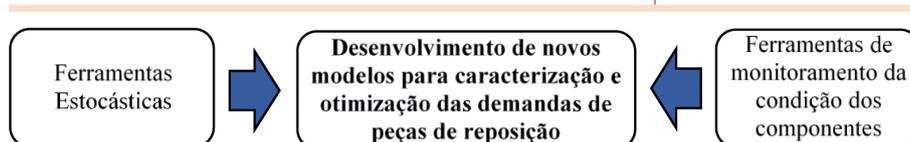


Figura 4: Oportunidades a serem tratadas em futuras pesquisas para caracterização e otimização das demandas de peças de reposição
Fonte: elaborado pelos autores.

4.2.2 Modelos utilizando ferramentas de suporte para as tomadas de decisão

É comum encontrar na literatura modelos de classificação de peças envolvendo apenas um critério para separá-las. Para modificar esse contexto tradicional, Braglia, Grassi e Montanari (2004) propõem um novo modelo de classificação envolvendo múltiplos critérios (ex. importância na produção, intensidade dos impactos ambientais, custo de reparação, custo de mercado e muitos outros) como ferramenta para o gerenciamento dos estoques de peças de reposição. Ao aplicar o modelo em uma fábrica de papel e celulose, houve uma redução de mais de 100 mil dólares no custo de estocagem ao eliminar alguns estoques de peças de reposição e reduzir o número de estoque para outras peças. Como sugestão de melhoramento do modelo, os autores comentam que é preciso considerar as políticas de manutenção durante a classificação da criticidade das peças de reposição.

Os outros dois modelos de decisão presentes na amostra deste trabalho utilizam modelagens matemáticas como suporte às tomadas de decisões, ao invés da abordagem de classificação. Primeiramente, Elwany e Gebraeel (2008) criaram um modelo de decisão orientado por sensor que permite, por meio de cálculos da degradação da vida restante dos elementos que constituem os equipamentos, melhores decisões quanto à substituição desses componentes e planejamento do estoque de peças de reposição. Ao aplicarem o modelo em um teste experimental com rolamentos de esfera, Elwany e Gebraeel (2008) conseguiram

estimar os tempos ideais de substituição e de pedidos de peças de reposição durante a degradação progressiva dos rolamentos.

Já o modelo de decisão proativo desenvolvido

por Bousdekis *et al.* (2017) é orientado por meio de uma Arquitetura Dirigida a Eventos (*Event Driven Architecture - EDA*), sistema esse que procura obter várias informações das máquinas utilizando sensores, a fim de fornecer os melhores tempos para realização da CBM nos equipamentos e de pedidos de peças de reposição via sistema *Just-In-Time*. Para a aplicação do modelo, foi escolhida uma indústria de componentes de iluminação automotiva que utiliza sensores para medir os níveis de poeira produzidos pelos equipamentos. Os resultados comprovaram que o modelo de decisão proativo reduz em cerca de 30% o tempo de inatividade e em torno de 10% os custos relacionados à manutenção e ao estoque de peças de reposição, apoiando a transformação da política CM para a CBM. Porém, não houve maiores detalhes com valores associados a melhoria da qualidade, confiabilidade, risco e manutenibilidade do sistema ao aplicar o modelo proposto. A não utilização do monitoramento por meio de sensores pode encarecer o sistema produtivo, podendo assim comprometer a atratividade das informações associadas.

O desenvolvimento de modelos que contemplem ferramentas que ajudassem na classificação da criticidade das peças de reposição em estoque envolvendo múltiplos critérios (como a ferramenta *Analytic Hierarchy Process – AHP* ou *Lógica Fuzzy*), considerando também informações sobre as operações de manutenção realizadas no sistema, essas otimizadas utilizando sensores de monitoramento nos equipamentos, seria uma oportunidade de pesquisa futura, conforme a Figura 5.

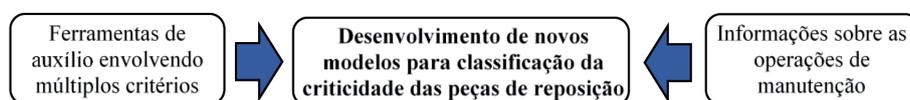


Figura 5: Oportunidades a serem tratadas em futuras pesquisas para suporte às tomadas de decisão

Fonte: elaborado pelos autores.

4.2.3 Modelos utilizando ferramentas para aprimoramento das políticas dos estoques

Quanto aos modelos que utilizam a simulação para aprimoramento das políticas dos estoques de peças de reposição, Ilgin e Tunali (2007) fazem uso de algoritmos genéticos para otimizar a disponibilidade das peças de reposição em estoque, junto com a PM. Diferente dos métodos clássicos de otimização, os algoritmos genéticos trabalham com várias soluções, ao invés de uma única. Ao aplicar esses algoritmos em um fabricante de blocos de motor para encontrar os níveis ideais de estoque para as peças de reposição e os melhores intervalos para a realização da PM, encontrou-se uma solução ideal que permite uma redução de até 53% no custo anual total de manutenção e uma melhoria de até 6% na produção mensal média da empresa estudada.

Outro trabalho que utiliza algoritmos genéticos com a intenção de diminuir a complexidade do modelo desenvolvido, este procurando obter o nível máximo ideal para os estoques de peças de reposição e para os estoques de segurança; suporte a PM; agendamento correto de peças de reposição; limite de falha potencial e taxas de redução dos custos envolvidos com manutenção e estoque, foi o estudo de Cai *et al.* (2017). Com o modelo aplicado envolvendo um componente presente em aeronaves, este sujeito às altas taxas de deterioração durante o seu desempenho, chegou-se a uma redução de, aproximadamente, 45% nos custos de PM e de estoques de peças de reposição, em comparação aos modelos utilizados anteriormente. O modelo não apenas reduziu a taxa de custo, mas também

a probabilidade de escassez de peças de reposição.

Para que um estoque de peças de reposição alcance o nível máximo ideal

de peças e forneça suporte às operações de PM, considerar a deterioração dos componentes em estoque é um fator importante que deve ser considerado pelos modelos de otimização envolvendo estoque de peças de reposição e manutenção. Essa informação é confirmada por Jiang, Chen e Zhou (2015) através de modelos de simulações realizados contendo dados de locomotivas elétricas utilizadas em estradas eslovenas.

Buscando reduzir os custos com estoques e com distribuições de peças de reposição em uma cadeia de suprimentos, visando também melhorar a eficiência das atividades de manutenção, Frazzon, Silva e Pires (2016) desenvolveu um modelo que, por meio de avaliações de desempenhos baseados em simulação, pudesse auxiliar os fornecedores de peças de reposição e os respectivos clientes a preverem: futuras demandas para cada peça de reposição, o monitoramento dos níveis de estoque de todos os participantes da cadeia e o volume ideal de distribuição. Ao aplicar o modelo desenvolvido em uma cadeia de suprimentos de atuadores elétricos localizada no Brasil, os resultados mostraram uma redução de 66% nos custos associados à distribuição de peças de reposição e de 47% nos custos envolvendo estoque de peças de reposição.

O último trabalho da amostra que faz uso de um modelo de simulação para otimização dos estoques de peças de reposição é o estudo de Poppe *et al.* (2017). A partir das simulações, os autores procuraram analisar os impactos que as operações de manutenção têm sobre as políticas de estoques de peças de reposição. Tomando como base uma empresa que opera no setor de fabricação de equipamentos pesados, constatou-se que as políticas PM e CBM exigem maior demanda de peças de reposição e, conseqüentemente, apresentam os maiores custos associados aos estoques. Para que haja diminuição dos custos envolvidos, é necessário fazer uso das informações de demanda avan-

çada, isto é, os pedidos de peças de reposição são baseados pelo histórico de falhas do sistema.

Em relação aos trabalhos que utilizam modelagens matemáticas, Noor *et al.* (2013) desenvolveu um sistema de gerenciamento de estoque informatizado (*Computerised Inventory Management System - CIMS*) para ajudar os gerentes do departamento de manutenção a controlar e gerenciar as peças de reposição em vários locais automaticamente. Ao aplicar o CIMS para o gerenciamento dos estoques de rolamentos em uma empresa presente na Malásia, constatou-se que o nível médio geral de estoque produzido pela técnica CIMS é inesperadamente superior ao nível de estoque do cenário existente. Isso ocorreu pelo fato de não ser considerado: os saldos de abertura das peças nos armazéns, a escassez de estoques e as mudanças nas demandas das peças de reposição. Os autores sugerem que o sistema CIMS pode ser melhorado se houver consideração do sistema de pontos de reabastecimento (níveis de estoques estabelecidos para realização dos pedidos de peças) para controle da demanda de peças de reposição e dos sistemas de revisão contínua ou periódica para o controle dos estoques.

Para Gu, Zhang e Li (2015), utilizar sistemas de pontos de reabastecimento para controle das demandas de peças de reposição é subjetivo e impreciso. A partir dessa premissa, os autores desenvolveram dois modelos matemáticos para prever demandas futuras de peças de reposição com base na distribuição de falhas de peças operantes nos equipamentos, onde o tempo ideal de pedido e a quantidade de pedidos podem ser encontrados, minimizando os custos totais que incluem o custo de compra, de manutenção e de escassez. Ao comparar os modelos matemáticos propostos com os modelos tradicionais, utilizando dados do setor aeronáutico dos Estados Unidos, os autores constataram que os novos modelos podem reduzir significativamente os custos totais, com maior efeti-

vidade para o segundo modelo (redução variando de 45 a 95%, aproximadamente).

Em relação as revisões para controle dos estoques, as revisões contínuas em estoques são comuns quando as demandas de peças são determinísticas. Ao se tratar de peças de reposição, é comum as demandas serem caracterizadas como intermitentes e, conseqüentemente, o uso de sistemas de revisão periódica nos estoques são os melhores para controle dos níveis de peças de reposição. Com o propósito de melhorar o controle desses níveis, Maukar, Widaningasih e Putra (2016) utilizam modelos probabilísticos de revisão periódica para determinar a melhor quantidade possível de peças mínimas e máximas desejadas em estoque. Ao aplicar os modelos em uma empresa de exploração e produção de petróleo na Indonésia, os autores conseguiram reduzir os custos de estoques em até 47% para algumas peças críticas do sistema, além de reduzir o risco de escassez de peças em 66% por ciclo de reposição.

Por fim, os dois modelos matemáticos restantes contidos na amostra analisam o nível e o custo total de estoque incluindo um sistema com diferentes peças de reposição. Moharana e Sarmah (2016) desenvolveram uma política de revisão periódica para controle dos estoques considerando várias peças de reposição, a fim de estimar o nível de pedidos de peças de reposição associadas. Eles utilizaram a ferramenta *data mining* para estudar a dependência entre as peças de reposição. Ao aplicarem a política de estoque para peças dependentes utilizadas em transportadores de correias em uma empresa de mineração localizada na Índia, houve a comprovação de que o nível de estoque de peças de reposição pode ser reduzido se as dependências entre as peças de reposição forem consideradas.

Keizer, Teunter e Veldman (2017) também desenvolveram uma política para controle de estoques de peças de reposição, considerando vários

componentes. Porém, eles incluíram a CBM para reduzir o número de falhas no sistema. Por meio de estudos numéricos, descobriu-se que uma política tradicional de estoque não é ideal para um sistema de vários componentes. Em vez disso, as decisões de manutenção e de estoques devem basear-se em todas as informações disponíveis, ou seja, no estado de cada componente, no número de peças de reposição e no tamanho e hora de chegada de cada pedido pendente, para que haja reduções significativas nos custos envolvidos.

Desenvolver novos modelos ou melhorar os existentes para o aprimoramento das políticas dos estoques de peças de reposição utilizando ferramentas de simulação (como os algoritmos genéticos) ou ferramentas matemáticas (como modelos probabilísticos de revisão periódica), estes contemplando informações das operações de manutenção realizadas no sistema, são oportunidades para futuras pesquisas, conforme a Figura 6.

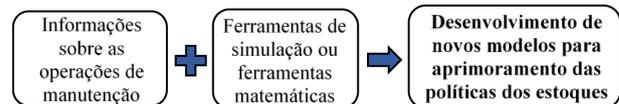


Figura 6: Oportunidades a serem tratadas em futuras pesquisas para aprimoramento das políticas dos estoques de peças de reposição

Fonte: elaborado pelos autores.

Além disso, desenvolver modelos de otimização considerando várias peças de reposição é uma área em ascensão ao envolver estoques de peças de reposição e operações de manutenção.

5 Considerações finais

Modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção vêm sendo desenvolvidos na literatura com o propósito de reduzir os custos associados aos estoques e a manutenção. No entanto, esses modelos são

apresentados isoladamente na literatura, não existindo uma análise conjunta dos mesmos. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar os modelos existentes conjuntamente, destacar os benefícios atribuídos a cada um deles e apresentar as possíveis oportunidades para trabalhos futuros na área.

Para tanto, primeiramente, foi feito um estudo conceitual sobre o gerenciamento de estoques de peças de reposição e as principais dificuldades encontradas durante o gerenciamento. Em seguida, para identificação dos modelos de otimização conjunta de estoques de peças de reposição e operações de manutenção, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, encontrando-se 18 modelos após uma varredura completa de 880 artigos.

Os modelos encontrados na revisão sistemática foram divididos de acordo com a sua utilidade na otimização do estoque de peças de reposição e com as políticas de manutenção abordadas por eles.

Para a caracterização e otimização das demandas de peças de reposição, o uso de ferramentas estocásticas aperfeiçoadas, como o sistema multiestágio, e o uso do monitoramento de condição dos componentes das máquinas podem melhorar a previsibilidade das aquisições de peças, havendo a possibilidade de futuras pesquisas tratarem ambas as ferramentas.

Quanto ao suporte para decisão durante o gerenciamento de estoques de peças de reposição, ferramentas que ajudem na classificação da criticidade das peças de reposição em estoque, como a AHP e a Lógica *Fuzzy*, considerando também informações sobre as operações de manutenção realizadas no sistema, essas otimizadas utilizando sensores de monitoramento nos equipamentos, podem levar a uma redução expressiva dos custos associados ao estoque e às operações de manutenção, criando a possibilidade desses resultados serem tratados em futuras pesquisas.

Por fim, modelos direcionados para a aprimoramento das políticas dos estoques de peças de reposição são fundamentais para o controle de estoques e realização das operações de manutenção. Buscar novas ferramentas matemáticas ou de simulação que otimizem os estoques de peças de reposição em tempo real, fazendo uso de informações das operações de manutenção realizadas no sistema, podem ser aprofundadas também em futuras pesquisas.

Apesar dos modelos apresentados estarem limitados às bases de dados selecionadas, estas bases são as que apresentam maior facilidade de acesso a milhares de títulos, uso de outros *softwares* no processo de triagem dos resultados encontrados e maior detalhamento sobre os trabalhos selecionados. Os achados apresentados neste artigo contribuem para o desenvolvimento do campo de conhecimento e podem servir de inspiração para o desenvolvimento de novos estudos, tanto para os acadêmicos como para profissionais das áreas de produção, manutenção e logística.

Referências

- Adebimpe, O. A., Oladokun, V., & Charles-Owaba, O. E. (2015). Preventive maintenance interval prediction: a spare parts inventory cost and lost earning based model. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 5(3), 811-817.
- Antosz, K., & Ratnayake, R. C. (2016). Classification of spare parts as the element of a proper realization of the machine maintenance process and logistics-case study. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 1389-1393.
- Basten, R. J. I. (2010). *Designing logistics support systems: level of repair analysis and spare parts inventories*. University of Twente.
- Bousdekis, A., Papageorgiou, N., Magoutas, B., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2017). A proactive event-driven decision model for joint equipment predictive maintenance and spare parts inventory optimization. *Procedia CIRP*, 59, 184-189.
- Boylan, J. E., & Syntetos, A. A. (2008). Forecasting for inventory management of service parts. *Complex System Maintenance Handbook*, 479-506.

- Braglia, M., Grassi, A., & Montanari, R. (2004). Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 10(1), 55-65.
- Cai, J., Yin, Y., Zhang, L., & Chen, X. (2017). Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory with appointment policy. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12.
- Cooper, H. M. (2010). *Research Synthesis and Meta-analysis: A Step-by-step Approach*. 4th ed. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Dias, M. A. P. (2000). *Administração de materiais: uma abordagem logística*. Editora Atlas SA.
- Elwany, A. H., & Gebraeel, N. Z. (2008). Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. *IIE Transactions*, 40(7), 629-639.
- Famfulík, J., Míková, J., Lánská, M., & Richtár, M. (2014). A stochastic model of the logistics actions required to ensure the availability of spare parts during maintenance of railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(1), 85-92.
- Frazzon, E. M., Silva, L. S., & Pires, M. C. (2016). Simulation-based performance evaluation of a concept for integrating intelligent maintenance systems and spare parts supply chains. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1074-1079.
- Freire, G. (2007). *Estudo comparativo de modelos de estoques num ambiente com previsibilidade variável de demanda*. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Galvão, T. F., & Pereira, M. G. (2014). Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 23, 183-184.
- Grondys, K., Kadlubek, M., & Starostka-Patyk, M. (2014). The management of the inventories of facturing equipment spare parts in Polish industrial enterprises. *Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, 195-200.
- Gu, J., Zhang, G., & Li, K. W. (2015). Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *Journal of Air Transport Management*, 42, 101-109.
- Horenbeek, V. A., Scarf, P. A., Cavalcante, C. A., & Pintelon, L. (2013a). The effect of maintenance quality on spare parts inventory for a fleet of assets. *IEEE Transactions on Reliability*, 62(3), 596-607.
- Horenbeek, V. A., Buré, J., Cattrysse, D., Pintelon, L., & Vansteenwegen, P. (2013b). Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 499-508.
- Huiskonen, J. (2001). Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. *International Journal of Production Economics*, 71(1-3), 125-133.
- Ilgın, M. A., & Tunali, S. (2007). Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5-6), 594-604.
- Jiang, Y., Chen, M., & Zhou, D. (2015). Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 191-205.
- Jones J. (2006). *Integrated logistics support handbook* (3a ed.). New York, USA: Mc-Graw-Hill.
- Keizer, M. C. O., Teunter, R. H., & Veldman, J. (2017). Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research*, 257(1), 209-222.
- Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76(2), 201-215.
- Riis, J. O., Luxhoj, J. T., & Thorsteinsson, U. (1997). Trends and perspectives in industrial maintenance management. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(6), 437-453.
- Maukar A. L., Widaninggsih I., & Putra A. P. (2016). Probabilistic periodic review system to determine minimum and maximum inventory replenishment levels in Acme Company. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(7), 4295-4304.
- Moharana, U. C., & Sarmah, S. P. (2016). Determination of optimal order-up to level quantities for dependent spare parts using data mining. *Computers & Industrial Engineering*, 95, 27-40.
- Noor A. M., Pang C. K., Liew W. Y. H., Semui H, Yew L. Z. (2013). An EOQ Based Multi-Storage Location of Spare Part Inventories: A Case Study. *Applied Mechanics and Materials*, 315, 733-738.
- Pinto, A. K., & Xavier, J. A. N. (2009). *Manutenção: função estratégica* (3a ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Poppe, J., Basten, R. J. I., Boute, R. N., & Lambrecht, M. R. (2017). Numerical study of inventory management under various maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety*, 262-273.
- Sharaf, M. A., & Helmy, H. A. (2001). A classification model for inventory management of spare parts. *International Conference on Production, Industrial Engineering, Design and Control-Pedac (PEDAC 2001)*, 375-382.



Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119-127.

Vaughan, T. S. (2005). Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 183-190.

Wang, W., & Syntetos, A. A. (2011). Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1194-1209.

Wang, W. (2012). A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 127-139.

Yang, K., & Niu, X. (2009). Research on the spare parts inventory. *Industrial Engineering and Engineering Management, 16th International Conference*, 1018-1021.

Zanjani, M. K., & Nourelfath, M. (2014). Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers. *International Journal of Production Economics*, 158, 44-53.

Zhang, F., & Guan, Z. (2016). Inventory management for spare parts on engineering machinery. *Chinese Automation Congress (CAC, 2015)*, 1951-1955.

Recebido em 27 fev. 2018 / aprovado em 19 abr. 2018

Para referenciar este texto

Campos, R. S., & Simon, A. T. Benefícios da otimização do estoque de peças de reposição em conjunto com as operações de manutenção. *Exacta*, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 63-80. jan./mar. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v17n1.8399>>