

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Patrícia Hiromi Iida

**SISTEMÁTICA DE APOIO À GESTÃO DE
PEÇAS SOBRESSALENTES NO ÂMBITO DA
MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

Porto Alegre

2015

Patrícia Hiromi Iida

**Sistemática de Apoio à Gestão de Peças Sobressalentes no Âmbito da Manutenção
Industrial**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientador: Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2015

Patrícia Hiromi Iida

**Sistemática de Apoio à Gestão de Peças Sobressalentes no Âmbito da Manutenção
Industrial**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Liane Werner, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Professor Juan Pablo Raggio Quintas, Dr. (DEMEC/UFRGS)

Luís Gustavo Soares Longhi, Dr. (PETROBRAS)

*“Make everything as simple as possible, but
not simpler.”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela vida.

Agradeço ao meu esposo Cristiano pelo apoio e incentivo para concluir o mestrado e pela compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador Ribeiro, pela paciência e ensinamentos, fundamentais na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos colegas de trabalho pelo incentivo e apoio recebido.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma sistemática de auxílio à tomada de decisão na definição das estratégias de suprimento de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Para atingir este objetivo, inicialmente, foram realizadas revisões da literatura para identificar os critérios utilizados na definição das estratégias de suprimento e, também, as variáveis de decisão utilizadas na definição dessas estratégias. Essas variáveis foram divididas em quatro classes: sistema/equipamento, peça, suprimento e estocagem. Em seguida foram elaborados dois questionários fechados, o primeiro a respeito das características e o segundo a respeito das variáveis de decisão de suprimento das peças sobressalentes. Estes questionários foram aplicados na caracterização das peças de dois equipamentos instalados em uma planta petroquímica. As respostas do questionário de critérios foram avaliadas possibilitando a identificação de lacunas existentes na estratégia atualmente adotada pela empresa em relação a algumas peças, além de apontar algumas oportunidades de otimização de estoques.

Palavras-chave: Manutenção; Peça Sobressalente; Gestão de Estoques; Tomada de Decisão; Indústria petroquímica.

ABSTRACT

This essay aims to develop a systematic to support spare parts provision decision-making in industrial maintenance. To achieve this goal, initially, literature reviews were conducted to identify the criteria used in the definition of supply strategies and also the decision variables used in the definition of these strategies. These variables were divided into four classes: system / equipment, spare part, supply and storage. Two closed questionnaires were developed. The first one was about the characteristics and the second one was about the decision variables of spare parts supply. These questionnaires were applied to characterize the parts of two equipment installed in a petrochemical plant. The characteristics questionnaire answers were evaluated, enabling the identification of gaps in the strategy currently adopted by the company for some parts, while pointing out some inventory optimization opportunities.

Key words: Maintenance; Spare Parts; Inventory Management; Decision-Making; Petrochemical Industry.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Comentários iniciais.....	10
1.2. Temas e objetivos.....	11
1.3. Justificativa	12
1.4. Método	13
1.5. Delimitações do trabalho	13
1.6. Estrutura do trabalho	14
1.7. Referências.....	15
2. PRIMEIRO ARTIGO.....	16
Critérios utilizados na gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial.....	16
2.1. Introdução	16
2.2. Método de pesquisa.....	18
2.3. Critérios encontrados	20
2.4. Conclusões	28
2.5. Referências.....	29
3. SEGUNDO ARTIGO.....	34
Variáveis de decisão na gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial	34
3.1. Introdução	35
3.2. Método de pesquisa.....	36
3.3. Variáveis de decisão encontradas	38
3.4. Conclusões	52
3.5. Referências.....	53
4. TERCEIRO ARTIGO	58
Proposta de ferramenta de diagnóstico e seleção de estratégia de fornecimento de peças sobressalentes	58
4.1. Introdução	59
4.2. Método de pesquisa.....	66
4.3. Estudo de caso 1	70
4.4. Estudo de caso 2.....	77
4.5. Conclusões	80

4.6. Referências.....	81
5. COMENTÁRIOS FINAIS.....	84
5.1. Conclusões.....	84
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	85

1. INTRODUÇÃO

1.1. Comentários iniciais

A confiabilidade e disponibilidade de uma planta industrial são dependentes das condições operacionais e da consistência de manutenção (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). Em um ambiente competitivo, há pressão para o aumento da utilização dos ativos e para a redução de custos (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Neste contexto, a manutenção industrial exerce um papel chave para manter os níveis de confiabilidade e de segurança da planta, contribuindo também para o desempenho global da companhia (WAEYENBERGH; PINTELON, 2002; WANG; CHU; MAO, 2008).

A manutenção depende do acesso a peças sobressalentes para reduzir a indisponibilidade e os custos incorridos por conta de falhas dos equipamentos produtivos (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008; VAN HORENBEEK et al., 2013; VAN JAARSVELD; DEKKER; JAARSVELD, 2011). Entretanto, manter disponibilidade instantânea, apoiada em quantidades infinitas de peças sobressalentes, é impraticável em termos financeiros, apesar de vários modelos de manutenção suporem isto (VAN HORENBEEK et al., 2013). Assim, fica evidente que a manutenção dos equipamentos e o gerenciamento do estoque de peças sobressalentes são programas interconectados, devendo ser considerados simultaneamente, pois são essenciais na otimização da operação de uma empresa (HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; VAN HORENBEEK et al., 2013). Conforme amplamente documentado na literatura, um sistema de suprimento eficiente é indispensável para o alcance do nível de disponibilidade desejado pelas indústrias (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013).

O estoque de peças sobressalentes diferencia-se de estoques de produtos intermediários e finalizados em vários aspectos, sendo a principal delas a demanda. Enquanto o estoque de produtos finalizados é direcionado por processos produtivos e demandas de consumidores, o estoque de peças sobressalentes é direcionado pela proteção contra falhas de equipamentos (PORRAS; DEKKER, 2008). Portanto, a política de manutenção é quem dita a necessidade de estocagem, o que torna as demandas estocásticas e irregulares (BAILEY; HELMS, 2007; KENNEDY; PATTERSON; FREDENDALL, 2002; VAN HORENBEEK et al., 2013). Adicionalmente, informações de confiabilidade das peças geralmente não estão disponíveis, dificultando a previsão da demanda de uma peça (KENNEDY; PATTERSON; FREDENDALL, 2002). Outra característica importante é a criticidade da peça no contexto produtivo. Esta característica pode fazer com que se mantenha um estoque da peça mesmo

sabendo que ela dificilmente será utilizada (BAILEY; HELMS, 2007). Outras características que dificultam o gerenciamento do estoque deste tipo de item são os longos prazos de entrega, os altos custos de aquisição, a alta especificidade e a obsolescência (BAILEY; HELMS, 2007; BREZAVSCEK; HUDOKLIN, 2003; KENNEDY; PATTERSON; FREDENDALL, 2002).

Devido a estas características, na prática, a decisão de estocagem e em quais quantidades geralmente é realizada de maneira empírica, baseada na experiência dos gestores (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). Para equipamentos novos, sem histórico algum, normalmente a decisão é baseada na recomendação do fabricante, o que costuma resultar em altos níveis de estoque (BAILEY; HELMS, 2007; SCHRODER, 1996). Somando-se a isso a aversão a riscos de indisponibilidade, é comum encontrar nas empresas uma cultura de excesso de estoque de peças sobressalentes (BAILEY; HELMS, 2007).

Vários modelos de otimização de estoques de sobressalentes foram estudados na literatura (HUISKONEN, 2001; VAN HORENBEEK et al., 2013). Grande parte deles foram baseados na disciplina de pesquisa operacional, cujas técnicas são aplicadas com sucesso na solução de problemas de nível de serviço para o consumidor (MARTIN et al., 2010). Entretanto, no caso das peças sobressalentes, o limitado histórico de falhas e a característica de demanda altamente estocástica e irregular, tornam a previsão de demanda muito difícil, dado que é indispensável na obtenção de parâmetros de controle nos modelos tradicionais (BAILEY; HELMS, 2007; PORRAS; DEKKER, 2008). Na adaptação dessas abordagens para peças sobressalentes, muitas vezes são utilizadas premissas muito restritivas, introduzidas para diminuir a complexidade matemática (HUISKONEN, 2001; MARTIN et al., 2010). Quando essas premissas são removidas, com o intuito de aumentar a representatividade dos modelos, a complexidade dos mesmos aumenta rapidamente, tornando difícil sua aplicação prática (HUISKONEN, 2001). Uma revisão da literatura demonstra que modelos quantitativos e técnicas de previsão de demanda não são suficientes para controlar estoques de sobressalentes e que existe a necessidade de uma visão holística da cadeia de suprimento para tornar as decisões e o planejamento mais efetivos (MARTIN et al., 2010).

1.2. Temas e objetivos

O tema desta dissertação é a gestão de peças sobressalentes, estudada no âmbito da manutenção industrial. Esta dissertação aborda os aspectos que norteiam a gestão dos sobressalentes, incluindo as estratégias de manutenção dos equipamentos e de aquisição das peças.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e apresentar uma sistemática de auxílio à tomada de decisão a respeito da gestão de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Entre os objetivos específicos podem ser citados:

- Identificar quais os fatores que influenciam a aquisição e estocagem de peças sobressalentes;
- Identificar quais as variáveis de decisão envolvidas na gestão de peças sobressalentes;
- Desenvolver uma sistemática de apoio à tomada de decisão baseada nos levantamentos anteriores;
- Testar a sistemática desenvolvida em estudos de caso.

1.3. Justificativa

O cenário atual de alta competitividade tem obrigado as empresas a aumentar a disponibilidade de seus processos e reduzirem seus custos operacionais (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). O tema desta dissertação, a gestão de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial, é um elemento-chave na redução dos custos de manutenção de plantas de processo e manufatura que, ao mesmo tempo, influi na disponibilidade das mesmas. Estima-se que metade dos custos de manutenção são atribuídos às peças sobressalentes, justificando a importância do tema escolhido (CAMPBELL, 1995).

Do ponto de vista acadêmico, a identificação dos fatores influentes na gestão de peças sobressalentes é um assunto relevante, devido à carência de uma visão mais holística na literatura (MARTIN et al., 2010). Não foi encontrado pela autora, estudos que identificassem, de maneira estruturada, os critérios e as variáveis de decisão utilizados na definição de uma estratégia suprimento de peças sobressalentes. Adicionalmente, o conhecimento dessas variáveis é indispensável na definição de uma estratégia eficaz de suprimento de peças sobressalentes.

Em seu estudo, Schroder (1996) estimou uma possível redução de 30% nos custos de estocagem de peças sobressalentes de baixa rotatividade, sem afetar a disponibilidade. Seu estudo foi baseado em 300 plantas industriais com estoque de peças avaliado em 3 bilhões de dólares, em valores da época. Bailey & Helms (2007) reportaram uma redução de 42% no estoque de peças sobressalentes de um conjunto de 11 plantas de geração de energia elétrica, estimado em 236,9 milhões de dólares na época do estudo. Sendo assim, o objetivo do trabalho justifica-se amplamente, podendo contribuir para uma diminuição significativa dos custos das plantas industriais.

1.4. Método

Esta pesquisa pode ser classificada como aplicada, pois os resultados têm aplicação imediata na resolução de um problema específico, no caso a gestão de peças sobressalentes. Sua abordagem pode ser considerada qualitativa, pois utiliza principalmente dados não numéricos. Do ponto de vista de seus objetivos, ela pode ser classificada como pesquisa exploratória, visando proporcionar maior familiaridade com o problema do suprimento de peças sobressalentes. Quanto aos procedimentos foram realizadas pesquisas bibliográficas para levantamento do estado da arte do assunto estudado e além de estudos de caso para testar e ilustrar a aplicação dos conceitos encontrados.

O desenvolvimento desta dissertação foi realizado em seis etapas. A primeira etapa envolve uma revisão da literatura a respeito dos critérios que influenciam as decisões relacionadas à gestão de peças sobressalentes. A segunda etapa também envolve uma revisão da literatura, mas a respeito das variáveis de decisão relacionadas com a gestão de peças sobressalentes. Nestas etapas, os critérios e as variáveis de decisão são classificadas, de maneira a facilitar a compreensão e também a execução das etapas posteriores.

A terceira etapa envolve o desenvolvimento de um diagrama que indica quais critérios encontrados na primeira etapa influenciam cada uma das variáveis de decisão encontradas na segunda etapa.

A quarta etapa envolve o desenvolvimento de questionários fechados com perguntas a respeito das características da peça sobressalente e da estratégia de suprimento das mesmas, baseados nos resultados das duas primeiras etapas.

A quinta etapa envolve a aplicação dos questionários a peças sobressalentes de equipamentos de uma instalação industrial. Esta foi realizada através de entrevistas com especialistas em manutenção dos equipamentos e reuniões para discussão das respostas.

Na última etapa, as respostas dos questionários foram avaliadas. O objetivo foi identificar eventuais lacunas na estratégia adotada pela empresa estudada e discutir possíveis alterações à luz do diagrama desenvolvido na terceira etapa.

1.5. Delimitações do trabalho

O presente trabalho aborda a gestão de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Não é escopo deste trabalho a gestão na visão de fabricantes e fornecedores destes

itens. Também não é abordada a gestão de peças aplicadas na manutenção de equipamentos não industriais.

A ferramenta desenvolvida foi testada em equipamentos de uma empresa do ramo petroquímico. O uso da ferramenta pode ser estendido a outros tipos de equipamentos e plantas industriais, mas não é escopo deste trabalho. Portanto, as conclusões aqui relatadas se aplicam ao sistema estudado e devem ser generalizadas com cautela.

Apesar de utilizar vários conceitos de confiabilidade, manutenção e gestão de estoques, não é escopo deste estudo a aplicação de técnicas quantitativas na estimativa de distribuição de falhas, na definição do plano de manutenção e na definição de parâmetros de estoques das peças. Essas atividades são importantes e podem ser realizadas após a utilização da sistemática aqui proposta.

1.6. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, justificando a importância do gerenciamento efetivo das peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Neste capítulo também são apresentados os objetivos, o método de trabalho, a estrutura da dissertação e as limitações deste estudo.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo que compõe esta dissertação. Neste artigo, é apresentada uma revisão da literatura acerca dos critérios que influenciam na definição da gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial. O principal resultado do artigo é um quadro com as características encontradas e suas respectivas referências. O texto apresenta, com detalhes, cada uma das características, explicitando sua influência na gestão de peças sobressalentes.

O terceiro capítulo apresenta um artigo contendo uma revisão da literatura acerca das variáveis de decisão utilizadas na gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial. O principal resultado do artigo é um quadro com as variáveis de decisão encontradas e suas respectivas alternativas. As variáveis são ilustradas através de exemplos da literatura e as alternativas são detalhadas a respeito do melhor cenário de sua aplicação.

O quarto capítulo apresenta o terceiro e último artigo desta dissertação. Neste artigo, é proposta uma sistemática de suporte à tomada de decisão a respeito da gestão de peças sobressalentes na indústria. A utilização da sistemática é testada e ilustrada através de dois estudos de caso.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, esclarecendo as limitações da pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões de trabalhos futuros com vistas à continuidade das pesquisas associadas à gestão de peças sobressalentes.

1.7. Referências

BAILEY, G. J.; HELMS, M. M. MRO inventory reduction—challenges and management: a case study of the Tennessee Valley Authority. **Production Planning & Control**, v. 18, n. 3, p. 261–270, abr. 2007.

BREZAVSCEK, A.; HUDOKLIN, A. Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, p. 112–117, mar. 2003.

CAMPBELL, J. D. **Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management**. Taylor & Francis, 1995. p. 204

GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 119, p. 199–2206, 2013.

HASSAN, J.; KHAN, F.; HASAN, M. A risk-based approach to manage non-repairable spare parts inventory. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 3, p. 344–362, 2012.

HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 125–133, 2001.

KENNEDY, W. J.; PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, p. 201–215, 2002.

MARTIN, H. et al. Integrating the spare parts supply chain: an inter-disciplinary account. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 2, p. 226–245, 2010.

PORRAS, E.; DEKKER, R. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. **European Journal of Operational Research**, v. 184, p. 101–132, 2008.

SCHRODER, R. M. Why not stock one? **Tappi Journal**, v. 79, n. 2, p. 153–156, 1996.

TSAKATIKAS, D.; DIPLARIS, S.; SFANTSIKOPOULOS, M. Spare parts criticality for unplanned maintenance of industrial systems. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 94–107, 2008.

VAN HORENBEEK, A. et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 499–508, 2013.

VAN JAARVELD, W.; DEKKER, R.; JAARVELD, W. VAN. Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, p. 1576–1586, 2011.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. A framework for maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v. 77, n. 3, p. 299–313, jun. 2002.

WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 14, n. 4, p. 387–401, 2008.

2. PRIMEIRO ARTIGO

Critérios utilizados na gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial

Resumo

Este artigo apresenta o resultado de uma revisão sistemática da literatura cujo objetivo foi levantar os critérios utilizados no gerenciamento do fornecimento de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Os critérios encontrados foram agrupados em características do sistema/equipamento, características da peça, características de suprimento e características de estocagem. A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de um quadro que organiza os critérios e suas diversas formas de apresentação, facilitando o processo de tomada de decisão por parte dos gestores de peças sobressalentes.

Palavras-chave: Sobressalentes; Estoques; Gerenciamento; Suprimento; Otimização; Manutenção; Revisão sistemática.

Abstract

This article presents the results of a systematic review of the literature whose goal were to raise the criteria used to manage the spare parts provision in industrial maintenance. The criteria found were grouped into system / equipment features, spare part features, supply features and storage features. The main contribution of this work is to present a framework that organizes the criteria and their various presentations, facilitating decision-making by spare parts managers.

Keywords: Spare parts; Inventory; Management; Logistics; Optimization; Maintenance; Systematic review.

2.1. Introdução

As empresas de capital intensivo têm sofrido grande pressão para reduzir seus custos operacionais e aumentar a disponibilidade de seus equipamentos (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004; GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Essa disponibilidade operacional é altamente dependente da taxa de utilização e da consistência de manutenção da

planta de processo (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). Por consequência, a área de manutenção tem desempenhado papel chave no aumento de confiabilidade e segurança dos processos produtivos (WANG; CHU; MAO, 2008b).

A indisponibilidade de um equipamento pode ser drasticamente reduzida se as peças sobressalentes necessárias para o reparo estão prontamente disponíveis quando o equipamento falha (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004; HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003; VAN JAARSVELD; DEKKER, 2011). Quando as peças sobressalentes não estão na fábrica, perdas maiores associadas à linha parada e mão-de-obra ociosa podem ocorrer (HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; VAN HORENBEEK et al., 2013; VAN JAARSVELD; DEKKER, 2011). Entretanto, a estocagem descomodada de peças sobressalentes também pode gerar custos substanciais; portanto, a decisão de armazenar ou não essas peças, e em quais quantidades, não é um processo trivial (VAN JAARSVELD; DEKKER, 2011).

Para se ter uma ideia do quanto representa este estoque de sobressalentes em números, em uma fábrica de semicondutores em Taiwan o estoque de sobressalentes foi avaliado em 15 milhões de dólares (CHANG; CHOU; HUANG, 2005); em um conjunto de 11 termelétricas, o estoque em 1990 era de 236,9 milhões de dólares (BAILEY; HELMS, 2007); em um complexo petroquímico, o estoque em 2000 era de 27 milhões de euros (PORRAS; DEKKER, 2008); em uma petroquímica, somente os estoques de itens de baixa demanda foram avaliados em 50 milhões de euros (MOLENAERS et al., 2012); em um conjunto de 20 plantas de papel e celulose, o estoque foi avaliado em alguns milhões de euros (BRAGLIA; FROSOLINI, 2013). Portanto, todo desenvolvimento no gerenciamento deste tipo de estoque é desejável e útil, pois reduz o investimento e a área de estocagem, melhorando o desempenho empresarial (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004).

A demanda de peças sobressalentes é determinada pela manutenção, tanto corretiva quanto preventiva, para cada peça sobressalente (VAN HORENBEEK et al., 2013). A decisão de estocagem geralmente é realizada de maneira empírica pelo engenheiro de manutenção da planta, utilizando sua própria experiência e interpretação pessoal das estatísticas relevantes existentes (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). É evidente que a manutenção e o gerenciamento de estoques são fortemente interconectados e devem ser considerados de maneira conjunta na otimização dos resultados de operação de uma empresa (VAN HORENBEEK et al., 2013).

A predição e otimização de peças sobressalentes são problemas complexos e requerem a identificação de todos os fatores influentes, assim como a seleção do modelo matemático apropriado para quantificar seus efeitos na quantidade necessária de peças sobressalentes (BARABADI; BARABADY; MARKESET, 2014). Um fator primordial que dificulta a obtenção dos parâmetros de controle de estoque de peças sobressalentes é a demanda, que geralmente é baixa, estocástica e irregular (PORRAS; DEKKER, 2008). Também é necessário considerar simultaneamente fatores não mensuráveis, tais como, segurança e qualidade; além de fatores mensuráveis, tais como custo de manutenção, custo de estocagem e custo de indisponibilidade (CHENG; TSAO, 2010).

Considerando esse cenário, este artigo tem o objetivo de levantar os critérios que são utilizados na tomada de decisão a respeito da estratégia de suprimento de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Foram avaliados diversos artigos que tratam do assunto para destacar as informações relevantes a serem utilizadas pelos gestores na tomada de decisão. Desta forma, pretende-se que este trabalho sirva de base para a identificação de informações relevantes para levar a termo a política de estoque de sobressalentes.

O artigo está organizado como segue. Na Seção 2.2, o método de pesquisa é descrito. Na Seção 2.3, são descritos os critérios que baseiam as decisões acerca da estocagem de sobressalentes que foram encontrados na literatura. Finalmente, na Seção 2.4, são feitas as conclusões.

2.2. Método de pesquisa

Esta pesquisa pode ser classificada, do ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada, pois os resultados têm interesse imediato para empresas que desejam aprimorar métodos de controle de peças sobressalentes. Quanto à abordagem, a pesquisa é considerada qualitativa, pois os resultados são apresentados de maneira descritiva. Com relação aos objetivos, a pesquisa é descritiva, pois realiza análise dos dados reunidos na revisão sistemática e descreve os resultados a partir de diferentes critérios de análise. Considerando os procedimentos, esta pesquisa é classificada como bibliográfica, visto que é baseada em estudos já publicados sobre o assunto.

Este estudo foi realizado através de uma revisão sistemática da literatura conforme proposto por Kitchenham (2004). Segundo essa autora, a revisão sistemática é um meio de identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis que são relevantes para uma questão de pesquisa, tópico ou fenômeno de interesse. Ela é composta pelas seguintes etapas: (i)

estabelecer as estratégias que serão utilizadas nas buscas, (ii) selecionar os estudos, (iii) realizar a avaliação da qualidade dos estudos, (iv) extrair os dados e (v) sintetizá-los.

A estratégia de busca de referências foi baseada apenas em artigos de periódicos das bases *EMERALD*, *Science Direct* e *ISI Web of Knowledge* publicados a partir de 2003. As palavras-chave procuradas nos campos título, resumo e palavras-chave foram *maintenance* e *spare parts* com o operador booleano *AND*. As buscas foram realizadas no período de 13/09/2013 a 13/10/2013. Desta forma foram encontrados 154 artigos distintos.

De maneira a limitar a qualidade dos artigos selecionados, foram excluídos os artigos de periódicos cujo fator de impacto do ano de 2013 levantado pela *Thomson Reuters* fosse menor que 0,50 ou cuja estatística de citações por documento em 2 anos de 2013 da *SCIMAGO* fosse menor que 0,75. Através da leitura do título e do resumo de cada artigo encontrado, foram mantidos artigos que tratam de estratégias de suprimento e armazenagem de sobressalentes; políticas de gerenciamento de estoques de sobressalentes no âmbito da manutenção industrial; modelos de otimização de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (RAM - *Reliability, Availability and Maintainability*) considerando peças sobressalentes; e de classificação de peças sobressalentes. Os artigos de revisão da literatura foram excluídos, servindo apenas como fonte de novas referências. Em caso de dúvida, o artigo era lido por inteiro para determinar sua exclusão ou não. Após esta etapa foram mantidos 36 artigos.

As referências bibliográficas dos artigos selecionados e dos artigos de revisão bibliográfica foram examinadas para a identificação de outros estudos pertinentes. Estes estudos foram avaliados através dos mesmos critérios anteriores e também tiveram suas referências bibliográficas examinadas, acrescentando mais 29 artigos, totalizando 65 artigos relevantes para este trabalho.

Após a leitura do texto completo de cada artigo, foram registrados os critérios utilizados na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes. Estas informações foram categorizadas em quatro classes distintas: características do sistema/equipamento, características da peça sobressalente, características do suprimento da peça sobressalente e características de estocagem da peça sobressalente, conforme Figura 2.1. A seção seguinte detalha cada uma destas características.



Figura 2.1. Critérios utilizados na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes encontrados na literatura. Fonte: elaborada pela autora.

2.3. Critérios encontrados

Os critérios encontrados estão resumidos na Tabela 2.1. A primeira coluna apresenta as quatro classes mencionadas anteriormente. Na segunda coluna estão listados os critérios encontrados. A terceira coluna contém a quantidade de artigos que utilizaram tal critério. Na quarta coluna foram identificadas as formas de apresentação de cada critério que variam de autor para autor. Finalmente, na última coluna, são listados os artigos onde foram identificados cada critério. Cada número corresponde a um artigo listado nas referências bibliográficas. Na sequência, cada critério é detalhado, assim como suas formas de apresentação e seus possíveis efeitos na política de estoques.

2.3.1. Características do sistema/equipamento

Esta primeira classe compreende as características do processo produtivo, do equipamento e do processo de manutenção.

2.3.1.1. Quantidade de peças idênticas em operação

Diferentemente do controle de estoques tradicional, no controle de estoque de peças sobressalentes não são supostas populações infinitas de consumidores, fazendo com que a demanda por sobressalentes dependa da quantidade de peças em operação (LOUIT et al., 2010). Quando as demandas são baixas e irregulares, o controle de estoque torna-se mais difícil (HUISKONEN, 2001), pois como mostrado por Kilpi & Vepsäläinen (2004), quanto maior a quantidade de aeronaves em uma frota, menor é a quantidade de peças sobressalentes em estoque por aeronave. Assim, este critério é importante para agregar a demanda total da peça e pode influenciar na gestão de estoque dos sobressalentes.

Dentro dos artigos encontrados, a quantidade total de peças em operação foi levada em consideração através da quantidade de equipamentos idênticos, da quantidade de equipamentos que compartilham a mesma peça ou ainda da quantidade de peças idênticas em um mesmo equipamento. Esta quantidade é totalizada em termos da quantidade de peças em operação ou ainda através da demanda total da peça. Um caso especial é a utilização de redundância de componentes em um mesmo equipamento onde, por exemplo, um sistema é considerado apto para realizar suas funções quando pelo menos k componentes de um total de N estão ativos (CHAKRAVARTHY; GÓMEZ-CORRAL, 2009; DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004).

2.3.1.2. Impacto da falha da peça para o processo produtivo

A consequência causada pela falha da peça quando um sobressalente não está disponível, também conhecida como criticidade, é avaliada de maneira quantitativa, principalmente através de custos decorrentes da falha, ou através de parâmetros qualitativos. Geralmente, quanto menor a criticidade, menor a quantidade de peças que devem ser estocadas (BAILEY; HELMS, 2007).

Uma peça sobressalente é considerada crítica se a sua falha ou mau funcionamento pode resultar em consequências severas para a planta, como por exemplo, consequências relacionadas à segurança, contaminação ambiental, perda de produção ou perda de qualidade (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004; MOLENAERS et al., 2012).

A qualificação da criticidade pode ser realizada através do cálculo do risco da falha do componente, ou seja, do produto da probabilidade pela consequência da falha (HASSAN; KHAN; HASAN, 2012), assim como é feito nas análises de FMECA (*Failure Modes and Effects Criticality Analysis*) (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). Outra maneira prática, utilizada por Bailey & Helms (2007), é a seleção das peças críticas através do potencial de perda de geração elétrica nas termelétricas estudadas.

Tabela 2.1. Critérios utilizados na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes.

Classe	Critério	Frequência	Forma de apresentação	Referências
Características do sistema / equipamento	Quantidade de peças idênticas em operação	49	Quantidade de peças idênticas em operação; quantidade de equipamentos que compartilham mesma peça; quantidade de peças idênticas em um mesmo equipamento (redundâncias); demanda total de uma peça	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [17] [23] [24] [26] [27] [28] [29] [31] [32] [33] [34] [39] [42] [44] [45] [46] [48] [49] [50] [51] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [68]
	Impacto da falha da peça para o processo produtivo	46	Impacto da falha da peça; custo da falta de estoque	[1] [3] [4] [5] [8] [10] [16] [17] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [26] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [45] [46] [47] [48] [50] [51] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [63] [64] [65] [66] [67] [68]
	Manutenabilidade equipamento	22	Tempo de remoção da peça; tempo de instalação da peça; tempo de substituição; tempo entre a falha e a substituição da peça	[3] [6] [12] [14] [15] [16] [17] [20] [26] [28] [32] [36] [37] [39] [40] [43] [41] [44] [48] [51] [53] [68]
	Custo de manutenção do equipamento	17	Custo de material; custo de pessoal; custo de inspeção; custo de setup de manutenção; custo de descarte de peça defeituosa	[15] [16] [19] [24] [26] [33] [37] [39] [40] [41] [44] [48] [55] [56] [57] [58] [59]
Características da peça	Confiabilidade da peça	65	Taxa de falha; padrão de demanda; previsibilidade; falha induzida pela manutenção; demanda; degradação; intensidade de operação	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [26] [27] [28] [29] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]
	Manutenabilidade da peça	25	Tempo de reparo da peça; local de reparo; modularidade; possibilidade de monitoramento	[3] [6] [7] [11] [12] [13] [14] [15] [17] [27] [28] [32] [34] [36] [39] [44] [49] [50] [61] [62] [63] [64] [65] [67] [68]
	Custo de reparo da peça	7	Custo de material; custo de pessoal; custo de inspeção; custo de setup de manutenção	[4] [15] [39] [44] [47] [49] [65]
Características do suprimento da peça	Custo de colocação de pedido	29	Custo de pedido; custo de manuseio; custo de transporte; custo de chamadas telefônicas; custo de inspeção; custo de pagamento da fatura; custo de registro das peças; custo de pedido em emergência	[3] [5] [8] [16] [21] [24] [26] [27] [31] [34] [35] [40] [41] [42] [43] [45] [48] [54] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66]
	Tempo de espera até fornecimento peça	46	Prazo de entrega; tempo de espera; tempo de pedido; tempo de transporte da peça; tempo de fabricação/aquisição	[1] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [11] [16] [17] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [26] [28] [31] [32] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [41] [42] [43] [45] [46] [47] [51] [53] [54] [55] [56] [57] [59] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67]
	Quantidade de fornecedores potenciais	14	Fornecedores/fabricantes; outros centros de estoque compartilhado; peças comuns; peças específicas	[3] [4] [22] [28] [31] [38] [49] [50] [61] [63] [64] [65] [66] [67]
Características de estocagem do sobressalente	Custo da peça sobressalente	35	Custo peça; custo módulo	[1] [2] [3] [4] [5] [10] [11] [16] [19] [21] [22] [23] [24] [26] [29] [31] [33] [34] [36] [37] [39] [40] [41] [42] [44] [47] [48] [49] [50] [55] [56] [57] [59] [65] [66]
	Custo de armazenamento	38	Custo de estocagem; custo de oportunidade; depreciação; custo espaço requerido para armazenamento; obsolescência; deterioração	[4] [5] [8] [15] [16] [19] [21] [23] [24] [26] [27] [29] [31] [33] [34] [35] [36] [39] [42] [44] [45] [46] [47] [48] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [66] [67]

Na otimização de estoques de sobressalentes, é comum utilizar a minimização de custos como função objetivo, tornando-se necessário definir, de maneira confiável, o custo da falta do sobressalente, geralmente expressos por item por unidade de tempo (LOUIT et al., 2010). Além das perdas de produção, que geralmente tem custos elevados (LOUIT et al., 2010), podem existir outros inconvenientes, como no exemplo de empresas de energia elétrica, a operação de outras unidades de geração de energia menos econômicas ou mesmo a compra de energia de concorrentes (BAILEY; HELMS, 2007). Gan et al. (2013) consideraram os custos de armazenamento do estoque intermediário, o custo de falta deste estoque e o custo de descarte do estoque excedente em sistemas com duas máquinas e estoque intermediário.

Entretanto, o cálculo destes custos não é uma tarefa trivial (LOUIT et al., 2010), o que leva muitos autores a encontrarem outras maneiras de considerar a criticidade em seus modelos. As consequências da falha podem ser complexas e não quantificáveis em termos monetários (LOUIT et al., 2010). Adicionalmente, os custos de indisponibilidade de peças similares de sistemas distintos não são necessariamente iguais e, se existem duas peças das quais apenas uma é necessária para manter a planta operando, a falha de uma não necessariamente tem consequências econômicas severas (VAN JAARVELD; DEKKER, 2011).

Uma abordagem diferente e prática proposta por Zeng et al. (2012) é a quantificação da criticidade através do tempo no qual a falha deve ser corrigida. Quanto menor este tempo mais crítica é a peça.

2.3.1.3. Manutenibilidade do equipamento

A manutenibilidade do equipamento é representada pelo tempo de substituição da peça defeituosa no equipamento. São considerados outros tempos além da duração efetiva da manutenção, excetuando-se o tempo de aquisição da peça.

Várias formas de expressar esta característica foram encontradas: tempo médio entre a ocorrência da falha de um item e sua substituição física (CESARO; PACCIARELLI, 2011); distribuição de probabilidades da duração da substituição da peça, (DIALLO; AIT-KADI; CHELBI, 2008); tempo de remoção da peça defeituosa e tempo de instalação da peça funcional de maneira separada, com o objetivo de avaliar o efeito da canibalização na necessidade de estoque de sobressalentes (SALMAN et al., 2007).

Essa variável influencia no tempo de indisponibilidade do equipamento, o que afeta a decisão de estocagem de uma peça (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS,

2008). O tempo necessário para realizar uma manutenção também é utilizado como uma das entradas de modelos de otimização conjunta da periodicidade de manutenção preventiva e quantidade de peças estocadas (ILGIN; TUNALI, 2007; NGUYEN; BAGAJEWICZ, 2010).

2.3.1.4. Custo de manutenção do equipamento

O custo de manutenção abrange os custos de materiais, de mão-de-obra, custo de inspeção e de setup de manutenção. Em alguns artigos, o custo da peça sobressalente foi considerado em conjunto com os custos de manutenção (BREZAVSCEK; HUDOKLIN, 2003; SHEU; CHIEN, 2004; WANG; CHU; MAO, 2008a, 2009). Estes custos influenciam na tomada de decisão acerca da melhor estratégia de manutenção. O custo de remoção da peça defeituosa e o custo de instalação da peça funcional foram consideradas de maneira separada por Salman et al. (2007). No modelo proposto por Li & Ryan (2011), o custo de descarte da peça defeituosa após a remoção foi considerado. Na estratégia de manutenção preditiva, alguns autores consideraram os custos de inspeção do sistema (WANG; CHU; MAO, 2008a, 2008b, 2009; WANG, 2011).

2.3.2. *Características da peça sobressalente*

Nesta categoria foram incluídas as características relacionadas à peça: confiabilidade, manutenibilidade e custo do reparo da peça.

2.3.2.1. Confiabilidade da peça sobressalente

Quanto menor a taxa de falha de um componente, menor a necessidade de peças sobressalentes em estoque, de forma que é possível reduzir a necessidade de sobressalentes através do aumento da confiabilidade da peça (KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004; MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005; WU; HSU, 2008). A confiabilidade de uma peça é muito dependente da qualidade de seu projeto e fabricação (KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004).

Normalmente, a confiabilidade da peça sobressalente é representada através de distribuições de probabilidade de falha. Alguns artigos levam em consideração a influência de outras variáveis além da confiabilidade intrínseca da peça, como a intensidade de operação e ambiente operacional. Outra maneira de representá-la é através da demanda consolidada da peça sobressalente. Na prática, a demanda é estimada com base em dados de falhas ou substituições reais (LOUIT et al., 2010).

Existem vários modelos de distribuição de probabilidades. Porras & Dekker (2008) avaliaram o desempenho de quatro métodos de distribuição de demanda. Quando há a superposição de demandas de um número relativamente alto de peças, a partir de 10 unidades (WANG; PECHT; LIU, 2012), o intervalo entre falhas se aproxima de uma distribuição exponencial (LOUIT et al., 2010).

Na prática, o mais simples é estimar a quantidade futura de sobressalentes através da verificação da demanda em anos anteriores (BAILEY; HELMS, 2007). Entretanto esta forma não é conveniente quando o inventário tem baixa rotatividade ou em projetos novos (BAILEY; HELMS, 2007; LOUIT et al., 2010). No estudo de Porras & Dekker (2008), verificou-se que 90% das peças sobressalentes tiveram uma demanda relativamente baixa ao longo de um período de 5 anos e que as demandas altas e irregulares são causadas principalmente por manutenções preventivas. Assim, recomenda-se que estes eventos sejam identificados para melhor controle do estoque de peças.

As funções de confiabilidade representam o tempo de falha de uma população de componentes, o qual depende do processo físico de falha. Entretanto, a degradação de componentes idênticos pode ser drasticamente distinta, pois das condições ambientais às quais o mesmo está exposto (ELWANY; GEBRAEEL, 2008; WANG; CHU; MAO, 2009). Esta degradação pode ser acompanhada através de algum fenômeno físico, tais como, aumento de vibração, mudanças de temperatura e aumento na propagação de trincas, que por sua vez pode ser monitorada através de sensores (ELWANY; GEBRAEEL, 2008). Estas informações podem ser correlacionadas com as taxas de falha através de modelos matemáticos e utilizadas para previsão de demanda de peças sobressalentes (BARABADI; BARABADY; MARKESSET, 2014; ELWANY; GEBRAEEL, 2008; WANG; CHU; MAO, 2009; WANG; PECHT; LIU, 2012).

Wang (2011, 2012) considerou o processo de falha como ocorrendo em dois estágios: ponto inicial até um defeito identificável durante uma inspeção e deste ponto até a falha. Shum & Gong (2007) utilizaram o aumento do custo de operação como uma medida da degradação do equipamento. Nguyen & Bagajewicz (2010) levaram em consideração diferentes tipos de modos de falha.

2.3.2.2. Manutenibilidade da peça

As peças sobressalentes podem ser reparáveis e não reparáveis. Uma peça é reparável quando, após a falha, ela é reparada ou recondicionada de volta a um estado operacional

(LOUIT et al., 2010). Por sua vez, peças são ditas como não reparáveis quando seu reparo é tecnicamente ou economicamente inviável (LOUIT et al., 2010).

Geralmente, peças caras são reparadas se tecnicamente possível (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004). Quando as peças são reparáveis, é possível levantar qual o tempo de reparo de uma peça, bem como quais os recursos necessários para isto. Quanto menor o tempo de reparo de uma peça, menor é a necessidade de estoque de sobressalentes (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004; KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2005).

Também foram encontrados artigos onde os sistemas são estruturados em módulos, onde cada módulo possui várias peças, geralmente não reparáveis. Os sistemas técnicos são decompostos nas chamadas SRUs e LRUs. SRUs (*Shop Replaceable Unit*) são subconjuntos de LRUs (*Line Replaceable Unit*); estas últimas podem ser substituídas em campo, enquanto as primeiras somente podem ser substituídas na oficina (COSTANTINO; GRAVIO; TRONCI, 2013; WU; HSU, 2008).

2.3.2.3. Custo de reparo da peça

O custo de reparo da peça geralmente abrange os custos de materiais e de mão-de-obra (NGUYEN; BAGAJEWICZ, 2010). Este valor é decisivo na escolha entre reparar uma peça ou descartá-la (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004).

2.3.3. Características do suprimento da peça sobressalente

Neste grupo, se enquadram o custo de colocação de pedido junto ao fornecedor, tempo de espera até fornecimento da peça e a quantidade de fornecedores potenciais.

2.3.3.1. Custo de pedido

O custo de pedido representa o custo associado com a colocação de um pedido de uma peça sobressalente, que inclui telefonemas, inspeção e manuseio dos itens recebidos, pagamento de faturas e registro das peças, sendo que esse custo pode depender da quantidade de peças incluídas no pedido (PORRAS; DEKKER, 2008). Quando as peças são caras, o custo de pedido torna-se insignificante se comparado ao custo do sobressalente, sendo considerados como um custo único (LOUIT et al., 2010). É esperado que o intervalo entre pedidos e a quantidade de peças estocadas aumente com o custo de pedido (WANG, 2012).

O custo mais comumente levado em consideração é o de transporte. No caso de transferências entre locais de armazenamento, este custo geralmente é uma quantia fixa dependente dos locais em que as transferências ocorrem, sem levar em consideração a quantidade de peças transportadas (KUKREJA; SCHMIDT, 2005; WONG et al., 2005). Também é comum diferenciar os custos de pedidos normais de emergenciais (GIRI; DOHI; KAIO, 2005).

2.3.3.2. Tempo de espera até fornecimento da peça

O tempo de espera até o fornecimento da peça contempla o momento da falha da peça, incluindo o tempo de realização do pedido, fabricação da peça e transporte, até a efetiva chegada da peça. Atrasos na emissão do pedido e a necessidade de transportes especiais aumentam o prazo de entrega (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Em casos de compartilhamento de estoques de sobressalentes, aparece a figura do tempo de transferência, onde são incluídos os tempos de preparação, transporte e disponibilização de recursos de transporte (WONG; CATTRYSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005).

A política de aquisição de sobressalentes é sensível aos diferentes cenários de prazos de entrega (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Geralmente, quanto menor o tempo de espera pela peça, menor deve ser a quantidade de peças estocadas e o ponto de reposição de estoque e também é menor o custo total da política (BAILEY; HELMS, 2007; WANG; CHU; MAO, 2008, 2009). Em uma política de manutenção preditiva, quanto maior o tempo de espera, menor deve ser o intervalo de inspeções e mais cedo deve ser feito o pedido de compra, a fim de se obter altos níveis de disponibilidade e confiabilidade (WANG; CHU; MAO, 2008). Em um sistema redundante, a confiabilidade diminui com o aumento do tempo de espera (CHAKRAVARTHY; GÓMEZ-CORRAL, 2009). Quando há mais de um fornecedor disponível, sugere-se que seja escolhido o de menor prazo de entrega (WANG; CHU; MAO, 2008).

2.3.3.3. Quantidade de fornecedores potenciais

Os fornecedores potenciais podem ser fabricantes de peças e equipamentos, distribuidores ou outras plantas que utilizam a mesma peça (BRAGLIA; FROSOLINI, 2013; WU; HSU, 2008). Quando uma peça sobressalente é prontamente disponível através de vários fornecedores, a dificuldade em gerenciar o estoque dessa peça é baixa (ZENG; WANG; HE, 2012). No caso de compartilhamento de estoques, quanto mais empresas compartilham

estoques, maior a quantidade de peças passíveis de compartilhamento (BRAGLIA; FROSOLINI, 2013).

2.3.4. Características de estocagem da peça sobressalente

Neste grupo são incluídos os custos do sobressalente em si e os custos de armazenamento das peças.

2.3.4.1. Custo do sobressalente

O custo do sobressalente influencia na escolha da estratégia de manutenção de um equipamento. Quanto mais cara uma peça, mais atrativa a manutenção preditiva. Na otimização da manutenção preventiva o custo da peça deve ser levado em consideração, pois quanto menor o intervalo de tempo entre substituições maior é o custo da política. Além disso, altos custos tornam a estocagem do sobressalente uma opção não atrativa. Por outro lado, para itens de baixo custo, a política de reposição deve ser eficiente de maneira que os custos administrativos não sejam injustificadamente altos em relação ao custo da peça (HUISKONEN, 2001).

Em diversos artigos estudados, o custo do sobressalente foi considerado em conjunto com o custo de manutenção do equipamento (BREZAVSCEK; HUDOKLIN, 2003; DIALLO; AIT-KADI; CHELBI, 2008; ELWANY; GEBRAEEL, 2008; SHEU; CHIEN, 2004; WANG; CHU; MAO, 2008, 2009). Wu & Hsu (2008) propuseram um modelo de otimização da escolha do fornecedor da peça baseado nos diferentes custos de sobressalentes onde, quanto menor a taxa de falha da peça, maior é o custo do sobressalente.

2.3.4.2. Custo de armazenamento

Os custos de armazenamento abrangem o custo do capital imobilizado no estoque, os custos operacionais de armazenamento, deterioração ou depreciação monetária dos itens e a obsolescência das peças (LOUIT et al., 2010). Geralmente é utilizada uma taxa anual por custo por item. Outra maneira de avaliar este quesito é através do espaço necessário para armazenar as peças sobressalentes (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004; MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005). Quanto maior o custo de armazenamento, menor tende a ser a quantidade de peças estocadas (WANG; CHU; MAO, 2009).

2.4. Conclusões

As peças sobressalentes são importantes na manutenção da disponibilidade de equipamentos do processo produtivo, reduzindo assim as perdas de produção e qualidade. Por

outro lado, os altos níveis de estoque custam caro, tanto pela imobilização de capital, quanto pela manutenção de um espaço adequado para armazenamento. Assim, muitos estudos são realizados na tentativa de otimizar a quantidade de sobressalentes estocados. Para isso, deve-se conhecer os fatores que influenciam as decisões acerca da aquisição e estocagem de peças sobressalentes. Desta forma, neste artigo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para levantar quais as informações utilizadas na gestão do suprimento de sobressalentes.

Através do protocolo de pesquisa utilizado, foram revisados 65 artigos. A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de um quadro que organiza as informações que podem ser utilizadas na definição de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes, facilitando a tomada de decisão. Os critérios foram separados em quatro classes: características do sistema/equipamento, características da peça, características de suprimento da peça e características de estocagem da peça. Para cada critério foram identificadas as diferentes formas de apresentação encontradas nas referências. Além disso, cada critério foi detalhado, explicitando sua influência na política de estocagem de peças sobressalentes.

Foi identificado que alguns dos critérios mais utilizados advêm da teoria de controle de estoques tradicional que leva em consideração a demanda durante o prazo de entrega e os custos de pedido e de armazenamento. Outro critério preponderante é o impacto da falha da peça no processo produtivo, que traz um senso de priorização na aquisição de peças sobressalentes. Também é notável a quantidade de artigos que tratam da otimização conjunta da política de manutenção e da política de suprimento da peça sobressalente.

2.5. Referências

- [1] BAILEY, G. J.; HELMS, M. M. MRO inventory reduction—challenges and management: a case study of the Tennessee Valley Authority. **Production Planning & Control**, v. 18, n. 3, p. 261–270, abr. 2007.
- [2] BARABADI, A.; BARABADY, J.; MARKESET, T. Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization - A case study. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 123, p. 1–7, 2014.
- [3] BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M. Virtual pooled inventories for equipment-intensive industries. An implementation in a paper district. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 112, p. 26–37, abr. 2013.
- [4] BRAGLIA, M.; GRASSI, A.; MONTANARI, R. Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 1, p. 55–65, 2004.
- [5] BREZAVSCEK, A.; HUDOKLIN, A. Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, p. 112–117, mar. 2003.
- [6] CESARO, A.; PACCIARELLI, D. Performance assessment for single echelon airport spare part management. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 1, p. 150–160, 2011.

- [7] CHAKRAVARTHY, S. R.; GÓMEZ-CORRAL, A. The influence of delivery times on repairable k-out-of-N systems with spares. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 5, p. 2368–2387, 2009.
- [8] CHANG, P.-L.; CHOU, Y.-C.; HUANG, M.-G. A (r, r, Q) inventory model for spare parts involving equipment criticality. **International Journal of Production Economics**, v. 97, p. 66–74, 2005.
- [9] CHENG, C.-Y.; PRABHU, V. Evaluation models for service oriented process in spare parts management. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 4, p. 1403–1417, 5 dez. 2012.
- [10] 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.
- [11] COSTANTINO, F.; GRAVIO, G. DI; TRONCI, M. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 119, p. 95–101, 2013.
- [12] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. On the availability of a k-out-of- N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 83, n. 3, p. 287–300, 2004.
- [13] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of- N system with wear-out. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 182–200, 2006.
- [14] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Availability of k-out-of-N systems under block replacement sharing limited spares and repair capacity. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 2, p. 404–421, 2007.
- [15] 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.
- [16] DIALLO, C.; AIT-KADI, D.; CHELBI, A. (s, Q) spare parts provisioning strategy for periodically replaced systems. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 57, n. 1, p. 134–139, mar. 2008.
- [17] DIAZ, A. Modelling Approaches to Optimise Spares in Multi-echelon Systems. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 6, n. 1, p. 51–62, 2003.
- [18] DIETER, A.; PICKARD, K.; BERTSCHE, B. Periodic Renewal of Spare Parts Using Weibull. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 3, p. 193–198, 2010.
- [19] ELWANY, A. H.; GEBRAEEL, N. Z. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. **IIE Transactions**, v. 40, n. 7, p. 629–639, 2008.
- [20] GAN, S. et al. Intermediate buffer analysis for a production system. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 20, p. 8785–8795, 2013.
- [21] GIRI, B. C.; DOHI, T.; KAIO, N. A discrete-time order-replacement model with time discounting and spare part provisioning. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 11, n. 3, p. 190–205, 2005.
- [22] GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 119, p. 199–2206, 2013.
- [23] HASSAN, J.; KHAN, F.; HASAN, M. A risk-based approach to manage non-repairable spare parts inventory. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 3, p. 344–362, 2012.

- [24] HUANG, R. et al. Modeling and Analyzing a Joint Optimization Policy of Block-Replacement and Spare Inventory With Random-Leadtime. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 57, n. 1, p. 113–124, mar. 2008.
- [25] HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 125–133, 2001.
- [26] ILGIN, M. A.; TUNALI, S. Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 5-6, p. 594–604, 2007.
- [27] KILPI, J.; TÖYLI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. **International Journal of Production Economics**, v. 117, n. 2, p. 360–370, 2009.
- [28] KILPI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. P. J. Pooling of spare components between airlines. **Journal of Air Transport Management**, v. 10, n. 2, p. 137–146, mar. 2004.
- [29] KIM, S.-H.; COHEN, M. A.; NETESSINE, S. Performance contracting in after-sales service supply chains. **Management Science**, v. 53, n. 12, p. 1843–1858, 2007.
- [30] KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele University Technical Report**, 2004.
- [31] KUKREJA, A.; SCHMIDT, C. P. A model for lumpy demand parts in a multi-location inventory system with transshipments. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 8, p. 2059–2075, ago. 2005.
- [32] LAU, H. C. et al. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation. **European Journal of Operational Research**, v. 170, p. 91–105, 2006.
- [33] LI, R.; RYAN, J. K. A Bayesian Inventory Model Using Real-Time Condition Monitoring Information. **Production and Operations Management**, v. 20, n. 5, p. 754–771, 2011.
- [34] LOUIT, D. et al. Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 992–1004, 2 jun. 2010.
- [35] LOUIT, D. et al. Condition-based spares ordering for critical components. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 1837–1848, 2011.
- [36] MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.; PODOFILLINI, L. Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 87, n. 3, p. 325–335, mar. 2005.
- [37] MIJAILOVIC, V. Optimal spares availability strategy for power transformer components. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 8, p. 987–992, 2010.
- [38] MOLENAERS, A. et al. Criticality classification of spare parts: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 140, p. 570–578, 2012.
- [39] NGUYEN, D.; BAGAJEWICZ, M. Optimization of Preventive Maintenance in Chemical Process Plants. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 9, p. 4329–4339, 2010.
- [40] 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, p. 1157–1166, 2011.
- [41] PATANKAR, R. et al. Global search algorithm for automated maintenance planning and scheduling of parts requests. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 6, p. 1751–1757, jun. 2009.

- [42] PORRAS, E.; DEKKER, R. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. **European Journal of Operational Research**, v. 184, p. 101–132, 2008.
- [43] 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.
- [44] SALMAN, S. et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 23, n. 4, p. 445–457, jun. 2007.
- [45] SAVSAR, M. Analysis and modeling of maintenance operations in the context of an oil filling plant. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 22, n. 5, p. 679–697, 2011.
- [46] SCHULTZ, C. R. Spare parts inventory and cycle time reduction. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 4, p. 759–776, 15 fev. 2004.
- [47] SHEU, S.-H.; CHIEN, Y.-H. Optimal age-replacement policy of a system subject to shocks with random lead-time. **European Journal of Operational Research**, v. 159, n. 1, p. 132–144, nov. 2004.
- [48] SHUM, Y.-S.; GONG, D.-C. The application of genetic algorithm in the development of preventive maintenance analytic model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, n. 1–2, p. 169–183, 21 jan. 2007.
- [49] SLEPTCHENKO, A.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Trade-off between inventory and repair capacity in spare part networks. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 3, p. 263–272, 1 mar. 2003.
- [50] SLEPTCHENKO, A.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Using repair priorities to reduce stock investment in spare part networks. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 733–750, jun. 2005.
- [51] TSAKATIKAS, D.; DIPLARIS, S.; SFANTSIKOPOULOS, M. Spare parts criticality for unplanned maintenance of industrial systems. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 94–107, 2008.
- [52] VAN HORENBEEK, A. et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 499–508, 2013.
- [53] VAN JAARSVELD, W.; DEKKER, R. Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, p. 1576–1586, 2011.
- [54] VAUGHAN, T. S. Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy. **European Journal of Operational Research**, v. 161, n. 1, p. 183–190, 2005.
- [55] WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 14, n. 4, p. 387–401, 2008a.
- [56] 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, nov. 2008b.
- [57] WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure. **European Journal of Operational Research**, v. 194, n. 1, p. 184–205, abr. 2009.
- [58] WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 11, p. 1535–1541, 2011.

- [59] 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.
- [60] WANG, W.; PECHT, M. G.; LIU, Y. Cost Optimization for Canary-Equipped Electronic Systems in Terms of Inventory Control and Maintenance Decisions. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 61, n. 2, p. 466–478, jun. 2012.
- [61] WONG, H. et al. Simple, efficient heuristics for multi-item multi-location spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints. **Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 12, p. 1419–1430, 16 mar. 2005.
- [62] WONG, H. et al. Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 3, p. 1071–1093, jun. 2006.
- [63] WONG, H.; CATTRYSSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Stocking decisions for repairable spare parts pooling in a multi-hub system. **International Journal of Production Economics**, v. 93-94, p. 309–317, jan. 2005a.
- [64] WONG, H.; CATTRYSSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Inventory pooling of repairable spare parts with non-zero lateral transshipment time and delayed lateral transshipments. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 207–218, ago. 2005b.
- [65] WU, M.; HSU, Y. Design of BOM configuration for reducing spare parts logistic costs. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 2417–2423, 2008.
- [66] ZENG, Y.; WANG, L. A hybrid decision support system for slow moving spare parts joint replenishment: a case study in a nuclear power plant. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 37, n. 3/4, p. 287–196, 2010.
- [67] ZENG, Y.-R.; WANG, L.; HE, J. A Novel Approach for Evaluating Control Criticality of Spare Parts Using Fuzzy Comprehensive Evaluation and GRA. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 14, n. 3, p. 392–401, 2012.
- [68] ZIJM, W. H.; AVŞAR, Z. M. Capacitated two-indenture models for repairable item systems. **International Journal of Production Economics**, v. 81-82, p. 573–588, jan. 2003.

3. SEGUNDO ARTIGO

Variáveis de decisão na gestão de peças sobressalentes na manutenção industrial

Resumo

Empresas de diversos setores necessitam de peças sobressalentes para manter seus equipamentos disponíveis e confiáveis. Entretanto, a estocagem destas peças pode representar altos custos de armazenamento. Assim, é importante a definição de uma estratégia de fornecimento de sobressalentes de maneira a otimizar os custos empresariais. Este artigo apresenta o resultado de uma revisão sistemática da literatura onde foram levantadas as variáveis de tomada de decisão a respeito da gestão de peças sobressalentes. Essas variáveis foram separadas em sistema/equipamento, manutenção, suprimento e armazenamento. Para cada variável foram levantadas alternativas de decisão e exemplos de aplicação. A principal contribuição deste trabalho é um quadro com as alternativas de decisão que podem ser selecionadas na elaboração de uma estratégia fornecimento de peças sobressalentes considerando as características das mesmas e do sistema a ser atendido.

Palavras-chave: Sobressalentes; Estoques; Gerenciamento; Suprimento; Otimização; Manutenção; Revisão sistemática; Tomada de decisão.

Abstract

Companies from various sectors need spare parts to keep their equipment available and reliable. However, the storage of these parts can represent high storage costs. Thus, it is important to define a spare parts provision strategy in order to optimize business costs. This article presents the results of a systematic review of the literature where decision-making variables regarding the spare parts management were surveyed. These variables are separated in system / equipment, maintenance, supply and storage. For each variable decision alternatives and application examples are presented. The main contribution of this work is a decision alternatives list that can be selected in the development of a spare parts provision strategy, considering their features and those from the system to be serviced.

Keywords: Spare parts; Inventory; Management; Logistics; Optimization; Maintenance; Systematic review; Decision-making.

3.1. Introdução

A alta confiabilidade e disponibilidade de plantas industriais são características essenciais das organizações modernas (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Entretanto, a pressão para utilização plena dos ativos é crescente, afetando fortemente a disponibilidade dos equipamentos (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013; TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). Neste contexto, a manutenção exerce um papel-chave na sustentação dos níveis de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos (WANG; CHU; MAO, 2008b).

As ações de manutenção geralmente dependem da acessibilidade a peças sobressalentes para reduzir a indisponibilidade e os custos incorridos quando um equipamento falha (VAN HORENBEEK et al., 2013). Quando ocorrem falhas, a indisponibilidade pode ser prolongada se as peças necessárias para seu reparo não estão prontamente disponíveis (VAN JAARVELD; DEKKER, 2011; HASSAN; KHAN; HASAN, 2012). Por outro lado, muitas peças sobressalentes são caras, o que leva a um elevado custo de armazenamento (VAN JAARVELD; DEKKER, 2011; WONG et al., 2006; WONG; CATTRYSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005a; BAILEY; HELMS, 2007; WU; HSU, 2008). Além disso, muitas empresas armazenam peças redundantes, desnecessárias ou obsoletas (WONG; CATTRYSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005a; MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005; PORRAS; DEKKER, 2008). Estudos mostram que o valor estimado de peças sobressalentes estocadas em grandes empresas pode ultrapassar a casa das dezenas de milhões de dólares (BAILEY; HELMS, 2007; PORRAS; DEKKER, 2008; CHANG; CHOU; HUANG, 2005; MOLENAERS et al., 2012; BRAGLIA; FROSOLINI, 2013). Portanto, o estoque de sobressalentes, frequentemente, tem um impacto direto no desempenho de uma empresa, fazendo com que o gerenciamento efetivo da manutenção e das peças sobressalentes seja essencial para assegurar a integridade dos equipamentos com o menor custo (VAN HORENBEEK et al., 2013; HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; BREZAVSCEK; HUDOKLIN, 2003).

Geralmente, as decisões acerca da manutenção e da estocagem de sobressalentes são realizadas de maneira separada (ELWANY; GEBRAEEL, 2008). Os modelos de manutenção pressupõem uma quantidade infinita de estoque e consideram que as peças estão disponíveis sem espera (VAN HORENBEEK et al., 2013; ELWANY; GEBRAEEL, 2008). Essas suposições não são realistas, pois o custo de manter tal sistema seria proibitivo para muitas empresas (VAN HORENBEEK et al., 2013). Por sua vez, os estoques de sobressalentes geralmente são controlados através da aplicação de princípios gerais de gerenciamento de

estoques (HUISKONEN, 2001). Entretanto, a baixa quantidade de dados históricos, e os padrões de demanda estocásticos e irregulares, tornam a aplicação destes princípios inadequada (BAILEY; HELMS, 2007; PORRAS; DEKKER, 2008). Além disso, não são levadas em consideração as consequências relacionadas com a falta de estoque de sobressalentes em aplicações críticas (BAILEY; HELMS, 2007). Assim, fica evidente que a manutenção e o controle de estoques de sobressalentes são fortemente interconectados e devem ser considerados simultaneamente na otimização das operações de uma empresa, visando uma solução de compromisso entre as políticas de manutenção e as de estoque de sobressalentes (VAN HORENBEEK et al., 2013).

Durante as últimas décadas, vários modelos de otimização de estoques de sobressalentes foram estudados na literatura (HUISKONEN, 2001; VAN HORENBEEK et al., 2013). Entretanto, mesmo os modelos mais sofisticados possuem suposições muito restritivas; e quando elas são removidas, a complexidade aumenta tanto que torna a sua aplicação inviável (HUISKONEN, 2001). Além disso, ao otimizar um sistema, frequentemente diferentes metas estão envolvidas e essas muitas vezes são conflitantes (MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005).

Este artigo tem o objetivo de levantar as decisões que devem ser tomadas na definição de uma estratégia de suprimento para cada peça sobressalente no âmbito da manutenção industrial. Dentre essas decisões, são incluídas metas definidas pela empresa, restrições, políticas de manutenção, processos de compras e de estoque de sobressalentes. O objetivo deste trabalho é servir de guia para a avaliação das alternativas de decisão a serem selecionadas para uma gestão de peças sobressalentes eficaz e eficiente.

O artigo está organizado como segue. Na Seção 3.2 o método de pesquisa é descrito. Na Seção 3.3 são descritas as variáveis de decisões acerca do suprimento de sobressalentes encontradas na literatura. Finalmente, na Seção 3.4 são feitas as conclusões e as recomendações de trabalhos futuros.

3.2. Método de pesquisa

Esta pesquisa pode ser classificada, do ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada, pois os resultados têm interesse imediato para empresas que desejam aprimorar métodos de controle de peças sobressalentes. Quanto à abordagem, a pesquisa é considerada qualitativa, pois os resultados são apresentados de maneira descritiva. Com relação aos objetivos, a pesquisa é descritiva, pois realiza análise dos dados reunidos na revisão sistemática

e descreve os resultados a partir de diferentes critérios de análise. Considerando os procedimentos, esta pesquisa é classificada como bibliográfica, visto que é baseada em estudos já publicados sobre o assunto.

Este estudo foi realizado através de uma revisão sistemática da literatura conforme proposto por Kitchenham (KITCHENHAM, 2004). Segundo essa autora, a revisão sistemática é um meio de identificar, avaliar e interpretar as pesquisas disponíveis que são relevantes para uma questão de pesquisa, tópico ou fenômeno de interesse. Ela é composta pelas seguintes etapas: (i) estabelecer as estratégias que serão utilizadas nas buscas, (ii) selecionar os estudos, (iii) realizar a avaliação da qualidade dos estudos, (iv) extrair os dados e (v) sintetizá-los.

A estratégia de busca de referências foi baseada apenas em artigos de periódicos das bases *EMERALD*, *Science Direct* e *ISI Web of Knowledge* publicados a partir de 2003. As palavras-chave procuradas nos campos título, resumo e palavras-chave foram *maintenance* e *spare parts* com o operador booleano *AND*. As buscas foram realizadas no período de 13/09/2013 a 13/10/2013. Desta forma foram encontrados 154 artigos distintos.

De maneira a limitar a qualidade dos artigos selecionados, foram excluídos os artigos de periódicos cujo fator de impacto do ano de 2013 levantado pela *Thomson Reuters* fosse menor que 0,50 ou cuja estatística de citações por documento em 2 anos de 2013 da *SCIMAGO* fosse menor que 0,75. Através da leitura do título e do resumo de cada artigo encontrado, foram mantidos artigos que tratam de estratégias de suprimento e armazenagem de sobressalentes; políticas de gerenciamento de estoques de sobressalentes no âmbito da manutenção industrial; modelos de otimização de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (RAM - *Reliability, Availability and Maintainability*) considerando peças sobressalentes; e de classificação de peças sobressalentes. Os artigos de revisão da literatura foram excluídos, servindo apenas como fonte de novas referências. Em caso de dúvida, o artigo era lido por inteiro para determinar sua exclusão ou não. Após esta etapa foram mantidos 36 artigos.

As referências bibliográficas dos artigos selecionados e dos artigos de revisão bibliográfica foram examinadas para a identificação de outros estudos pertinentes. Estes estudos foram avaliados através dos mesmos critérios anteriores e também tiveram suas referências bibliográficas examinadas, acrescentando mais 29 artigos, totalizando 65 artigos relevantes para este trabalho.

Após a leitura do texto completo de cada artigo, foram registradas as variáveis de decisão utilizadas na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes. Estas

variáveis foram categorizadas em quatro classes distintas: decisões acerca do sistema/equipamento, decisões que afetam a manutenção, o suprimento e a estocagem das peças, conforme Figura 3.1. A seção seguinte detalha cada uma destas classes.



Figura 3.1. Variáveis de decisão utilizadas na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes encontradas na literatura. Fonte: elaborada pela autora.

3.3. Variáveis de decisão encontradas

As variáveis de decisão estão resumidas na Tabela 3.1, que também apresenta as alternativas de decisão e exemplos de aplicação. Na coluna referências, são indicados os artigos onde foram encontradas as variáveis. As seções a seguir detalham cada uma das classes e suas respectivas variáveis.

3.3.1. Sistema/equipamento

3.3.1.1. Priorização da manutenção

O tempo de reparo de um equipamento ou de uma peça pode ser influenciado pelas regras de priorização de manutenção (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2006; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2005; NGUYEN; BAGAJEWICZ, 2010). Chang et al. (2005) desenvolveram um modelo de controle de estoque no qual uma certa quantidade de peças é reservada apenas para equipamentos críticos. Para peças reparáveis, a priorização leva a uma redução no nível de estoque de itens prioritários e um aumento no estoque de itens menos prioritários, o que pode ser uma estratégia de aumento de disponibilidade do sistema com o mesmo orçamento (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2005).

Tabela 3.1. Variáveis de decisão na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes. Fonte: elaborada pela autora.

Classe	Decisão	Alternativas	Referências	Exemplo
SISTEMA / EQUIPAMENTO	Priorização de equipamentos sob manutenção	Com priorização	[8] [13] [40] [51]	Equipamentos críticos para a operação são priorizados nas atividades de manutenção
		Sem priorização		
	Quantidade de mão-de-obra alocada	Pequena	[7] [12] [13] [14] [15] [35] [40] [49] [50] [51]	Estimativa da quantidade de mão-de-obra para realização das atividades de manutenção previstas
		Adequada		
		Folgada		
	Objetivos e restrições	Disponibilidade	[7] [6] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [30] [33] [35] [45] [47] [50] [51] [52] [57] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [69]	Na otimização de estoques de sobressalentes pode-se buscar a maximização da disponibilidade ou confiabilidade do equipamento ou do nível de serviço da peça com restrições de custo. Outra forma, é a minimização de custos restringido por um valor mínimo de disponibilidade ou confiabilidade do sistema ou de nível de serviço da peça em estoque.
		Confiabilidade	[7] [18]	
Nível de serviço		[3] [23] [29] [32] [35] [39] [43] [64] [65]		
Custo total		[1] [5] [8] [10] [15] [16] [19] [22] [25] [27] [32] [35] [37] [38] [41] [42] [43] [45] [47] [48] [49] [50] [51] [55] [56] [57] [58] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [69]		
Horizonte de planejamento	Curto	[2] [18] [22] [33] [35] [37] [38] [41] [45] [49] [55] [59]	Algumas plantas de processo realizam manutenção após anos de operação, o que influencia a política de estoque	
	Médio			
	Longo			
MANUTENÇÃO	Tipo de manutenção predominante (equipamento)	Corretiva	[2] [4] [6] [11] [17] [27] [28] [29] [32] [30] [33] [35] [37] [38] [39] [42] [45] [47] [50] [51] [52] [54] [62] [63] [65] [66] [67] [68] [69]	Pode-se optar por realizar manutenção apenas após a falha quando ela é aleatória
		Preventiva	[4] [5] [9] [10] [14] [16] [18] [21] [22] [25] [27] [35] [38] [39] [40] [41] [46] [48] [49] [55] [59] [60]	Indicada para peças sujeitas a desgaste mecânico
		Preditiva	[4] [7] [12] [13] [15] [19] [23] [34] [36] [39] [44] [56] [57] [58] [61] [64]	Melhor alternativa para peças de alto custo quando há meios de monitoramento economicamente viáveis
	Atuação	Atuação em módulos	[11] [30] [33] [36] [51] [61] [66] [69]	A atuação da manutenção pode ser realizada na peça defeituosa ou no subsistema imediatamente acima
		Atuação em peças	[2] [3] [5] [6] [7] [9] [10] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [21] [22] [23] [24] [25] [27] [28] [29] [32] [34] [35] [36] [37] [40] [41] [42] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [52] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [62] [63] [64] [65] [66] [68]	
	Atividade	Reparo in loco	[52]	Se possível e relativamente rápida, a correção do defeito na peça pode ser realizada in loco. Senão a peça pode ser substituída para posterior reparo. Se a peça não for reparável, deve ser realizada a substituição e o descarte da peça defeituosa
		Substituição c/ reparo	[3] [6] [7] [11] [12] [13] [14] [15] [17] [28] [29] [30] [33] [35] [36] [37] [38] [45] [46] [50] [51] [52] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [68] [69]	
		Substituição c/ Descarte	[2] [3] [5] [8] [9] [10] [16] [18] [19] [21] [22] [23] [24] [25] [27] [32] [34] [35] [36] [38] [40] [41] [42] [44] [46] [47] [48] [49] [52] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [66] [67]	
	Local de reparo da peça	Fornecedor	[6] [17] [30]	A depender do tipo de defeito e do grau de conhecimento da equipe de manutenção, a peça e/ou o equipamento podem ser reparados no fornecedor, na oficina ou no campo
		Oficina	[7] [11] [12] [13] [14] [15] [17] [28] [29] [33] [35] [37] [38] [45] [46] [50] [51] [52] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [68] [69]	
Campo		[46] [52]		

Tabela 3.1. (continuação) Variáveis de decisão na definição de estratégias de suprimento de peças sobressalentes. Fonte: elaborada pela autora.

Classe	Decisão	Alternativas	Referências	Exemplo
SUPRIMENTO	Momento de realização de pedidos	Quando falhar ou falha for prevista	[4] [9] [19] [21] [22] [23] [36] [38] [57]	O pedido pode ocorrer apenas após a falha ou quando a falha for prevista (manutenção preditiva)
		Quando estoque atingir certo nível	[1] [4] [8] [6] [11] [16] [17] [27] [30] [32] [40] [43] [44] [47] [49] [50] [52] [54] [55] [56] [58] [66] [67]	Esta opção é adequada quando há monitoramento contínuo do nível de estoque e é mantido um estoque de segurança
		Periodicamente	[5] [22] [24] [25] [34] [46] [48] [59] [60] [61]	Normalmente o estoque é revisado periodicamente quando não há monitoramento contínuo do nível dos estoques ou quando o item não é crítico
		Início de operação	[35] [41]	Pode-se optar por comprar todas as peças necessárias ao longo da vida útil do equipamento no início de sua operação
	Quantidade de sobressalentes pedida	Quantidade fixa	[4] [8] [16] [19] [23] [27] [43] [44] [46] [48] [49] [57]	Pode-se definir a quantidade de itens a serem adquiridos a cada pedido através do lote econômico de compra
		Quantidade prevista para um certo período de tempo de operação do equipamento	[1] [3] [4] [5] [6] [7] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [18] [21] [22] [24] [25] [27] [29] [30] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [40] [41] [45] [47] [49] [50] [51] [54] [55] [56] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66]	A quantidade de peças a ser adquirida a cada pedido pode ser definida através da demanda prevista para um determinado período que pode ser a vida útil do equipamento, a duração da missão, etc.
	Relação com o fornecedor	Sem relação especial	[1] [3] [4] [22] [27] [29] [35] [55] [59] [60] [61] [62] [63] [66] [67] [69]	O prazo de entrega de um fornecedor pode ser garantido em determinados níveis através de um contrato
		Suprimento com prazo garantido e/ou pedido em emergência		
	Escolha do fornecedor	Baseado em preço	[2] [9] [32] [66]	Quando há diversos fornecedores para uma mesma peça, a escolha do fornecedor pode ser por qualidade, prazo de entrega ou custo. Além disso, pode-se combinar mais de um critério
		Baseado em confiabilidade	[2] [66]	
Baseado em entrega		[6] [24] [29] [62] [64] [65]		
ARMAZENAMENTO	Controle de estoque	Próprio	[3] [9] [6] [28] [29] [30]	O controle de estoque pode-se ser terceirizado, com pagamento por desempenho
		Terceirizado		
	Localização do estoque	Sem estoque/estoque no fornecedor	[4] [9] [21] [23] [36]	Pode-se optar por não estocar peças caras ou não críticas. Outra opção é estocar a peça no próprio site. O estoque também pode ser compartilhado com outras plantas ou empresas.
		Estoque próprio	[1] [4] [5] [7] [8] [10] [12] [13] [14] [15] [16] [18] [19] [22] [24] [25] [27] [34] [35] [37] [38] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [52] [54] [55] [57] [58] [59] [60] [61] [67] [69]	
	Estoque compartilhado	[1] [3] [6] [11] [17] [28] [29] [32] [33] [34] [39] [50] [51] [62] [63] [64] [65] [66]		

O critério de priorização de manutenção utilizado por Nguyen & Bagajewicz (2010) é a consequência da falha de 1 (urgente) a 5 (sem impacto). Sleptchenko et al. (2005) citam a priorização de itens com menor tempo de reparo e com maior razão entre custo do sobressalente e tempo de reparo. De Smidt-Destombes et al. (2006), modelaram um sistema com a priorização de serviços que resultam em um menor tempo de indisponibilidade. Sleptchenko et al. (2005) concluíram que a priorização de reparo é especialmente atrativa em sistemas com vários itens de características completamente diferentes (custo, tempo de reparo) que compartilham oficinas de manutenção com alta utilização.

3.3.1.2. Quantidade de mão-de-obra alocada

Na prática uma oficina de manutenção pode ser genérica, ou seja, capaz de executar todas as tarefas em todos os itens, ou pode ser dedicada a um conjunto específico de itens e tarefas (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Essa atribuição de tarefas pode ser baseada em aspectos técnicos, tais como, causa da falha, habilidade dos técnicos de manutenção e na disponibilidade de ferramentas (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2005). Outra forma possível, é a estrutura de manutenção em níveis, onde as peças cujos reparos não são possíveis de realizar no nível inferior são enviadas a um nível superior (COSTANTINO; GRAVIO; TRONCI, 2013).

Há uma solução de compromisso entre o estoque de sobressalentes e a quantidade de mão-de-obra alocada. Um aumento na capacidade de reparo implica em menores tempos de reparo das peças sobressalentes e, portanto, um número menor de peças sobressalentes em estoque são necessárias e vice-versa (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). De Smidt-Destombes et al. (2004) estudaram a interação entre a política de manutenção preventiva, o estoque de sobressalentes e a capacidade de reparo. Em seus experimentos evidenciaram que poucas peças sobressalentes são necessárias para compensar a baixa capacidade de reparo se a meta de disponibilidade é baixa; e mais peças sobressalentes são necessárias para compensar a capacidade de reparo se a meta de disponibilidade é alta. Sleptchenko et al. (2003) desenvolveram um método para demonstrar se é melhor alocar o orçamento em capacidade de reparo adicional ou em maior estoque de peças sobressalentes. Em seu modelo de otimização conjunta da manutenção e do estoque de sobressalentes, Nguyen & Bagajewicz (2010) levaram em consideração a quantidade de mão-de-obra disponível. Alguns autores supõem capacidade de reparo infinita, argumentando que há uma alta flexibilidade através da subcontratação de

trabalhos de reparo quando uma oficina está trabalhando na sua capacidade máxima (WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005a, 2005b).

3.3.1.3. Objetivos e restrições

Disponibilidade

A disponibilidade é definida como o percentual do tempo que um sistema encontra-se funcional (LOUIT et al., 2010). Geralmente metas de disponibilidade são mais fáceis de especificar, comparado ao cálculo de custos de indisponibilidade (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Pode-se trabalhar na maximização da disponibilidade dos sistemas sujeito a um orçamento fixo ou na minimização de custos dada uma meta de disponibilidade (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Nos contratos de manutenção, geralmente a medida de desempenho costuma ser a disponibilidade do sistema (KIM; COHEN; NETESSINE, 2007). De Smidt-Destombes et al. (2004, 2007) descrevem um modelo aproximado para a determinação da disponibilidade de um sistema sujeito a uma certa política de manutenção, capacidade de reparo e nível de estoque de sobressalentes.

Confiabilidade

Outra meta que pode ser definida para um sistema é a confiabilidade, embora seja menos comum. Apenas dois artigos utilizaram esta variável. Dieter et al. (2010) descreveram uma maneira de determinar a quantidade de peças sobressalentes a serem estocadas para atingir determinada meta de confiabilidade. Chakravarthy & Gómez-Corral (2009) avaliaram uma série de indicadores de confiabilidade em um sistema com redundâncias no estado estacionário.

Nível de serviço

O nível de serviço é uma das metas utilizadas com maior frequência, baseada na teoria de gestão de estoques. Busca-se um nível de serviço mínimo no fornecimento de determinada peça. É preferida em relação à meta de minimização de custos, pela dificuldade de avaliação do custo da falta do sobressalente na prática (PORRAS; DEKKER, 2008). Quanto menor a meta de nível de serviço, maior é a quantidade de peças que devem ser estocadas (KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004).

Custo Total

O custo total é o critério mais comum de otimização e leva em consideração os custos associados à aquisição e estocagem de sobressalentes em conjunto com o custo de indisponibilidade da peça onde aplicável (LOUIT et al., 2010). Esta deve ser a maneira preferida de otimização quando os custos de indisponibilidade do sistema são conhecidos (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Entretanto, isto dificilmente ocorre na prática (WANG; CHU; MAO, 2009).

3.3.1.4. Horizonte de planejamento

O intervalo de tempo no qual é avaliada a política de estoque de sobressalentes depende das condições particulares do suprimento de cada companhia ou da duração da missão do sistema produtivo (LOUIT et al., 2010). Marseguerra et al. (2005) calcularam a quantidade de sobressalentes ótima para maximizar o lucro durante determinado período. Outros exemplos são a operação de equipamentos em locais remotos onde a entrega de sobressalentes somente pode ser feita a cada n meses e o pedido final de sobressalentes de um equipamento que está saindo de produção (LOUIT et al., 2010). Mijailović (2010) considerou a vida útil do equipamento para otimizar a manutenção preventiva de transformadores de energia.

3.3.2. *Manutenção*

3.3.2.1. Tipo de manutenção predominante

As falhas de equipamentos podem ocorrer devido a desgaste ou a causas aleatórias (SAVSAR, 2011). As falhas aleatórias não podem ser eliminadas totalmente, enquanto as falhas devido a desgaste podem ser eliminadas através de manutenção preventiva ou preditiva, reduzindo-se assim a manutenção corretiva (SAVSAR, 2011).

Geralmente as políticas de manutenção e estoque de peças sobressalentes são tratadas separadamente ou sequencialmente na indústria (ILGIN; TUNALI, 2007). Entretanto, a influência de políticas de manutenção no suprimento de sobressalentes não pode ser ignorada, uma vez que a necessidade de peças sobressalentes é ditada pelas políticas de manutenção (ILGIN; TUNALI, 2007). Braglia et al. (2004) elaboraram um diagrama de decisão, baseado nos conceitos da Manutenção Centrada na Confiabilidade, que diferencia a estratégia de suprimento do sobressalente dependendo do tipo de manutenção executada, além de outros critérios.

Manutenção corretiva

Na política de manutenção corretiva um sistema somente é reparado após a falha (WANG; CHU; MAO, 2008a). Em aplicações onde a taxa de utilização dos equipamentos varia com o tempo, como na área militar, a demanda pela peça é variável, sendo mais indicada a política de manutenção corretiva (LAU et al., 2006).

Manutenção preventiva

A fim de evitar perdas de produção devido a quebras imprevistas de equipamentos, um plano de manutenção preventiva pode ser implementado (SHUM; GONG, 2007). Este plano pode ser periódico (SHUM; GONG, 2007; VAUGHAN, 2005); após certo número de ciclos (GIRI; DOHI; KAIO, 2005); ou a cada entrega de sobressalentes (DIALLO; AIT-KADI; CHELBI, 2008). Quanto maior a frequência de manutenção, maiores os custos relativos a esta atividade; por outro lado, uma baixa frequência de manutenção pode reduzir a confiabilidade do equipamento, deixando-o mais vulnerável a quebras, aumentando assim os custos de parada de produção (GAN et al., 2013).

Este tipo de manutenção causa um cenário de demandas irregulares, onde uma grande quantidade de peças é necessária em um ponto conhecido no tempo (VAUGHAN, 2005). Esta demanda pode ser identificada para melhor controle do estoque de peças (PORRAS; DEKKER, 2008). No caso de peças não reparáveis, o estoque dessas peças deve ser apenas para cobrir as manutenções corretivas, pois a necessidade de peças para a manutenção preventiva pode ser planejada antecipadamente (LOUIT et al., 2010). De maneira distinta, para peças reparáveis, a quantidade de peças necessária para ambos os tipos de manutenção deve ser estocada, pois elas seguem para um processo de reparo antes de retornarem ao estoque (LOUIT et al., 2010).

Manutenção preditiva

A manutenção preditiva vem aumentando a sua popularidade desde os anos 90 (WANG; CHU; MAO, 2008a, 2008b). Neste tipo de manutenção, as atividades são realizadas de acordo com as condições atuais do sistema, onde a remoção de um componente em operação é desencadeada pela detecção de um processo de degradação no equipamento (LOUIT et al., 2011; WANG; CHU; MAO, 2008b). Se o início desse processo de degradação pode ser detectado de maneira que a peça sobressalente possa ser encomendada a tempo, não há necessidade de estoque. Assim, pode-se reduzir os custos de armazenamento, principalmente nos casos de peças caras e complexas (LOUIT et al., 2011). Além disso, em comparação com

a manutenção preventiva, onde as manutenções são realizadas em intervalos definidos de tempo, esta periodicidade pode ser sub ou sobre especificada, pois não leva em consideração as condições individuais de cada sistema (WANG; CHU; MAO, 2008b). Este tipo de manutenção é particularmente útil para peças sujeitas à deterioração (LI; RYAN, 2011).

Para uma estratégia eficiente de manutenção preditiva, primeiramente deve haver um sistema de medição para monitorar a condição do equipamento (WANG; CHU; MAO, 2008a). Estas informações advêm, por exemplo, de medidas de vibração, análise de óleo, dados de sensores, condições de operação, entre outros, e são chamadas de covariáveis (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Em seguida a degradação da peça deve ser modelada para estimar sua confiabilidade, assim pode-se tomar a decisão ótima a respeito do fornecimento da peça sobressalente (ELWANY; GEBRAEEL, 2008; GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013; WANG; CHU; MAO, 2008a). Estes dados também podem ser utilizados para atualizar modelos de degradação, como apresentado em (LI; RYAN, 2011).

Wang et al. (2008b) modelaram uma política de manutenção preditiva onde foram definidos os parâmetros de intervalo entre monitoramentos, limite de degradação para a substituição da peça e limite de degradação para solicitação de compra da peça. Para uma política ótima de manutenção, eles argumentam que, para uma baixa taxa de degradação de uma peça, a inspeção frequente é desnecessária e dispendiosa. Similarmente, um baixo limite de degradação para substituição da peça leva a manutenções frequentes sem explorar completamente a vida residual da peça. A respeito do limite de degradação para solicitação de compra da peça, um valor baixo aumenta o custo de armazenamento, ao ponto que um valor alto aumenta o risco de falta de sobressalente quando necessário.

3.3.2.2. Atuação da manutenção

Os equipamentos podem ter uma estrutura modular, composto de várias peças distintas. Geralmente, o módulo não pode ser reparado em campo, somente na oficina (WU; HSU, 2008). Estes módulos podem ser considerados como item de estoque (SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Além disso, considerando os custos de manutenção, tempos de manutenção e criticidade do equipamento, pode ser mais vantajosa a atuação no módulo do que na peça defeituosa. Zijm & Avşar (2003) modelaram dois canais de manutenção, um para desmontar o módulo e outro para reparo da peça defeituosa.

3.3.2.3. Atividade de manutenção

Para retornar um equipamento ao estado operacional, pode ser realizado um reparo in loco da peça defeituosa. Esta opção pode levar a uma alta indisponibilidade operacional, dependendo do tempo de manutenção da peça. Para evitar isso, é possível realizar a substituição da peça ou módulo defeituoso, reduzindo o tempo não operacional do sistema. Em seguida deve-se escolher entre repará-lo ou descartá-lo.

Muitos componentes podem retornar ao estado operacional após serem reparados ou reconicionados (LOUIT et al., 2010). Geralmente, quando o componente tem alto custo, é mais econômico repará-los, se tecnicamente possível, do que descartá-los (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004, 2007; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Manter peças de reposição em estoque diminui o tempo de indisponibilidade e permite que o reparo seja feito mais tarde (KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). Além disso, certa mão-de-obra é necessária para substituição e reparo de componentes (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004). Pode-se aumentar a disponibilidade através do aumento do estoque de sobressalentes para proteção contra falhas durante o tempo de reparo e também pelo aumento da capacidade de reparo, reduzindo assim o número de peças aguardando conserto e conseqüentemente a necessidade de estoque (DE SMIDT-DESTOMBES; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2004; SLEPTCHENKO; VAN DER HEIJDEN; VAN HARTEN, 2003). O descarte de peças defeituosas é uma opção viável quando o reparo do componente é difícil ou impossível, ou quando o custo do reparo excede o custo de aquisição de um componente funcional (GIRI; DOHI; KAIO, 2005; LOUIT et al., 2010).

3.3.2.4. Local de reparo da peça

Quando é feita a opção por reparar a peça defeituosa, esse reparo pode ser realizado em campo, na oficina ou no fornecedor. Geralmente a opção de reparo em campo é feita para reparos rápidos. A maior parte das vezes o reparo é realizado na oficina, onde há mais recursos disponíveis. O reparo no fornecedor pode ser realizado na ausência de mão-de-obra capacitada para tal ou então quando há um contrato de fornecimento de peças (CESARO; PACCIARELLI, 2011; KIM; COHEN; NETESSINE, 2007).

3.3.3. Suprimento

3.3.3.1. Momento de realização de pedidos

Quando falhar ou a falha for prevista

De acordo com Braglia et al. (2004), encomendar uma peça apenas quando a peça falhar ou quando a falha for prevista são as melhores estratégias de suprimento, pois reduzem os problemas de armazenamento. Entretanto elas somente são aplicáveis quando a falha não for crítica para o processo ou quando há um bom controle sobre o fenômeno da falha do equipamento, com políticas de manutenção adequadas como, por exemplo, quando aplicada manutenção preditiva. Neste último caso, geralmente encomenda-se a peça sobressalente quando o tempo remanescente de vida atinge certo nível (LOUIT et al., 2011).

Quando estoque atingir certo nível

Aqui se encaixam as políticas conhecidas como (s, S) , $(S-I, S)$ e (s, Q) . No primeiro, um novo pedido é realizado quando o nível de estoque atinge s unidades ou menos, de maneira a completar o nível de estoque até S . No segundo caso, o pedido é realizado quando se atinge $S-I$ unidades ou menos em estoque até completar o nível até S . Já no terceiro caso, um pedido de Q unidades é realizado quando o nível de estoque atinge s ou menos. Ou seja, a primeira variável indica o ponto de reposição e a segunda indica a quantidade a ser adquirida.

Normalmente, o ponto de reposição é dimensionado como sendo o estoque de segurança do item (PORRAS; DEKKER, 2008). Este estoque de segurança é definido como a demanda durante o prazo de entrega. Bailey & Helms (2007) utilizaram a maior quantidade de peças retiradas do estoque de uma só vez para definir o estoque de segurança. No trabalho de Vaughan (2005) é sugerido que o ponto de reposição seja aumentado imediatamente antes de uma manutenção preventiva de maneira a forçar a reposição das peças. Após a manutenção, o ponto de reposição retorna ao seu valor usual.

Também foi evidenciado pela literatura que, quando os estoques são compartilhados, geralmente os pontos de reposição são substancialmente reduzidos em comparação com a situação de estoques individuais, mantendo o nível de serviço constante (KUKREJA; SCHMIDT, 2005).

Periodicamente

As políticas (T, Q) e (T, S) utilizam pedidos periódicos para controle de estoque. No primeiro caso, uma quantidade Q é encomendada, enquanto no segundo caso, é encomendada uma quantidade suficiente para atingir o nível máximo S de estoque. Giri et al. (2005) consideram uma estratégia de manutenção corretiva com pedidos periódicos e utilizam pedidos em emergência caso não haja peça em estoque.

Início de operação

Esta estratégia normalmente é utilizada quando a peça tem baixo custo de aquisição, mas um alto custo de pedido (FORTUIN; MARTIN, 1999). Nossohi & Hejazi (2011) consideram, em seu modelo, que a aquisição de peças sobressalentes no início do horizonte de planejamento é mais barata.

3.3.3.2. Quantidade de sobressalentes

Quantidade pré-definida

O conceito de Lote Econômico de Compra pode ser utilizado para definir a quantidade de peças a ser adquirida (PORRAS; DEKKER, 2008). Entretanto, a adoção deste conceito não garante um custo ótimo (CHANG; CHOU; HUANG, 2005).

Quantidade prevista para certo período de tempo

As políticas (s, S) e (T, S) , descritas anteriormente, geralmente utilizam a previsão de demanda durante o prazo de entrega da peça sobressalente para estabelecer um valor ótimo de S . Apesar de vários métodos de previsão de demanda estarem disponíveis nos softwares utilizados no controle de estoque das empresas, a natureza intermitente da demanda faz com que a aplicação destes modelos seja difícil para peças sobressalentes (PORRAS; DEKKER, 2008). Vaughan (2005) sugere que a quantidade S seja aumentada de maneira a atender a demanda da manutenção preventiva e depois reduzida de forma a atender somente as demandas de manutenção corretiva. Para peças reparáveis, normalmente o interesse é em determinar o nível de estoque necessário para assegurar determinado nível de serviço (LOUIT et al., 2010).

3.3.3.3. Relação com o fornecedor

Algumas estratégias de fornecimento advêm do estreitamento do relacionamento com o fornecedor. Uma das práticas mais comuns utilizadas em situações reais, principalmente quando a indisponibilidade deve ser a menor possível, é a remessa em emergência de peças

sobressalentes (LOUIT et al., 2010; WONG et al., 2005). Quando o custo da indisponibilidade do equipamento é muito alto, o suprimento em emergência é mais realista que assumir a falta da peça, mesmo que se pague mais caro pela peça (WONG et al., 2006).

A melhor estratégia de suprimento de um sobressalente é a entrega ocorrendo justamente no momento da falha (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Isto pode ser atingido com políticas de manutenção adequadas e com alta integração entre o consumidor e o fornecedor (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004).

Uma outra forma interessante é a possibilidade de manter itens em estoque consignado (BAILEY; HELMS, 2007; BRAGLIA; FROSOLINI, 2013). De maneira mais abrangente, outra estratégia é a padronização de peças e equipamentos, que possibilita uma melhor negociação na compra de grandes quantidades e também reduz o investimento em estoques (BAILEY; HELMS, 2007; BRAGLIA; FROSOLINI, 2013; ZENG; WANG, 2010).

3.3.3.4. Escolha do fornecedor

A escolha do fornecedor pode ser baseada em custo, prazo de entrega, confiabilidade da peça ou uma combinação destes critérios. No trabalho de Cheng & Prabhu (2012), a escolha é realizada utilizando o critério de menor custo. Wu & Hsu (2008) propuseram uma nova perspectiva para redução do custo de suprimento de peças sobressalentes através da seleção apropriada dos fornecedores de cada peça de cada equipamento. Eles argumentam que uma peça com menor taxa de falha geralmente possui maior custo. Assim, uma configuração com menor taxa de falha tende a requerer menor quantidade de estoque às custas de maior custo unitário. De maneira semelhante, Barabadi et al. (2014) utilizaram o custo e a confiabilidade da peça para escolher um tipo de broca para cada variedade de rocha encontrada na mina de bauxita de Jajarm. Hassan et al. (2012) propuseram que a escolha do fornecedor fosse baseada no menor tempo de entrega. Eles argumentam que, desta forma, a quantidade de peças a ser pedida diminui, reduzindo assim o risco de manter grandes quantidades de peças em estoque sem utilização.

Quando trabalha-se com estoque compartilhado, também é possível escolher qual dos centros irá suprir a demanda da peça sobressalente. No artigo de Kukreja & Schmidt (2005), o critério da escolha do fornecedor é o de menor custo de transporte. Outros autores utilizaram o critério do centro de estoque mais próximo, ou seja, com menor prazo de entrega (CESARO; PACCIARELLI, 2011; WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005a, 2005b; WONG et al., 2005).

3.3.4. Estocagem

3.3.4.1. Controle do estoque

A subcontratação da disponibilidade de peças sobressalentes é uma opção que pode ser explorada. No artigo de Kim et al. (2007) é apresentado um modelo para análise de contratos baseados em desempenho no fornecimento de peças sobressalentes. Este modelo analisa os incentivos de ambas as partes do contrato, levando em consideração também o estágio do ciclo de vida do produto. Cesaro & Pacciarelli (2011) estudaram um sistema de gerenciamento de peças sobressalentes de uma cadeia de suprimento onde o fornecedor de equipamentos é o responsável pelo fornecimento de peças novas e/ou reparadas e uma empresa de logística é responsável pela reposição de peças sobressalentes no curto prazo com garantia de um nível de serviço mínimo regulado através de contratos. Cheng & Prabhu (2012) estudaram a complexidade e o desempenho de um sistema de monitoramento, planejamento, programação de manutenção e suprimento de sobressalentes de ferramentas de corte utilizando a tecnologia de RFID (*Radio Frequency Identification*). Braglia & Frosolini (2013) descreveram um projeto de compartilhamento de peças sobressalentes onde uma parte independente atuava como fornecedora das peças, centralizando as demandas de cinco diferentes empresas.

3.3.4.2. Localização do estoque

Sem estoque ou estoque no fornecedor

A operação de um sistema sem estoque de sobressalentes pode ser uma decisão consciente baseada na avaliação do impacto da ausência da peça no caso de falha versus os custos e problemas advindos de uma disponibilidade imediata do item (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Normalmente, as peças críticas que afetam a produção são caras, tem longos prazos de entrega e sua confiabilidade é alta, tornando o monitoramento de sua condição uma estratégia atrativa para prever o melhor momento de sua aquisição (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013). Ou seja, se é possível detectar o início do processo de falha a tempo de encomendar uma peça sobressalente, não é necessário estocar (LOUIT et al., 2011).

Estoque próprio

A decisão de estocar uma peça sobressalente passa pela avaliação do risco de indisponibilidade da peça para o processo produtivo, pela capacidade de prevenir falhas através de políticas apropriadas de manutenção, pelos problemas de estocagem e pelas características de fornecimento (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004).

Estoque compartilhado

São duas as principais estratégias de compartilhamento de estoques: estoque multiníveis, que é uma estrutura hierárquica que abrange várias camadas de instalações; e o compartilhamento de estoques entre diferentes plantas de processo. Em uma estrutura multinível, as instalações na camada inferior fornecem peças sobressalentes diretamente para os equipamentos, enquanto as situadas em camadas superiores fornecem peças às camadas imediatamente abaixo (WU; HSU, 2008). Já no compartilhamento de estoques são realizadas transferências laterais de um local com estoque excedente para outro local que sofre com a falta de um sobressalente (WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005b; WONG et al., 2006).

O compartilhamento de estoques pode reduzir significativamente os custos totais, principalmente quando o custo de transporte é menor que o custo da indisponibilidade (WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005b; WONG et al., 2006). Wong et al. (2005) encontraram uma redução de custos, em seu estudo de caso, de 24,9%; e Kukreja & Schmidt (2005) encontraram o valor de 31%. Geralmente a economia aumenta com a quantidade de instalações envolvidas, com a meta de nível de serviço, com o custo do sobressalente e com a diminuição do tempo de transporte e do prazo de entrega (KUKREJA; SCHMIDT, 2005; WONG et al., 2005, 2006). Além disso, reduz significativamente a quantidade de pedidos em espera no sistema e melhora o nível de serviço das empresas (WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005b; WONG et al., 2005).

Kilpi et al. (2009) sugerem que o compartilhamento através de uma parte independente é mais eficiente que o compartilhamento cooperativo se o fornecedor do serviço está disposto a repartir benefícios suficientes com os membros e esses estão prontos para confiar um serviço crítico a uma parte externa. Uma cooperação direta com um concorrente é viável quando a empresa está cautelosa em relação a subcontratar disponibilidade de serviço e existe uma empresa próxima com equipamentos semelhantes. Uma cooperação entre várias empresas é viável com uma quantidade limitada de empresas quando não há um fornecedor de serviços comerciais ou se os prestadores de serviço cobram muito caro.

Braglia & Frosolini (2013) descrevem uma aplicação de estoque compartilhado virtual auxilia na localização de peças sobressalentes necessárias com urgência internamente a uma companhia, em toda cadeia de suprimento ou até mesmo de outros setores industriais. Dados atuais de estoque são automaticamente adquiridos de diferentes sistemas onde são armazenados

e disponibilizados para todos os usuários de acordo com as regras pré-definidas pelo proprietário de cada peça do estoque compartilhado. Em alguns casos um protagonista independente é encarregado de agrupar e distribuir as peças sobressalentes em um grupo de empresas cooperadas, e estudos demonstram que vantagens estratégicas podem ser alcançadas através da divisão das despesas de compra.

3.4. Conclusões

A otimização do estoque de peças sobressalentes vem sendo estudada a algumas décadas por diversos autores. Recentemente, o estudo da otimização conjunta das políticas de manutenção e de suprimento de sobressalentes vêm crescendo. Entretanto, a maior parte dos trabalhos são muito específicos, sendo aplicáveis a alguns sistemas apenas. Por outro lado, quanto mais variáveis são levadas em consideração em um modelo, mais complexo ele se torna, impedindo a sua aplicação prática. Assim, este trabalho teve o objetivo de destacar as variáveis de decisão encontradas na literatura, aplicáveis na definição de uma política de estoques de sobressalentes. Até onde é de conhecimento da autora, nenhum outro trabalho semelhante foi publicado na literatura.

A busca foi realizada através de uma revisão sistemática da literatura onde foram revisados 65 artigos. As variáveis foram divididas em quatro categorias distintas: sistema/equipamento, manutenção, suprimento e armazenamento. Para cada variável, as situações que levam a uma determinada decisão foram identificadas e resumidas, assim como algumas das vantagens e dificuldades de aplicação.

Foi observado que as metas e restrições mais utilizadas na definição de uma estratégia são o custo total e a disponibilidade dos ativos. Esta é uma abordagem muito fácil de ser compreendida, mas em geral é difícil de ser aplicada. Dificuldade na obtenção dos custos e de definição de metas de disponibilidade estão entre as razões mais citadas. Na área de manutenção, muitos artigos estudaram a aplicação de políticas preventivas e preditivas em peças reparáveis e não reparáveis. Por fim, nas variáveis de suprimento, há a predominância de políticas tradicionais de estoques próprios, com revisão periódica ou contínua. Outras estratégias de fornecimento, tais como, o compartilhamento de estoques e estreitamento da relação com fornecedores, também foram citadas, porém em menor número.

A principal contribuição deste artigo foi a elaboração de um quadro que pode auxiliar o tomador de decisão a analisar as várias alternativas existentes. Isto é de fundamental importância no momento de definir a melhor estratégia de manutenção de um sistema, levando

em consideração o suprimento de peças sobressalentes. Uma possível extensão deste trabalho é a integração destas variáveis com a metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade.

3.5. Referências

- [1] BAILEY, G. J.; HELMS, M. M. MRO inventory reduction—challenges and management: a case study of the Tennessee Valley Authority. **Production Planning & Control**, v. 18, n. 3, p. 261–270, abr. 2007.
- [2] BARABADI, A.; BARABADY, J.; MARKESSET, T. Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization - A case study. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 123, p. 1–7, 2014.
- [3] BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M. Virtual pooled inventories for equipment-intensive industries. An implementation in a paper district. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 112, p. 26–37, abr. 2013.
- [4] BRAGLIA, M.; GRASSI, A.; MONTANARI, R. Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 1, p. 55–65, 2004.
- [5] BREZAVSCEK, A.; HUDOKLIN, A. Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, p. 112–117, mar. 2003.
- [6] CESARO, A.; PACCIARELLI, D. Performance assessment for single echelon airport spare part management. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 1, p. 150–160, 2011.
- [7] CHAKRAVARTHY, S. R.; GÓMEZ-CORRAL, A. The influence of delivery times on repairable k-out-of-N systems with spares. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 5, p. 2368–2387, 2009.
- [8] CHANG, P.-L.; CHOU, Y.-C.; HUANG, M.-G. A (r, r, Q) inventory model for spare parts involving equipment criticality. **International Journal of Production Economics**, v. 97, p. 66–74, 2005.
- [9] CHENG, C.-Y.; PRABHU, V. Evaluation models for service oriented process in spare parts management. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 4, p. 1403–1417, 5 dez. 2012.
- [10] 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.
- [11] COSTANTINO, F.; GRAVIO, G. DI; TRONCI, M. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 119, p. 95–101, 2013.
- [12] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. On the availability of a k-out-of- N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 83, n. 3, p. 287–300, 2004.
- [13] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of- N system with wear-out. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 182–200, 2006.
- [14] DE SMIDT-DESTOMBES, K. S.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Availability of k-out-of-N systems under block replacement sharing limited spares and repair capacity. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 2, p. 404–421, 2007.
- [15] 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.

- [16] DIALLO, C.; AIT-KADI, D.; CHELBI, A. (s,Q) Spare Parts Provisioning Strategy for Periodically Replaced Systems. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 57, n. 1, p. 134–139, mar. 2008.
- [17] DIAZ, A. Modelling Approaches to Optimise Spares in Multi-echelon Systems. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 6, n. 1, p. 51–62, 2003.
- [18] DIETER, A.; PICKARD, K.; BERTSCHE, B. Periodic Renewal of Spare Parts Using Weibull. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, n. 3, p. 193–198, 2010.
- [19] ELWANY, A. H.; GEBRAEEL, N. Z. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. **IIE Transactions**, v. 40, n. 7, p. 629–639, 2008.
- [20] FORTUIN, L.; MARTIN, H. Control of service parts. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 9, p. 950–971, 1999.
- [21] GAN, S. et al. Intermediate buffer analysis for a production system. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 20, p. 8785–8795, 2013.
- [22] GIRI, B. C.; DOHI, T.; KAIO, N. A discrete-time order-replacement model with time discounting and spare part provisioning. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 11, n. 3, p. 190–205, 2005.
- [23] GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 119, p. 199–2206, 2013.
- [24] HASSAN, J.; KHAN, F.; HASAN, M. A risk-based approach to manage non-repairable spare parts inventory. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 3, p. 344–362, 2012.
- [25] HUANG, R. et al. Modeling and Analyzing a Joint Optimization Policy of Block-Replacement and Spare Inventory With Random-Leadtime. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 57, n. 1, p. 113–124, mar. 2008.
- [26] HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 125–133, 2001.
- [27] ILGIN, M. A.; TUNALI, S. Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 5-6, p. 594–604, 2007.
- [28] KILPI, J.; TÖYLI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. **International Journal of Production Economics**, v. 117, n. 2, p. 360–370, 2009.
- [29] KILPI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. P. J. Pooling of spare components between airlines. **Journal of Air Transport Management**, v. 10, n. 2, p. 137–146, mar. 2004.
- [30] KIM, S.-H.; COHEN, M. A.; NETESSINE, S. Performance contracting in after-sales service supply chains. **Management Science**, v. 53, n. 12, p. 1843–1858, 2007.
- [31] KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele University Technical Report**, 2004.
- [32] KUKREJA, A.; SCHMIDT, C. P. A model for lumpy demand parts in a multi-location inventory system with transshipments. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 8, p. 2059–2075, ago. 2005.
- [33] LAU, H. C. et al. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation. **European Journal of Operational Research**, v. 170, p. 91–105, 2006.
- [34] LI, R.; RYAN, J. K. A Bayesian Inventory Model Using Real-Time Condition Monitoring Information. **Production and Operations Management**, v. 20, n. 5, p. 754–771, 2011.

- [35] LOUIT, D. et al. Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 992–1004, 2 jun. 2010.
- [36] LOUIT, D. et al. Condition-based spares ordering for critical components. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 1837–1848, 2011.
- [37] MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.; PODOFILLINI, L. Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 87, n. 3, p. 325–335, mar. 2005.
- [38] MIJAILOVIC, V. Optimal spares availability strategy for power transformer components. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 8, p. 987–992, 2010.
- [39] MOLENAERS, A. et al. Criticality classification of spare parts: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 140, p. 570–578, 2012.
- [40] NGUYEN, D.; BAGAJEWICZ, M. Optimization of Preventive Maintenance in Chemical Process Plants. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 9, p. 4329–4339, 2010.
- [41] 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, p. 1157–1166, 2011.
- [42] PATANKAR, R. et al. Global search algorithm for automated maintenance planning and scheduling of parts requests. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 6, p. 1751–1757, jun. 2009.
- [43] PORRAS, E.; DEKKER, R. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. **European Journal of Operational Research**, v. 184, p. 101–132, 2008.
- [44] 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.
- [45] SALMAN, S. et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 23, n. 4, p. 445–457, jun. 2007.
- [46] SAVSAR, M. Analysis and modeling of maintenance operations in the context of an oil filling plant. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 22, n. 5, p. 679–697, 2011.
- [47] SCHULTZ, C. R. Spare parts inventory and cycle time reduction. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 4, p. 759–776, 15 fev. 2004.
- [48] SHEU, S.-H.; CHIEN, Y.-H. Optimal age-replacement policy of a system subject to shocks with random lead-time. **European Journal of Operational Research**, v. 159, n. 1, p. 132–144, nov. 2004.
- [49] SHUM, Y.-S.; GONG, D.-C. The application of genetic algorithm in the development of preventive maintenance analytic model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, n. 1-2, p. 169–183, 21 jan. 2007.
- [50] SLEPTCHENKO, A.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Trade-off between inventory and repair capacity in spare part networks. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 3, p. 263–272, 1 mar. 2003.
- [51] SLEPTCHENKO, A.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; VAN HARTEN, A. Using repair priorities to reduce stock investment in spare part networks. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 733–750, jun. 2005.

- [52] TSAKATIKAS, D.; DIPLARIS, S.; SFANTSIKOPOULOS, M. Spare parts criticality for unplanned maintenance of industrial systems. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 94–107, 2008.
- [53] VAN HORENBEEK, A. et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 499–508, 2013.
- [54] VAN JAARSVELD, W.; DEKKER, R. Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, p. 1576–1586, 2011.
- [55] VAUGHAN, T. S. Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy. **European Journal of Operational Research**, v. 161, n. 1, p. 183–190, 2005.
- [56] WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 14, n. 4, p. 387–401, 2008a.
- [57] 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, nov. 2008b.
- [58] WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure. **European Journal of Operational Research**, v. 194, n. 1, p. 184–205, abr. 2009.
- [59] WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 11, p. 1535–1541, 2011.
- [60] 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.
- [61] WANG, W.; PECHT, M. G.; LIU, Y. Cost Optimization for Canary-Equipped Electronic Systems in Terms of Inventory Control and Maintenance Decisions. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 61, n. 2, p. 466–478, jun. 2012.
- [62] WONG, H. et al. Simple, efficient heuristics for multi-item multi-location spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints. **Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 12, p. 1419–1430, 16 mar. 2005.
- [63] WONG, H. et al. Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 3, p. 1071–1093, jun. 2006.
- [64] WONG, H.; CATTRYSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Stocking decisions for repairable spare parts pooling in a multi-hub system. **International Journal of Production Economics**, v. 93-94, p. 309–317, 2005a.
- [65] WONG, H.; CATTRYSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Inventory pooling of repairable spare parts with non-zero lateral transshipment time and delayed lateral transshipments. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 207–218, ago. 2005b.
- [66] WU, M.; HSU, Y. Design of BOM configuration for reducing spare parts logistic costs. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 2417–2423, 2008.
- [67] ZENG, Y.; WANG, L. A hybrid decision support system for slow moving spare parts joint replenishment: a case study in a nuclear power plant. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 37, n. 3/4, p. 287–196, 2010.
- [68] ZENG, Y.-R.; WANG, L.; HE, J. A Novel Approach for Evaluating Control Criticality of Spare Parts Using Fuzzy Comprehensive Evaluation and GRA. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 14, n. 3, p. 392–401, 2012.

[69] ZIJM, W. H.; AVŞAR, Z. M. Capacitated two-indenture models for repairable item systems. **International Journal of Production Economics**, v. 81-82, p. 573–588, jan. 2003.

4. TERCEIRO ARTIGO

Proposta de ferramenta de diagnóstico e seleção de estratégia de fornecimento de peças sobressalentes

Resumo

Este artigo apresenta uma ferramenta para suporte à tomada de decisão a respeito do suprimento e estocagem de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Após revisão da literatura acerca do tema, foram desenvolvidos dois questionários fechados para coletar as informações necessárias para tomada de decisão. Esses questionários resumem as variáveis de decisão envolvidas na escolha da estratégia de suprimento. Através destes questionários, foi possível analisar as informações reunidas e definir a melhor estratégia de suprimento para os casos estudados. A aplicação dos mesmos é ilustrada em dois estudos de caso realizados em equipamentos de uma empresa do ramo petroquímico. A ferramenta desenvolvida se mostrou útil para a identificação de lacunas na estratégia de suprimento vigente, trazendo opções de decisões possíveis de serem tomadas.

Palavras-chave: Sobressalentes; Estoques; Manutenção; Tomada de decisão; Indústria petroquímica.

Abstract

This paper presents a decision-making support tool regarding the supply and storage of spare parts in industrial maintenance. After reviewing the literature on the subject, we developed two closed questionnaires to collect the necessary information for decision-making. These questionnaires summarize the decision variables involved in the choice of supply strategy. Through these questionnaires, it was possible to analyze the information gathered and determine the best procurement strategy for the cases studied. We illustrate the application in two case studies carried out in two equipment of a petrochemical company. The tool developed proved to be useful for identifying gaps in current supply strategy and introducing possible decision options to choose.

Keywords: Spare parts; Inventory; Maintenance; Decision-making; Petrochemical industry.

4.1. Introdução

A manutenção industrial desempenha um papel importante para assegurar a disponibilidade dos equipamentos e a segurança das operações na indústria de manufatura (WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005b). Esta disponibilidade operacional é dependente da operação e da manutenção praticada nas plantas industriais (TSAKATIKAS; DIPLARIS; SFANTSIKOPOULOS, 2008). No cenário atual, observa-se que as empresas têm sofrido pressão para aumentar a disponibilidade de seus processos e, ao mesmo tempo, para reduzir seus custos operacionais (GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013).

As ações de manutenção geralmente dependem da acessibilidade a peças sobressalentes para reduzir a indisponibilidade e os custos incorridos quando um equipamento falha (VAN HORENBEEK et al., 2013). A indisponibilidade pode ser prolongada se as peças necessárias para seu reparo não estão prontamente disponíveis (HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; VAN JAARVELD; DEKKER, 2011). Entretanto, a estocagem descomedida de peças sobressalentes também pode gerar custos substanciais; portanto, a decisão de armazenar ou não peças sobressalentes, e em quais quantidades, não é um processo trivial (VAN JAARVELD; DEKKER, 2011). Além disso, muitas empresas armazenam peças redundantes, desnecessárias ou obsoletas (MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005; PORRAS; DEKKER, 2008; WONG; CATTRYSSSE; VAN OUDHEUSDEN, 2005a). Estudos mostram que o valor estimado de peças sobressalentes estocadas em grandes empresas pode ultrapassar a casa das dezenas de milhões de dólares (BAILEY; HELMS, 2007; BRAGLIA; FROSOLINI, 2013; CHANG; CHOU; HUANG, 2005; MOLENAERS et al., 2012; PORRAS; DEKKER, 2008). Portanto, os processos de aquisição e estocagem de sobressalentes, frequentemente, tem um impacto direto no desempenho de uma empresa, fazendo com que o gerenciamento efetivo da manutenção e das peças sobressalentes seja essencial para assegurar a integridade dos equipamentos com o menor custo (BREZAVSCEK; HUDOKLIN, 2003; GODOY; PASCUAL; KNIGHTS, 2013; HASSAN; KHAN; HASAN, 2012; VAN HORENBEEK et al., 2013).

A definição de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes geralmente é realizada em várias etapas. Cavalieri et al. (2008) propuseram uma abordagem de cinco etapas: codificação, classificação, previsão da demanda, definição da política de estocagem e validação da política de estocagem. Para cada uma dessas etapas, apresentaram uma revisão da literatura, complementando o artigo com um estudo de caso. Bailey & Helms (2007) apresentaram um estudo de caso em uma empresa de energia elétrica americana onde foi realizado um trabalho

de cinco anos para reduzir o estoque de peças sobressalentes. O primeiro passo envolveu classificar os sobressalentes em críticos e não críticos. Em seguida foram tomadas ações, dentre as quais figuram a delegação do controle de estoque de itens de baixo custo e alto consumo para os fornecedores, a eliminação de estoque desnecessário e o compartilhamento de estoque entre plantas. Também foram definidas as políticas de estoque de segurança, quantidade de peças compradas e periodicidade de compras. Já Hassan et al. (2012) propuseram uma abordagem baseada em risco para a previsão de demanda e gerenciamento de estoques de peças sobressalentes. A metodologia proposta por esses autores é dividida em quatro etapas: classificação de criticidade do componente, determinação da demanda, estimativa e redução do risco e definição da estratégia de controle de estoque.

Como pode ser observado, primeiramente os sobressalentes são classificados para, depois, serem definidas as estratégias de suprimento. A classificação é uma etapa importante, pois agrupa em uma mesma categoria, itens de características parecidas cujas decisões de suprimento são semelhantes (HUISKONEN, 2001). Além disso, dessa maneira é possível considerar simultaneamente fatores mensuráveis e não mensuráveis, o que é importante na seleção de uma estratégia adequada de manutenção (CHENG; TSAO, 2010).

O esquema de classificação mais popular e utilizado é o ABC, que segue o princípio de Pareto. Geralmente ele é baseado em dados históricos de custos de armazenamento, os quais podem ser obtidos com relativa facilidade (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Duchessi et al. (1988) propuseram um esquema de classificação bidimensional, onde foi considerado, além dos custos, a criticidade da peça. Esta criticidade é calculada como sendo os custos de indisponibilidade do sistema durante o prazo de entrega do fornecedor.

Infelizmente, abordagens unidimensionais e bidimensionais não tornam possível discriminar todos os parâmetros de controle potenciais dos diferentes tipos de itens (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Para superar esta limitação, alguns autores desenvolveram modelos de classificação multi-atributo. Gajpal et al. (1994) foram os primeiros a aplicar a metodologia AHP (*Analytic Hierarchic Process*) na definição de criticidade de peças sobressalentes. Eles utilizaram três critérios com três níveis cada um: impacto da falha na disponibilidade produtiva da planta, especificidade da peça e prazo de entrega. De maneira um pouco mais elaborada, Braglia et al. (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004) basearam-se em 18 critérios com três níveis. Zeng et al. (2012) propuseram um método baseado em sete

critérios que recebem pontuação de 1 a 9 que, na sequência, são transformadas em alta, média e baixa criticidade.

Outras duas etapas importantes no estabelecimento de uma estratégia de suprimento de sobressalentes são a previsão da demanda e a definição da política de estocagem. A demanda é determinada pela manutenção, tanto corretiva quanto preventiva, para cada peça sobressalente (VAN HORENBEEK et al., 2013). Normalmente, os modelos de manutenção pressupõem uma quantidade infinita de estoque e consideram que as peças estão disponíveis sem espera (ELWANY; GEBRAEEL, 2008; VAN HORENBEEK et al., 2013). Essas suposições não são realistas, pois o custo de manter tal sistema seria proibitivo para muitas empresas (VAN HORENBEEK et al., 2013). Por sua vez, os estoques de sobressalentes geralmente são controlados através da aplicação de princípios gerais de gerenciamento de estoques (HUISKONEN, 2001). Contudo, a baixa quantidade de dados históricos, a baixa demanda e os padrões de demanda estocásticos e irregulares, tornam a aplicação destes princípios inadequada (BAILEY; HELMS, 2007; FORTUIN; MARTIN, 1999; PORRAS; DEKKER, 2008). Assim, é evidente que a manutenção e o gerenciamento de estoques são fortemente interconectados e devem ser considerados de maneira conjunta na otimização dos resultados de operação de uma empresa (VAN HORENBEEK et al., 2013).

Na prática, a previsão de demanda é realizada através da verificação da demanda em anos anteriores (BAILEY; HELMS, 2007). Entretanto esta forma não é conveniente quando o inventário tem baixa rotatividade ou em projetos novos (BAILEY; HELMS, 2007), (LOUIT et al., 2010). No estudo de Porras & Dekker (2008), verificou-se que 90% das peças sobressalentes tiveram uma demanda relativamente baixa ao longo de um período de cinco anos, e que as demandas altas e irregulares são causadas principalmente por manutenções preventivas. Assim, recomenda-se que estes eventos sejam identificados para melhor controle do estoque de peças.

A predição e otimização de peças sobressalentes são problemas complexos e requerem a identificação de todos os fatores influentes, assim como a seleção do modelo matemático apropriado para quantificar seus efeitos na quantidade necessária de peças sobressalentes (BARABADI; BARABADY; MARKESET, 2014). Para isso, todos os aspectos relacionados devem ser considerados, de maneira que a tomada de decisão seja melhor embasada. Neste trabalho, procurou-se levantar os critérios importantes para a definição de uma estratégia de suprimento de uma peça sobressalente para que, na sequência, a tomada de decisão fosse realizada mais facilmente. Estes critérios estão elencados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1. Critérios utilizados na escolha da estratégia de suprimento do sobressalente. Fonte: elaborado pela autora

Características	Critério	Referências
Sistema / equipamento	Quantidade de peças idênticas em operação	[1] [2] [3] [4] [5] [7] [8] [14] [17] [21] [25] [27] [28] [29]
	Impacto da falha da peça para o processo produtivo	[1] [3] [4] [5] [7] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [20] [21] [25] [27] [28] [29] [30]
	Manutenibilidade equipamento	[3] [18] [25] [27]
	Custo de manutenção do equipamento	[10]
Peça	Confiabilidade da peça	[1] [2] [3] [4] [5] [7] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [20] [21] [25] [27] [28] [29] [30]
	Manutenibilidade da peça	[3] [17] [18] [28] [29] [30]
	Custo de reparo da peça	[4]
Suprimento da peça	Custo de colocação de pedido	[3] [5] [17] [21] [28] [29]
	Tempo de espera até fornecimento peça	[1] [3] [4] [5] [7] [10] [13] [14] [17] [18] [19] [20] [21] [25] [27] [28] [29] [30]
	Quantidade de fornecedores potenciais	[3] [4] [13] [28] [29] [30]
Estocagem do sobressalente	Custo da peça sobressalente	[1] [2] [3] [4] [5] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [21]
	Custo de armazenamento	[4] [5] [7] [10] [14] [17] [18] [21] [27] [28] [29] [30]

Durante as últimas décadas, vários modelos de otimização de estoques de sobressalentes foram estudados na literatura (HUISKONEN, 2001; VAN HORENBEEK et al., 2013). Um dos primeiros foi o METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*) para peças reparáveis no contexto militar (SHERBROOKE, 1968). Ao longo dos anos, ele foi sendo modificado dando origem a outros modelos, tais como, o MOD-METRIC e o VARI-METRIC. Para uma revisão acerca destes modelos, recomenda-se consultar Rustenburg et al. (2001). Em Kennedy et al. (2002) podem ser encontradas um número maior de referências de pesquisas no assunto estoque de peça sobressalente, divididos em gerenciamento, manutenção preventiva, estoque multi-nível, obsolescência, peças reparáveis e aplicações especiais. Outra tendência atual é a otimização conjunta de estoques de sobressalentes e manutenção dos equipamentos. Neste contexto, Van Horenbeek et al. (2013) construíram um quadro que apresenta as características de vários modelos encontrados na literatura.

Com o avanço da informática, os modelos têm ficado mais elaborados e precisos (HUISKONEN, 2001). Contudo, é difícil transferir esses avanços para a prática gerencial, pois a maioria dos gerentes não se sente confortável na aplicação de modelos matemáticos se eles não entendem como eles foram embasados. Além disso, ao otimizar um sistema, frequentemente diferentes metas estão envolvidas, e essas, muitas vezes, são conflitantes (MARSEGUERRA; ZIO; PODOFILLINI, 2005). Segundo Martin et al. (2010), a revisão da literatura claramente demonstra que modelos quantitativos e técnicas de previsão de demanda

não são suficientes para controlar o estoque de peças sobressalentes. Braglia et al. (2004) e Huiskonen (2001) argumentam que a maior parte destas metodologias envolve propostas que são muito complexas, restritivas ou muito simples, reduzindo assim a sua utilidade para um gerente de manutenção. Para contornar estes problemas, neste trabalho, sugere-se uma abordagem qualitativa. Através de uma revisão da literatura, foram levantadas as variáveis de decisão relacionadas ao suprimento de peças sobressalentes, conforme Quadro 4.2. O conjunto de decisões das variáveis listadas geram a estratégia de suprimento a ser adotada.

Quadro 4.2. Variáveis de decisão na definição de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes. Fonte: elaborado pela autora

Característica	Variável de decisão	Referências
Sistema / equipamento	Priorização de equipamentos sob manutenção	[7]
	Quantidade de mão-de-obra alocada	[17]
	Objetivos e restrições	[1] [3] [5] [7] [8] [10] [13] [17] [18] [20] [21] [25] [28] [29]
	Horizonte de planejamento	[2] [17] [18]
Manutenção da peça	Tipo de manutenção predominante	[2] [4] [5] [8] [10] [13] [17] [18] [20] [25] [27] [28] [29] [30]
	Atuação em peças ou módulos	[2] [3] [5] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [25] [27] [28] [29] [30]
	Atividade (reparo ou substituição)	[2] [3] [5] [7] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [25] [27] [28] [29] [30]
	Local de reparo da peça	[17] [18] [25] [28] [29] [30]
Suprimento da peça	Momento de realização de pedidos	[1] [4] [5] [7] [10] [13] [14] [17] [21] [25] [27]
	Quantidade de sobressalentes	[1] [3] [4] [5] [7] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [21] [27] [28] [29]
	Relação com o fornecedor	[1] [3] [4] [17]
	Escolha do fornecedor	[2] [14] [28] [29]
Estocagem da peça	Controle de estoque	[3]
	Localização do estoque	[1] [3] [4] [5] [7] [8] [10] [13] [14] [17] [18] [20] [21] [25] [27] [28] [29]

A relação entre os critérios e a estratégia de suprimento também já foi estudada por outros autores. Sheikh et al. (1991) utilizaram o custo e a criticidade da peça para definir a política de suprimento de peças sobressalentes, através de uma matriz. Além deles, Fortuin & Martin (1999) e Huiskonen (2001) também apresentaram tabelas que relacionam critérios a estratégias de suprimento de peças sobressalentes. Braglia et al. (2004) utilizaram o resultado de seu algoritmo de classificação de peças para sugerir estratégias de gerenciamento de estoques. Neste trabalho construiu-se um diagrama para ilustrar as influências de cada critério elencado no Quadro 4.1 em cada uma das variáveis de decisão do Quadro 4.2. Este diagrama foi dividido em duas partes para melhor entendimento como mostrado nas Figuras 4.1 e 4.2.

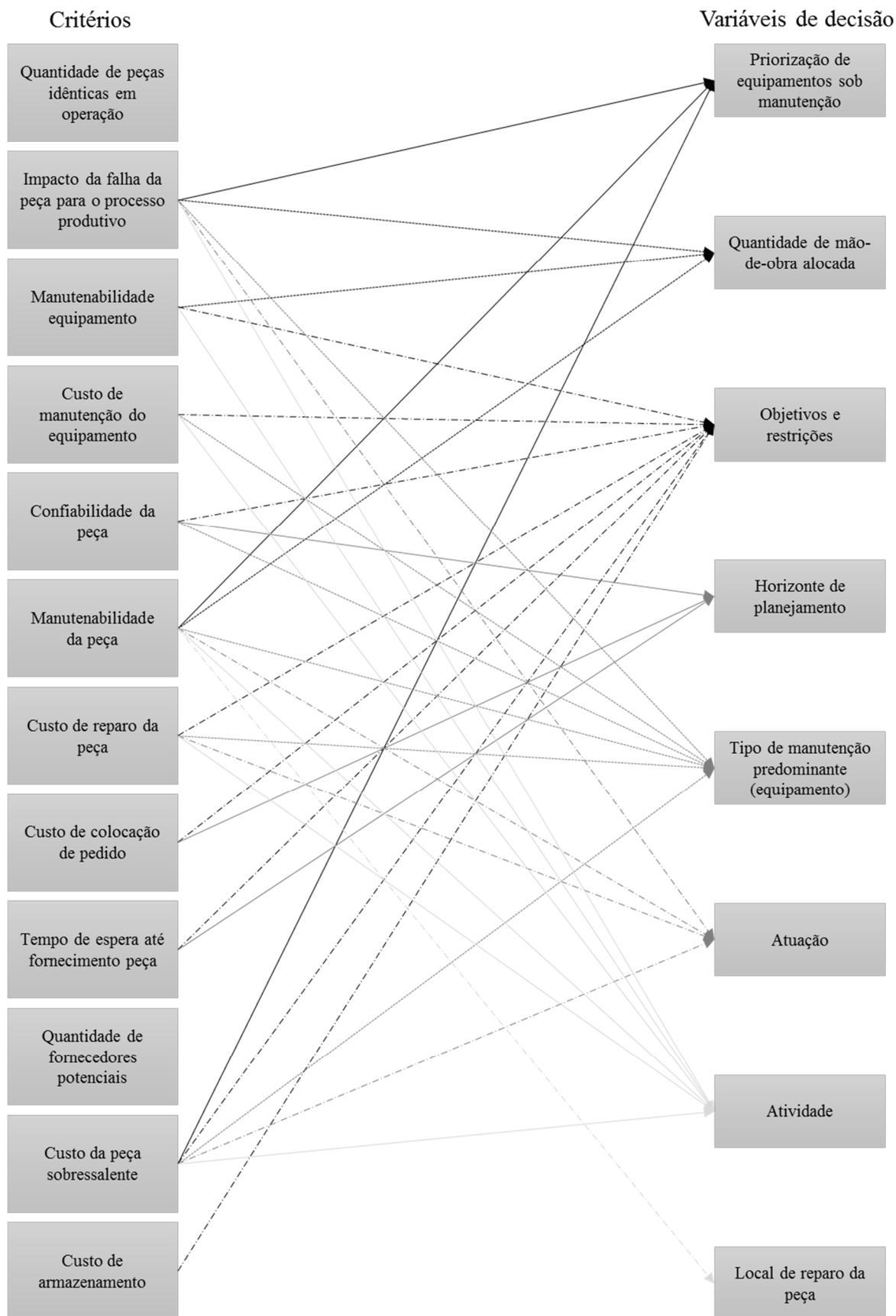


Figura 4.1. Diagrama de relação entre os critérios e as variáveis de decisão das categorias sistema/equipamento e manutenção da peça.

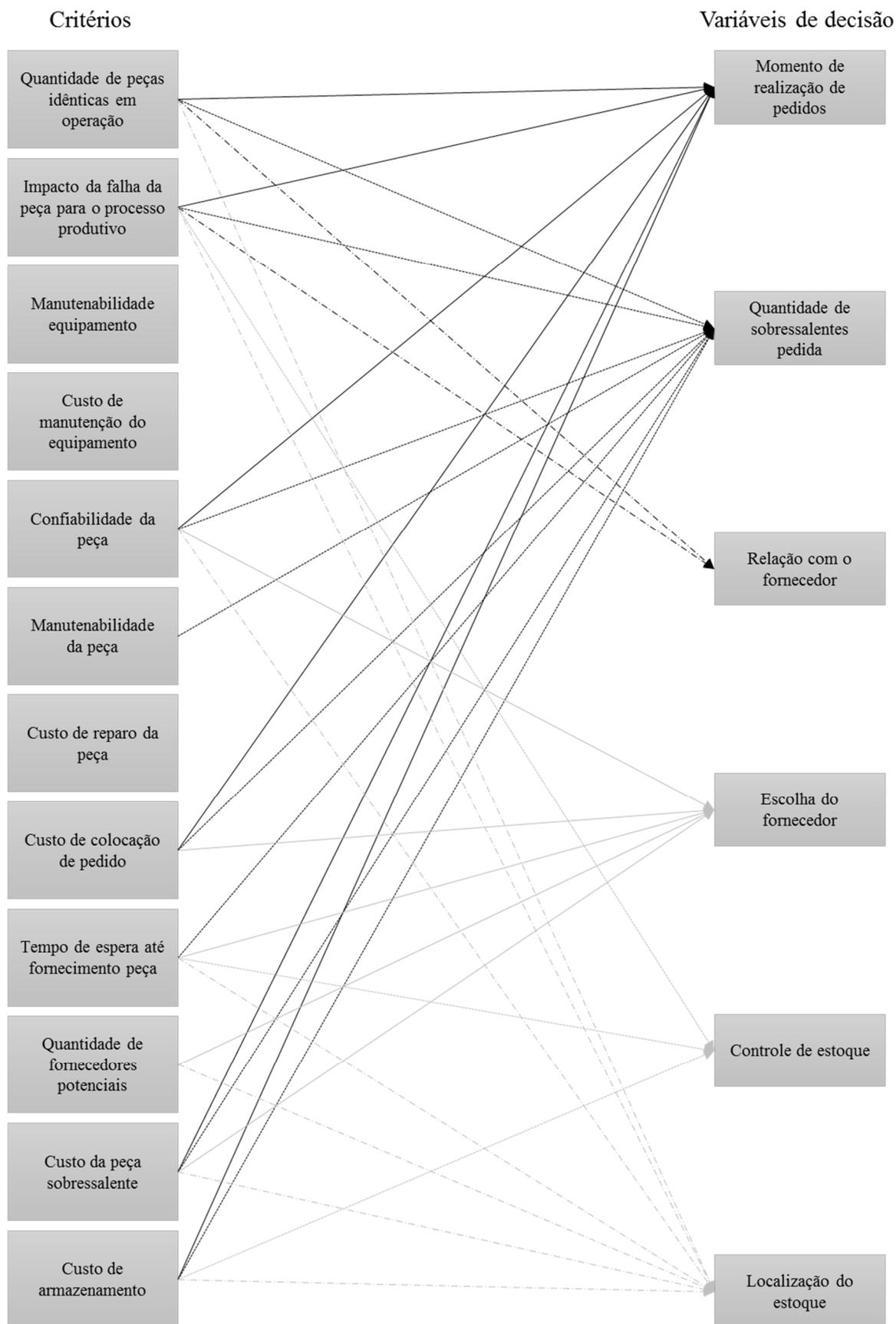


Figura 4.2. Diagrama de relação entre os critérios e as variáveis de decisão das categorias suprimento e estocagem da peça. Fonte: elaborada pela autora.

O objetivo deste artigo é elaborar uma ferramenta suficientemente abrangente e passível de aplicação prática no auxílio à elaboração de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes de equipamentos industriais. A aplicação da ferramenta desenvolvida será ilustrada através de dois estudos de caso.

Este artigo está organizado como segue. Na Seção 4.2 são descritos os procedimentos metodológicos utilizados. Nas Seções 4.3 e 4.4 são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos estudos de caso. Finalmente, a Seção 4.5 traz as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

4.2. Método de pesquisa

Esta pesquisa pode ser classificada, do ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada, pois os resultados têm interesse imediato para empresas que desejam aprimorar métodos de controle de peças sobressalentes. Quanto à abordagem, a pesquisa é considerada qualitativa, pois os resultados são apresentados de maneira textual. Com relação aos objetivos, a pesquisa pode ser considerada exploratória, pois promove maior familiaridade com o problema. Considerando os procedimentos, esta pesquisa é classificada como estudo de caso, visto que são estudados apenas alguns tipos de equipamentos com grande detalhe.

Baseado no Quadro 4.1, foi elaborado um questionário fechado acerca dos critérios utilizados na definição da estratégia de suprimento de peças sobressalentes, conforme mostra o Quadro 4.3. As alternativas de resposta são qualitativas, e, para as perguntas sobre variáveis quantitativas, foram consideradas faixas de valores como resposta. Essas faixas podem variar de acordo com o contexto de aplicação do questionário; no Quadro 4.3 são mostradas as faixas utilizadas neste trabalho. De maneira semelhante, foi elaborado um questionário fechado acerca da estratégia de suprimento adotada para a peça sobressalente em questão, que está mostrado no Quadro 4.4.

Para ilustrar a aplicação dos questionários na definição de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes, foram realizados estudos de caso em dois tipos de equipamentos industriais de um setor específico de uma empresa do ramo petroquímico. Os equipamentos escolhidos contêm poucas peças sobressalentes, o que facilita uma primeira aplicação dos conceitos aqui descritos. Apesar disso, os custos de suas peças sobressalentes representam 49% dos gastos anuais do setor.

A Figura 4.3 mostra as etapas do trabalho. Primeiramente os equipamentos foram divididos em peças e/ou módulos. Neste estudo, foram consideradas apenas as partes cuja falha impede o funcionamento do equipamento. Portanto, a criticidade da falha da peça é a mesma criticidade da falha do equipamento para o processo.

Em seguida, para cada parte, foram identificados os diferentes tipos utilizados na empresa em questão. Estas duas etapas foram realizadas através de visitas ao campo e de consultas a documentos de engenharia. Para cada tipo, foram aplicados questionários fechados a respeito dos critérios e das variáveis de decisão para a escolha da estratégia de suprimento, conforme os Quadros 4.3 e 4.4. As respostas foram obtidas através de consultas aos manuais dos equipamentos, histórico de intervenções, sistema de controle de estoque e *brainstorms* com técnicos de manutenção experientes nestes tipos de equipamento.

Por fim, considerando as respostas do primeiro questionário e baseadas nos diagramas das Figuras 4.1 e 4.2 foram propostas melhorias na estratégia de suprimento de sobressalentes para cada peça, em relação à estratégia atualmente utilizada pela empresa.

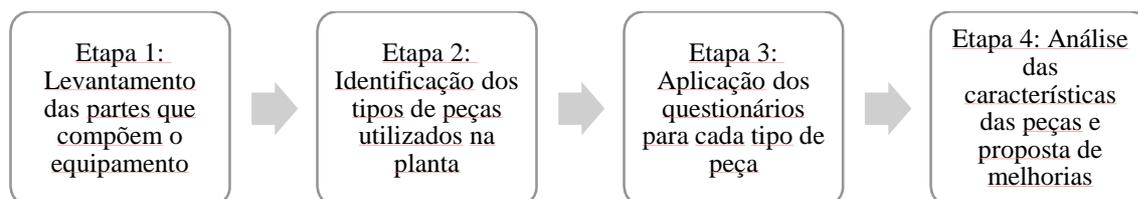


Figura 4.3. Etapas do trabalho realizado. Fonte: elaborada pela autora.

Quadro 4.3. Questionário a respeito dos critérios para definição de estratégia de suprimento de peças sobressalentes. Fonte: elaborado pela autora

Característica	Critério	Opções	Faixa de valores
Sistema / equipamento	Quantidade de peças idênticas em operação	Baixa	1 unidade
		Média	De 2 a 10 unidades
		Alta	Mais que 10 unidades
	Impacto da falha da peça para o processo produtivo	Baixo	1 e 2
Médio		3 e 4	
Alto		5 e 6	
Tempo de substituição da peça	Baixo	Minutos	
	Médio	Horas	
	Alto	Dias	
Custo de manutenção do equipamento	Baixo	Pouca mão-de-obra	
	Médio	Recursos adicionais	
	Alto	Equipamentos especiais	
Manutenção da peça	Tipo de falha	Falha aleatória	
		Falha não aleatória	
	Frequência de falha	Baixa	> 2 anos
		Média	Entre 6 meses e 2 anos
		Alta	< 6 meses
	Modularidade	Modular	
		Peça individual	
Tempo de manutenção	Não reparável		
	Baixa	Minutos	
	Média	Horas	
Custo de reparo da peça em relação ao custo da peça	Alto	Dias	
	Não aplicável		
	Baixo	< 50% custo da peça	
Possibilidade de manutenção preditiva	Médio	Entre 50% e 100%	
	Alto	> 100% custo da peça	
	Sim		
Suprimento da peça	Custo de colocação de pedido em relação ao custo unitário da peça	Não	
		Baixo	1:10
		Médio	1:1
	Prazo de entrega fornecedor	Alto	10:1
		Baixo	Dias
		Médio	Semanas
	Quantidade de fornecedores potenciais	Alto	Meses
		Baixa	1 fornecedor
		Média	2 ou 3 fornecedores
	Quantidade de potenciais centros de estoque compartilhado	Alta	> 3 fornecedores
Baixa		1 centro	
Média		2 ou 3 centros	
Estocagem da peça	Custo da peça sobressalente	Alta	> 3 centros
		Médio	< 1 000 dólares
		Baixo	Entre 1 000 e 10 000 dólares
	Custo de armazenamento	Alto	> 10 000 dólares
		Médio	Pequeno volume
		Baixo	Médio volume
	Obsolescência	Equipamento comercializado	Grande volume ou armazenamento especial
Equipamento fora de linha		Sobressalentes ainda comercializados	
Sobressalentes descontinuados			

Quadro 4.4. Questionário a respeito da estratégia de suprimento de peças sobressalentes. Fonte: elaborado pela autora

Característica	Decisão	Opções	Faixa de valores
Sistema / equipamento	Priorização da manutenção	Com priorização Sem priorização	
	Quantidade de mão-de-obra alocada	Pequena Adequada Folgada	
	Objetivos	Disponibilidade Confiabilidade Custo total	
	Restrições	Disponibilidade Confiabilidade Custo total	
	Horizonte de planejamento	Curto prazo Médio prazo Longo prazo	1 ano 5 anos 10 anos
Manutenção da peça	Tipo de manutenção predominante	Corretiva Preventiva Preditiva	
	Atuação	Atuação em módulos Atuação em peças	
	Atividade	Reparo in loco Substituição c/ reparo Substituição c/ descarte	
	Local de reparo da peça	Não aplicável Fornecedor Oficina Campo	
Suprimento da peça	Momento de realização de pedidos	Quando falhar ou falha for prevista Quando estoque atingir certo nível Periodicamente Início de operação	
	Quantidade de sobressalentes pedida	Quantidade fixa Quantidade prevista para um certo período	
	Quantidade de sobressalentes em estoque	Nenhuma Baixa Média Alta	Uma unidade \leq quantidade de peças em operação $>$ quantidade de peças em operação
	Relação com o fornecedor	Sem relação especial Com relação especial	Prazo garantido, pedido em emergência
	Escolha do fornecedor baseado em	Preço Confiabilidade Entrega Índice combinando anteriores	
Estocagem da peça	Controle de estoque	Próprio Terceirizado	
	Localização do estoque	Sem estoque/estoque no fornecedor Estoque próprio Estoque compartilhado	

4.3. Estudo de caso 1

O equipamento do estudo de caso 1 que, para fins deste artigo será chamado de equipamento X, pode ser dividido em três partes essenciais: eletrônica, condutor e sensor. A empresa possui 34 equipamentos deste tipo instalado nos mais diversos processos. Foram identificados 8 tipos de eletrônicas com características distintas que poderiam ter aplicação na planta estudada. Da mesma forma, foram identificados 4 tipos diferentes de condutores e 4 tipos de sensores, conforme Quadro 4.5.

Alguns tipos de peças podem substituir outros por terem características mais abrangentes. Não há equipamento instalado cuja eletrônica seja do tipo C, D ou H. Entretanto, estes podem ser instalados no lugar de outros tipos de eletrônicas: o tipo C pode substituir o tipo A; o tipo D pode substituir os tipos A, B e C; e o tipo H pode substituir os tipos E, F e G, conforme Quadro 4.5. O mesmo acontece com os condutores e sensores.

Quadro 4.5. Tipos de peças do equipamento X.

Peça	Tipos	Substitui tipo	Quantidade instalada
Eletrônica	Tipo A	-	7
	Tipo B	A	5
	Tipo C	A	-
	Tipo D	A, B e C	-
	Tipo E	-	13
	Tipo F	E	1
	Tipo G	E	8
	Tipo H	E, F e G	-
Condutor	Tipo A	-	27
	Tipo B	A	1
	Tipo C	-	4
	Tipo D	C	2
Sensor	Tipo A	-	16
	Tipo B	A	8
	Tipo C	A e B	4
	Tipo D	-	6

O Quadro 4.6 apresenta as respostas do questionário de critérios para os diferentes tipos de eletrônicas e o Quadro 4.7 para os condutores e sensores. O Quadro 4.8 mostra as respostas a respeito das variáveis de decisão das eletrônicas, enquanto o Quadro 4.9 dos condutores e sensores.

Quadro 4.6. Respostas do questionário de critérios para as eletrônicas do equipamento X.

Peça		Eletrônica							
Equipamento / sistema	Tipo	A	B	C	D	E	F	G	H
Equipamento / sistema	Quantidade peças idênticas	Média	Média	Média*	Alta*	Alta	Baixa	Média	Alta*
	Impacto da falha	Médio	Médio	Médio*	Médio*	Médio	Baixo	Baixo	Médio*
	Tempo de substituição	Médio							
	Custo de manutenção	Baixo							
Peça	Tipo de falha	Aleatória							
	Frequência de falha	Baixa							
	Modularidade	Modular							
	Tempo de reparo	Baixo							
	Custo reparo peça	Médio							
	Possibilidade preditiva	Não							
Suprimento da peça	Custo de pedido	Baixo							
	Prazo de entrega	Alto							
	Quantidade fornecedores	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Média
	Quantidade centros compartilhado	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Média
Estocagem da peça	Custo peça	Médio							
	Custo armazenamento	Baixo							
	Obsolescência	Equipamento comercializado							

* Apesar de não existir eletrônicas dos tipos C, D e H instalados na empresa, as respostas para estes tipos consideraram a utilização no lugar de outros tipos.

Quadro 4.8. Respostas do questionário de variáveis de decisão para as eletrônicas do equipamento X.

Peça		Eletrônica							
Tipo		A	B	C	D	E	F	G	H
Equipamento/ sistema	Priorização	Com priorização	Com priorização	-	-	Com priorização	Sem priorização	Sem priorização	-
	Mão-de-obra	Adequada	Adequada	-	-	Adequada	Adequada	Adequada	-
	Objetivo	Disponibilidade	Disponibilidade	-	-	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	-
	Restrições	Custo total	Custo total	-	-	Custo total	Custo total	Custo total	-
	Horizonte planejamento	Curto prazo	Curto prazo	-	-	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	-
Peça	Tipo manutenção	Corretiva	Corretiva	-	-	Corretiva	Corretiva	Corretiva	-
	Atuação	Módulos	Módulos	-	-	Módulos	Módulos	Módulos	-
	Atividade	Substituição e descarte	Substituição e descarte	-	-	Substituição e descarte	Substituição e descarte	Substituição e descarte	-
	Local reparo	Não aplicável	Não aplicável	-	-	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	-
Suprimento da peça	Momento pedido	Quando falhar ou previsão	Quando falhar ou previsão	-	-	Quando falhar ou previsão	Quando falhar ou previsão	Quando atingir certo nível	-
	Quantidade pedida	Quantidade fixa	Quantidade fixa	-	-	Quantidade fixa	Quantidade fixa	Quantidade fixa	-
	Quantidade estocada	Nenhum	Nenhum	-	-	Nenhum	Nenhum	Baixa	-
	Relação fornecedor	Sem relação especial	Sem relação especial	-	-	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	-
	Escolha fornecedor	Baseado em preço	Baseado em preço	-	-	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	-
Estocagem da peça	Controle estoque	Próprio	Próprio	-	-	Próprio	Próprio	Próprio	-
	Localização estoque	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	-	-	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	-

Quadro 4.9. Respostas do questionário de variáveis de decisão para os condutores e sensores do equipamento X.

Peça		Conductor				Sensor			
Tipo		A	B	C	D	A	B	C	D
Equipamento/ sistema	Priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização	Com priorização
	Mão-de-obra	Adequada	Adequada	Adequada	Adequada	Adequada	Adequada	Adequada	Adequada
	Objetivo	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade	Disponibilidade
	Restrições	Custo total	Custo total	Custo total	Custo total	Custo total	Custo total	Custo total	Custo total
	Horizonte planejamento	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo	Curto prazo
Peça	Tipo manutenção	Corretiva	Corretiva	Corretiva	Corretiva	Preventiva	Preventiva	Preventiva	Preventiva
	Atuação	Peças	Peças	Peças	Peças	Peças	Peças	Peças	Peças
	Atividade	Substituição e descarte	Substituição e descarte	Substituição e descarte	Substituição e descarte	Reparo in loco	Reparo in loco	Reparo in loco	Reparo in loco
	Local reparo	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Campo	Campo	Campo	Campo
Suprimento da peça	Momento pedido	Quando atingir certo nível	Quando atingir certo nível	Quando falhar ou previsão	Quando falhar ou previsão	Quando atingir certo nível	Quando atingir certo nível	Quando atingir certo nível	Quando falhar ou previsão
	Quantidade pedida	Quantidade fixa	Quantidade fixa	Quantidade fixa	Quantidade fixa	Quantidade prevista	Quantidade prevista	Quantidade prevista	Quantidade fixa
	Quantidade estocada	Média	Alta	Nenhuma	Nenhuma	Média	Alta	Alta	Nenhuma
	Relação fornecedor	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial	Sem relação especial
	Escolha fornecedor	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço	Baseado em preço
Estocagem da peça	Controle estoque	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio
	Localização estoque	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	Estoque fornecedor	Estoque fornecedor	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado	Estoque compartilhado

Observa-se que a empresa opta por não manter estoque de eletrônicas do equipamento X, exceto para o tipo G. Por ter características de falha aleatória, longos prazos de entrega e considerando que o impacto da falha para o processo produtivo não é desprezível, seria prudente manter o estoque de pelo menos uma peça com reposição de estoque automática para evitar alguma indisponibilidade, aproveitando que o custo de armazenamento é baixo. Considerando que a taxa de falha das eletrônicas é muito baixa e o mesmo acontece com o custo de pedido, o estoque de uma peça é suficiente. Além disso, pode-se contar com o estoque de outros centros. Apesar do número de fornecedores não ser baixo, o prazo de entrega de todos eles é longo. Mas essa quantidade de fornecedores, juntamente com a não obsolescência das peças, reduz a possibilidade de falta de equipamento no mercado quando necessário, não sendo importante armazenar grandes quantidades de peças. Para definir a quantidade a ser estocada pode ser utilizada alguma estimativa da confiabilidade das eletrônicas, ampliando o horizonte de planejamento. Aparentemente a estratégia de realizar apenas manutenção corretiva é acertada, pois neste tipo de peça não há desgaste, portanto, a manutenção preditiva não é efetiva, e a taxa de falha é extremamente baixa não sendo conhecida a distribuição de falhas, portanto, dificultando o estabelecimento de um plano de manutenção preventiva. Outra ação que pode ser considerada é a substituição do módulo eletrônico com reparo do mesmo na oficina, mesmo com custo de reparo não desprezível, pois a taxa de falha é muito baixa. A pronta disponibilidade de uma peça para substituir outra defeituosa reduz o custo de indisponibilidade com aumento do custo de armazenamento. Esta pronta disponibilidade não necessariamente precisa ser arranjada através de peças novas, podendo ser utilizadas peças reformadas através de reparo de peças defeituosas e canibalização.

Analisando os Quadros 4.5 e 4.8, pode-se observar que, ao invés de manter estoque de eletrônicas dos tipos A e B pode-se estocar apenas o tipo B ou o tipo D. Da mesma maneira, pode-se reduzir o estoque dos tipos E, F e G para apenas o tipo H. Esta ação estaria coerente com o conceito abordado por Fortuin & Martin (1999), que argumentam que uma das maneiras para reduzir a dificuldade de gerenciamento de itens de baixa demanda é aumentar a própria demanda. Se fossem utilizados apenas os tipos D e H ou B e H, a quantidade de peças em operação de cada tipo seria alta, com 12 e 22 unidades, respectivamente. É óbvio que a escolha do tipo a ser estocado deve levar em consideração os custos de cada alternativa, inclusive o custo da indisponibilidade. Dessa forma, pode-se reduzir o estoque de cinco tipos diferentes de transmissores para apenas dois, diminuindo assim os custos de armazenamento. Importante

salientar que o dimensionamento do estoque deve ser realizado de maneira a levar em consideração esta intercambialidade para que não haja perdas de disponibilidade.

Quanto aos condutores, verifica-se que não são mantidos altos estoques do tipo A, apesar da taxa de falha e a quantidade de peças em operação ser alta. Recomenda-se estocar esse tipo de condutor adquirindo uma quantidade estimada para certo período de tempo, principalmente por se tratar de item não reparável, com longo prazo de entrega e sem risco de obsolescência. Os custos de indisponibilidade podem facilmente superar os custos de estocagem, não justificando um baixo estoque desta peça. Para definir a quantidade a ser estocada, pode-se utilizar a demanda total deste tipo de condutor em anos anteriores, considerando que é aplicada apenas manutenção corretiva e que a quantidade de peças instaladas e a taxa de falha são altas. Neste caso, este tipo de estimativa não traz grandes distorções. Também há a opção de utilizar o Tipo B em substituição, já que o estoque deste tipo é alto. Entretanto, essa prática deve ser revisada, pois a frequência de falha é média e há apenas uma peça em operação. Para os tipos C e D a opção por manter estoque zero, com pedido somente em caso de falha é coerente com o histórico de confiabilidade dos mesmos, pois não há registros de falha na companhia. Contudo, como o impacto da falha é considerável, deve-se buscar alguma forma de mitigação, podendo ser através de acordo com fornecedor ou mantendo um estoque compartilhado único com outras unidades. Aqui também é possível estocar apenas os tipos B e D, conforme pode ser visto no Quadro 4.5. Entretanto, tecnicamente, há perda na substituição dos tipos, podendo este recurso ser utilizado apenas em casos emergenciais. Também seria interessante analisar os custos e a possibilidade de alteração dos equipamentos instalados para utilizarem condutores dos tipos C e D que tem baixíssima frequência de falha.

Quanto aos sensores, verifica-se que é possível realizar manutenção preditiva apesar de não realizada. Cabe aqui um estudo mais detalhado a respeito da viabilidade econômica desta abordagem. Também pode-se analisar a estocagem de sensores apenas dos tipos C e D, após uma avaliação econômica. A quantidade de sensores estocados no caso do tipo A poderia ser alta, por conta da alta taxa de falha. Para o tipo D, recomenda-se manter pelo menos uma unidade em estoque com reposição automática, por conta da criticidade da aplicação e da taxa de falha.

Uma possibilidade para o equipamento X como um todo seria trabalhar com a terceirização da manutenção e do estoque de peças. Assim, a empresa terceirizada ficaria responsável por manter a disponibilidade dos equipamentos, gerenciando ela mesma o estoque

de sobressalentes de maneira a atingir uma meta de disponibilidade. Esta é outra possibilidade citada por Fortuin & Martin (1999) no aumento da demanda de uma peça: a terceirização para uma empresa especializada com vários clientes.

4.4. Estudo de caso 2

O equipamento do estudo de caso 2 que será chamado de equipamento Y, pode ser dividido em quatro partes principais: eletrônica, aquecedor, sensor e ponteira. A empresa possui 18 equipamentos deste tipo e as peças sobressalentes podem ser utilizadas conforme Quadro 4.10.

Quadro 4.10. Tipos de peças do equipamento Y

Peça	Tipos	Substitui tipo	Quantidade instalada
Eletrônica	Tipo A	-	7
	Tipo B	-	7
	Tipo C	-	4
Aquecedor	Tipo A	-	13
	Tipo B	-	5
Sensor	Tipo A	-	13
	Tipo B	A	5
Ponteira	Tipo A	-	14
	Tipo B	-	4

As respostas dos questionários acerca dos critérios para as peças do equipamento Y são mostradas no Quadro 4.11. No Quadro 4.12, são mostradas as respostas do questionário da estratégia atual de suprimento destas peças. Analisando as respostas dos questionários, considerando o impacto da falha para o processo produtivo, o longo prazo de entrega do único fornecedor e a baixa quantidade de centros que possuem estoque dos sobressalentes do equipamento Y, sugere-se que seja mantida ao menos uma peça de cada em estoque com reposição automática. Apesar da grande quantidade de equipamentos que compartilham as peças e o baixo custo de armazenamento, a baixa taxa de falha permite que o estoque seja mantido em níveis mais baixos. Além disso, o custo dos sobressalentes é médio o que diminui o incentivo à estocagem.

Quadro 4.12. Respostas do questionário de variáveis de decisão para as peças do equipamento Y.

Peça		Eletrônica			Aquecedor		Sensor		Ponteira	
Equipamento/ sistema	Tipo	A	B	C	A	B	A	B	A	B
Equipamento/ sistema	Priorização	Com priorização								
	Mão-de-obra	Adequada								
	Objetivo	Disponibilidade								
	Restrições	Custo total								
	Horizonte planejamento	Curto prazo								
	Peça	Tipo manutenção	Corretiva							
Suprimento da peça	Atuação	Peças								
	Atividade	Substituição com descarte								
	Local reparo	Campo	Campo	Campo	Oficina	Oficina	Oficina	Oficina	Oficina	Oficina
	Momento pedido	Quando falhar ou a falha for prevista								
	Quantidade pedida	Quantidade fixa								
	Quantidade estocada	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Baixa	Baixa	Nenhum	Nenhum
Estocagem da peça	Relação fornecedor	Sem relação especial								
	Escolha fornecedor	Baseado em preço								
	Controle estoque	Próprio								
	Localização estoque	Estoque compartilhado	Sem estoque ou estoque no fornecedor	Estoque compartilhado	Estoque próprio	Sem estoque ou estoque no fornecedor	Sem estoque ou estoque no fornecedor			

Apesar das falhas do sensor e da ponteira não serem aleatórias, não são conhecidos meios de monitorar a degradação das peças que sejam viáveis. Assim, para os sensores, sugere-se, a aplicação de manutenção preventiva, pois há dados históricos disponíveis para estimativa da vida útil das mesmas. Para a ponteira pode ser realizada uma inspeção quando o sensor for substituído. Assim, a aquisição das peças fica condicionada à periodicidade de manutenção, mas sempre mantendo um estoque de segurança caso haja alguma manutenção corretiva a fazer. Como o custo e o tempo de manutenção são altos, a frequência de manutenção deve ser a menor possível, desde que efetiva na maior parte das vezes. Além disso, analisando o Quadro 4.10 percebe-se que pode ser estocada apenas o sensor do tipo B. Este tipo de análise deve ser realizado de maneira quantitativa levando em consideração o custo dos diferentes tipos.

Atenção deve ser dada à eletrônica do tipo C que não é mais comercializada. Em caso de falha, é possível que não haja peça no mercado, fazendo com que o equipamento tenha que ser substituído por inteiro. Sugere-se procurar sobressalentes no mercado e, se não encontrado, programar a substituição destes equipamentos.

O horizonte de planejamento da empresa é de curto prazo para todas as peças, pois essa é a periodicidade de planejamento. Recomenda-se aumentar o horizonte de planejamento de acordo com a expectativa de operação dos equipamentos, exceto para a eletrônica do tipo D que está obsoleta.

4.5. Conclusões

A gestão do suprimento de peças sobressalentes no âmbito industrial ainda é um desafio para muitas empresas. Neste contexto, ferramentas que auxiliem na tomada de decisão são muito importantes para que a melhor solução seja alcançada. Neste trabalho procurou-se desenvolver uma ferramenta simples e de fácil aplicação em qualquer empresa, além de ilustrar sua aplicação em dois estudos de caso.

Baseado em estudos anteriores, foi desenvolvido um questionário fechado acerca dos critérios relevantes para definição de uma estratégia de suprimento. De forma semelhante, um questionário com as variáveis de decisão acerca do suprimento da peça também foi desenvolvido. Além disso, foi construído um diagrama relacionando os critérios com as variáveis de decisão, baseado na literatura. Com base nas respostas do primeiro questionário, pôde-se avaliar, qualitativamente, se as decisões relatadas no segundo questionário estavam coerentes com a literatura além de propor melhorias a respeito.

Através dos estudos de caso, verificaram-se algumas lacunas na estratégia de suprimento de algumas peças, as quais estavam gerando indisponibilidade de equipamentos. Também foram identificadas algumas oportunidades de otimização da quantidade de peças estocadas.

A ferramenta desenvolvida mostrou-se de fácil e rápida aplicação, atendendo ao objetivo de mostrar um panorama geral da situação de cada peça, revelando-se apropriada para diagnóstico de lacunas na estratégia de suprimento de peças sobressalentes. Desta maneira, ela pode ser utilizada anteriormente a ferramentas mais elaboradas, otimizando tempo e recursos, evitando seus desperdícios em peças com estratégia adequada.

Como trabalhos futuros, sugere-se aplicar a ferramenta em equipamentos mais complexos, em contextos mais amplos, tais como, um conjunto de plantas ou empresas próximas dispostas a compartilhar estoques.

4.6. Referências

- [1] BAILEY, G. J.; HELMS, M. M. MRO inventory reduction—challenges and management: a case study of the Tennessee Valley Authority. **Production Planning & Control**, v. 18, n. 3, p. 261–270, abr. 2007.
- [2] BARABADI, A.; BARABADY, J.; MARKESSET, T. Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization - A case study. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 123, p. 1–7, 2014.
- [3] BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M. Virtual pooled inventories for equipment-intensive industries. An implementation in a paper district. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 112, p. 26–37, abr. 2013.
- [4] BRAGLIA, M.; GRASSI, A.; MONTANARI, R. Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 1, p. 55–65, 2004.
- [5] BREZAVSCEK, A.; HUDOKLIN, A. Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, p. 112–117, mar. 2003.
- [6] CAVALIERI, S. et al. A decision-making framework for managing maintenance spare parts. **Production Planning & Control**, v. 19, n. 4, p. 379–396, 2008.
- [7] CHANG, P.-L.; CHOU, Y.-C.; HUANG, M.-G. A (r, r, Q) inventory model for spare parts involving equipment criticality. **International Journal of Production Economics**, v. 97, p. 66–74, 2005.
- [8] 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.
- [9] DUCHESSI, P. A Conceptual Approach for Managing of Spare Parts. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v. 18, n. 5, p. 8–15, 1988.
- [10] ELWANY, A. H.; GEBRAEEL, N. Z. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. **IIE Transactions**, v. 40, n. 7, p. 629–639, 2008.

- [11] FORTUIN, L.; MARTIN, H. Control of service parts. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 9, p. 950–971, 1999.
- [12] GAJPAL, P.; GANESH, L.; RAJENDRAN, C. Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process. **International Journal of Production Economics**, v. 35, p. 293–297, 1994.
- [13] GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 119, p. 199–2206, 2013.
- [14] HASSAN, J.; KHAN, F.; HASAN, M. A risk-based approach to manage non-repairable spare parts inventory. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 3, p. 344–362, 2012.
- [15] HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 125–133, 2001.
- [16] KENNEDY, W. J.; PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, p. 201–215, 2002.
- [17] LOUIT, D. et al. Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 992–1004, 2 jun. 2010.
- [18] MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.; PODOFILLINI, L. Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 87, n. 3, p. 325–335, mar. 2005.
- [19] MARTIN, H. et al. Integrating the spare parts supply chain: an inter-disciplinary account. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 2, p. 226–245, 2010.
- [20] MOLENAERS, A. et al. Criticality classification of spare parts: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 140, p. 570–578, 2012.
- [21] PORRAS, E.; DEKKER, R. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. **European Journal of Operational Research**, v. 184, p. 101–132, 2008.
- [22] RUSTENBURG, W. D.; VAN HOUTUM, G. J.; ZIJM, W. H. M. Spare parts management at complex technology-based organizations: An agenda for research. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 177–193, 2001.
- [23] SHEIKH, A. K.; CALLOM, F. L.; MUSTAFA, S. G. Strategies in spare parts management using a reliability engineering approach. **Engineering Costs and Production Economics**, v. 21, n. 1, p. 51–57, 1991.
- [24] SHERBROOKE, C. C. METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control. **Operations Research**, v. 16, n. 1, p. 122–141, 1 fev. 1968.
- [25] TSAKATIKAS, D.; DIPLARIS, S.; SFANTSIKOPOULOS, M. Spare parts criticality for unplanned maintenance of industrial systems. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 94–107, 2008.
- [26] VAN HORENBEEK, A. et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 499–508, 2013.
- [27] VAN JAARSVELD, W.; DEKKER, R. Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, p. 1576–1586, 2011.
- [28] WONG, H.; CATTRYSSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Stocking decisions for repairable spare parts pooling in a multi-hub system. **International Journal of Production Economics**, v. 93-94, p. 309–317, jan. 2005a.

[29] WONG, H.; CATTRYSSSE, D.; VAN OUDHEUSDEN, D. Inventory pooling of repairable spare parts with non-zero lateral transshipment time and delayed lateral transshipments. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 207–218, ago. 2005b.

[30] ZENG, Y.-R.; WANG, L.; HE, J. A Novel Approach for Evaluating Control Criticality of Spare Parts Using Fuzzy Comprehensive Evaluation and GRA. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 14, n. 3, p. 392–401, 2012.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

5.1. Conclusões

O tema desta dissertação é a gestão de peças sobressalentes no âmbito da manutenção industrial. Seu objetivo principal é o desenvolvimento de uma sistemática de auxílio à tomada de decisão neste contexto e aplicá-la em cenários reais. O estudo foi estruturado em três artigos.

No primeiro artigo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar quais as variáveis influentes na definição de uma estratégia de suprimento de peças sobressalentes. A principal contribuição do artigo é um quadro que organiza as informações levantadas em quatro grupos: características do sistema/equipamento, características da peça, características de estocagem e características de suprimento. Para cada critério foram identificadas as diferentes formas de apresentação encontradas nas referências e a sua influência na política de estocagem de peças sobressalentes.

No segundo artigo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar as variáveis de decisão aplicáveis na definição de uma estratégia de estoque e suprimento de peças sobressalentes. Novamente, foi elaborado um quadro que organiza as informações levantadas em quatro grupos, de maneira similar ao realizado no primeiro artigo. Para cada variável, foi identificada na literatura, situações que levam a uma determinada decisão, suas vantagens e dificuldades de aplicação.

No terceiro artigo foi desenvolvida uma sistemática de auxílio à tomada de decisão na gestão de peças sobressalentes. Baseado nos resultados dos artigos anteriores, foram elaborados dois questionários fechados acerca dos critérios e das variáveis de decisão utilizados na definição da estratégia de suprimento e estoque de peças sobressalentes. Os questionários foram aplicados em peças sobressalentes de dois tipos distintos de equipamentos de uma planta petroquímica. Com base nas respostas dos questionários, foi possível verificar lacunas na estratégia utilizada pela empresa no suprimento de algumas peças e identificar algumas oportunidades de otimização de estoques. A sistemática mostrou-se de fácil e rápida aplicação, atendendo ao objetivo de se obter uma visão ampla da situação de suprimento das peças.

A revisão da literatura realizada neste trabalho pode ser útil no desenvolvimento de outras ferramentas de apoio à gestão de peças sobressalentes, bem como servir de guia para outras pesquisas relacionadas ao tema. A abordagem qualitativa da sistemática desenvolvida

permite que ela possa ser replicada de maneira fácil e rápida em outros equipamentos e tipos de indústria e também facilita a adaptação dos questionários a cada cenário encontrado.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O estudo realizado revelou perspectivas que podem ser desdobradas em novas pesquisas ou em um aprofundamento do trabalho atual. Conforme identificado na literatura, a classificação das peças sobressalentes é uma etapa importante na gestão das mesmas, pois permite que peças semelhantes sejam agrupadas e parametrizadas de maneira semelhante. Assim, um algoritmo de classificação das peças sobressalentes utilizando os critérios levantados no primeiro artigo poderia contribuir para a criação de uma forma sistemática de classificação das peças.

Outra abordagem interessante seria a correlação dos critérios identificados no primeiro artigo com as variáveis de decisão levantadas no segundo artigo, resultando na definição, explícita, de um diagrama de decisão. Este tipo de diagrama, em forma mais simples, já existe na literatura, entretanto não é de conhecimento da autora um diagrama que contemple o conjunto maior de variáveis levantadas neste trabalho.

Também sugere-se a combinação de métodos quantitativos com a sistemática desenvolvida. Conforme discutido no terceiro artigo, algumas decisões devem ser melhor avaliadas através de uma comparação econômica das opções existentes. Este tipo de avaliação é melhor realizada através da utilização de métodos quantitativos.

Por fim, sugere-se o desenvolvimento de um programa estruturado em etapas para a de gestão de peças sobressalentes, que contemplasse desde o cadastramento e classificação das peças até a definição de parâmetros de estoque. Este programa se beneficiaria dos trabalhos sugeridos anteriormente.