

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO

Leandro Reis Muniz

Desenvolvimento de um Modelo de Tomada de Decisão para
Estocagem de Materiais MRO em Mineradoras

Belo Horizonte – MG

2015

Leandro Reis Muniz

Desenvolvimento de um Modelo de Tomada de Decisão para
Estocagem de Materiais MRO em Mineradoras

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Samuel Vieira Conceição

Belo Horizonte – MG

2015

Agradecimentos

Repito aqui a oração que me fortaleceu nesta caminhada como forma de agradecimento:

*Senhor, ao iniciar esta nova jornada, peço tua proteção.
Volta teus olhos para o caminho que ora vou trilhar,
estendendo a tua luz sobre todos os meus passos.
Ilumina a minha estrada, pois sempre estou contigo, sou
forte e capaz de suportar as lições que me destinas.
Orienta as decisões que deverei tomar.
Acompanha-me e certifica-me que estarei indo ao encontro
das minhas melhores opções.
Faz com que minha jornada tenha sucesso, Senhor.
Livra-me dos perigos, dos acidentes e de qualquer situação
que possa me impedir de construir minha felicidade.
Governa as minhas ações e o comportamento daqueles que
podem influenciar o meu destino.
Dirige a tua luz divina para este filho teu, que ora com fervor
e é motivado pelo seu amor.*

Amém.

Agradeço a minha esposa Tarcila, pelo apoio incondicional em todos os momentos em que me ausentei para me dedicar ao mestrado.

Aos familiares, pelo pensamento positivo e suporte nos momentos difíceis.

Aos amigos de pós-graduação, em especial a Allexandre Fortes pelo estudo conjunto e ajudas computacionais.

Aos profissionais da UFMG, sempre dispostos e prestativos nas demandas educacionais.

Ao meu orientador, Samuel Vieira Conceição, que direcionou com maestria as ações do trabalho de dissertação.

Faça o bem sem olhar a quem.

Resumo

Os estoques de peças de reposição são um ponto de atenção na maioria das empresas, possuem elevados custos de investimento e baixo giro, o que dificulta o gerenciamento dos materiais estocados. Uma grande dificuldade encontrada é equilibrar o capital investido nos estoques de peças sobressalentes e o nível de atendimento adequado aos clientes. As peças mantidas em estoque têm como finalidade permitir a manutenção e operacionalização do processo produtivo ou de serviços prestados aos consumidores. A gestão desses materiais é a etapa posterior à formação dos estoques. A etapa anterior consiste no processo decisório de estocagem das peças sobressalentes que envolvem colaboradores das áreas de operação, manutenção e suprimentos.

Este projeto propõe o estudo, revisão crítica e desenvolvimento de um modelo que auxilie a tomada de decisão por meio da aplicação do método AHP (Análise Hierárquica de Processos) e do problema da mochila de programação linear. Para estocagem de materiais MRO (manutenção, reparo e operação), de forma a torná-la mais adequada aos processos de produção contínuos de beneficiamento mineral dentro de uma cadeia de suprimentos. São apresentados os objetivos, a descrição, o problema, bem como a metodologia a ser empregada e os resultados.

Palavras-chaves: tomada de decisão, materiais MRO, AHP, problema da mochila, peças de reposição.

Abstract

Spare parts stocks are a point of attention in most companies, as well as they have high investment costs and low turnover which complicates the management of stored materials. A major issue difficulty is balancing the capital invested in spare parts inventory and the appropriate level of service to customers. Parts kept in stock are intended to allow the maintenance and operation of the production process or services to consumers. The management of those materials is the later stage to the formation of stocks. The previous step is the decision-making process of stocking spare parts involving employees from the areas of operation, maintenance and supplies.

This project proposes the study, critical review and development of a model that helps decision making by applying the AHP (Analytical Hierarchy Process) and the problem of linear programming backpack. For storage MRO (maintenance, repair and operation) in order to make it more suited to the continuous production processes of mineral processing within a supply chain. The objectives are presented, the description, the problem and the methodology to be applied and results are presented.

Keywords: decision making, MRO materials, AHP, spare parts, knapsack problems.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – O Triângulo da Tomada de Decisões Logísticas (BALLOU, 2006)	1
Figura 5.1 – Seleção de Subcritérios Relevantes de Operação e Produção	51
Figura 5.2 – Seleção de Subcritérios Relevantes de Manutenção	52
Figura 5.3 – Seleção de Subcritérios Relevantes de Suprimentos	52
Figura 5.4 – Hierarquia e pesos dos critérios e subcritérios.....	58
Figura 7.1 – Fluxo do modelo de suporte à tomada de decisão	68
Figura 7.2 – Itens estocados e benefício por iteração	76
Figura 7.3 – Valor estocado, quantidade de itens e benefício por iteração.....	77
Figura 7.4 – Valor estocado, benefício e quantidade de itens por iteração.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Estratificação dos itens da base de dados	38
Tabela 5.1 – Detalhamento baseado em Suryadi (2003).....	41
Tabela 5.2 – Detalhamento baseado em Suryadi (2007).....	43
Tabela 5.3 – Detalhamento baseado em Botter e Fortuin (2000).....	44
Tabela 5.4 – Detalhamento baseado em Stoll et al (2015).....	45
Tabela 5.5 – Detalhamento baseado em Braglia (2004)	46
Tabela 5.6 – Detalhamento baseado em Bošnjaković (2010)	47
Tabela 5.7 – Subcritérios sem necessidade de histórico de dados	50
Tabela 5.8 – Subcritérios e critérios selecionados	53
Tabela 5.9 – Índice randômico do AHP	54
Tabela 5.10 – Limites quantitativos para subcritérios de produção e operação.....	56
Tabela 5.11 – Limites quantitativos para subcritérios de manutenção	56
Tabela 5.12 – Limites quantitativos para subcritérios de suprimentos	57
Tabela 5.13 – Valores das inconsistências das comparações.....	58
Tabela 5.14 – Exemplo de classificação baseado em um subcritério de suprimentos	60
Tabela 5.15 – Exemplo de classificação baseado no critério de suprimentos.....	60
Tabela 5.16 – Exemplo de classificação total baseado no critério de suprimentos	60
Tabela 5.17 – Criticidade máxima e mínima encontradas no método AHP	62
Tabela 7.1 – Resultado simulação cenário 2	70
Tabela 7.2 – Resultado simulação cenário 3	72
Tabela 7.3 – Resultado simulação cenário 4	73
Tabela 7.4 – Resultado simulação cenário 5	74
Tabela 7.5 – Resultado simulação cenário 5 detalhado	74
Tabela 7.6 – Resultado simulação cenário 6	75

Sumário

1 Introdução.....	1
1.1. Apresentação do problema	1
1.2. Relevância da pesquisa.....	6
1.3. Delimitação do tema.....	7
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Geral.....	7
1.4.2. Específicos	8
2 Exame de literatura.....	9
2.1. O problema de estocagem de materiais MRO.....	9
2.2. Estoque de materiais MRO	12
2.2.1. Custos relacionados a estoques	13
2.3. Tomada de decisão	14
2.4. Modelos de suporte a decisão.....	15
2.5. Método AHP	17
2.6. Método VED e classificação XYZ.....	19
2.7. Programação linear.....	20
2.8. Problema da mochila.....	22
2.9. Programação multiobjetivo	23
3 Metodologia.....	25
3.1. Metodologia do estudo	25
3.2. Planejamento	26
3.3. Desenvolvimento.....	26
3.4. Levantamento de dados	27
3.5. Classificação dos itens	28
3.6. Modelo de decisão.....	29
3.7. Análise de resultados.....	30
4 Estudo de caso.....	31
4.1. A empresa.....	31
4.2. Descrição do problema.....	32
4.3. Análise dos dados.....	34
4.3.1. Detalhamento dos itens	35
5 Desenvolvimento do modelo AHP.....	40
5.1. Desenvolvimento do modelo de classificação	40
5.2. Método de seleção dos critérios de decisão	41
5.3. O modelo AHP e VED aplicados aos critérios e subcritérios	53
5.4. Implementação do modelo AHP e da abordagem	58
5.4.1. Análise do modelo AHP implementado e base de dados	59
6 Desenvolvimento do modelo linear	64
6.1. Desenvolvimento do modelo de programação linear inteira.....	64

7 Modelo de suporte à tomada de decisão	68
7.1. Fluxo do modelo de suporte à tomada de decisão	68
7.2. Simulação e resultados do modelo de tomada de decisão	69
7.3. Simulação do Cenário 1	69
7.4. Simulação do Cenário 2	70
7.5. Simulação do Cenário 3	71
7.6. Simulação do Cenário 4	72
7.7. Simulação do Cenário 5	73
7.8. Simulação do Cenário 6	74
8 Resultados	79
8.1. Análises dos resultados	79
9 Considerações finais	84
9.1. Contribuição científica e implicações gerenciais	84
9.2. Trabalhos futuros	85
Referências	87
Anexo 01 – Pesquisa de sub-critérios do método <i>cut off point</i>	91

Capítulo 1

Introdução

1.1. Apresentação do problema

O planejamento logístico tem por objetivo lidar com duas questões centrais em gerenciamento da cadeia de suprimento: os objetivos do serviço ao cliente e os custos logísticos globais. Segundo Ballou (2006), o planejamento logístico pode ser comparado a um triângulo de tomada de decisões em cujos vértices se encontram três das principais causas responsáveis pelos custos logísticos globais: estoque, transporte e localização. No centro do triângulo estão localizados os objetivos do serviço ao cliente, ou seja, o resultado decorrente das estratégias de estoque, transporte e localização. O planejamento logístico é o instrumento que auxilia no estabelecimento das estratégias com foco no nível de serviço ao cliente. A figura 1.1 traz essa representação.

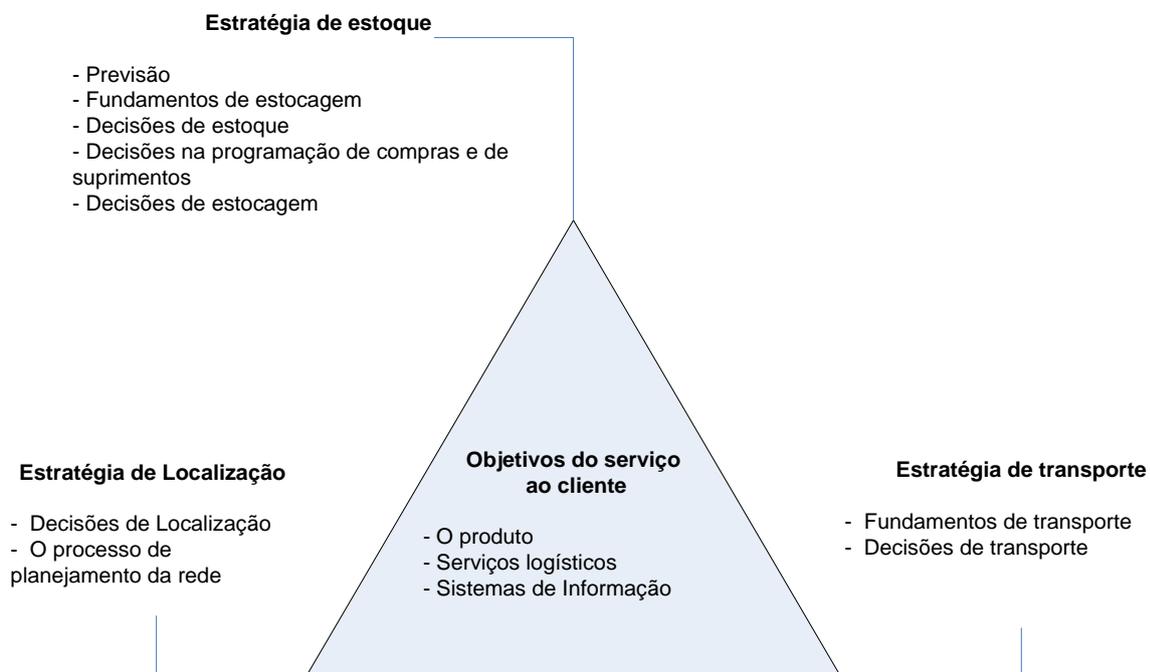


Figura 1.1 – O triângulo da tomada de decisões logísticas (BALLOU, 2006)

O trabalho proposto aborda as decisões de estocagem que fazem parte das estratégias de estoque. Os fundamentos de estocagem, previsão, decisões de estoque, decisões na programação de compras e suprimentos não são o foco deste trabalho. A importância dessas decisões impacta diretamente nos outros dois vértices do triângulo, bem como no atendimento

ao cliente final. Para exemplificar, é possível pontuar algumas observações, como a previsão de reposição, que só pode ser realizada após a definição de quais itens incluir em estoque, o planejamento da rede só é possível com o conhecimento de quantidades e itens a serem movimentados, que está diretamente relacionado à estratégia de transporte. Caso a decisão de estocagem seja realizada de forma errada, o que significa incluir em estoque um material que não será utilizado futuramente, o nível de serviços ao cliente pode ser impactado negativamente. Os materiais incluídos em estoques inadequadamente imobilizam capital da organização de forma desnecessária, geram custos de gestão, manutenção e descarte e podem restringir a inclusão de peças realmente necessárias, seja por restrição física de espaço ou orçamentária. Para Filho *et al* (2014), essa decisão pode ser definida como compromisso específico para a ação e, na maioria dos casos, relacionada a recursos. O autor ainda destaca que a tomada de decisão tem sido considerada um importante instrumento para a gestão.

O trabalho proposto pretende estudar e desenvolver um modelo que auxilie a tomada de decisão para estoques de materiais MRO (manutenção, reparo e operação), mais adequada para empresas de processo contínuo de beneficiamento mineral. O projeto visa fornecer subsídios para a reestruturação nas decisões de estocagem de materiais MRO.

O capital investido em peças sobressalentes representam valores representativos na maioria das organizações. De acordo com Silva (2009), os valores significativos dos estoques tornam a gestão de materiais de reposição algo essencial para boa parte das grandes empresas, visto que o nível de serviço adequado aos clientes internos deve ser compatível com o capital imobilizado nos estoques. Para Bacchetti e Saccani (2012), peças de reposição devem estar disponíveis em pontos apropriados na cadeia de abastecimento para garantir o nível de serviço adequado. Para atingir os objetivos, seja para atendimento de clientes internos ou externos, responder questões básicas como: o que estocar? Qual o ponto de reabastecimento? Fazem parte do processo de gerir e controlar materiais sobressalentes.

As empresas que possuem processo de pós-venda com peças de reposição para manutenção em equipamentos enfrentam um ambiente cada vez mais desafiador. Segundo Bacchetti e Saccani (2012), as empresas têm aumentado o investimento no gerenciamento de peças de reposição. Os mesmos autores destacam outros pontos de dificuldade, como a falta de uma perspectiva sobre a evolução dos sistemas na gestão de peças de reposição, a fraqueza do relacionamento da cadeia de abastecimento, a imprecisão de previsão de demanda, a dificuldade em manter um nível eficaz de giros de estoque das peças, bem como a dificuldade

de gestão decorrente da falta de demanda histórica ou da frequência de falhas decorrentes da rápida inovação dos produtos. A expectativa do consumidor aumenta, bem como a complexidade dos produtos, o que força as empresas a armazenar várias peças de reposição. Por outro lado, o ciclo de vida dos produtos reduz devido ao rápido avanço tecnológico, o que aumenta a obsolescência dos materiais estocados, além da dificuldade de implementação das metodologias existentes.

Os setores de operação e manutenção são vistos como muito importantes na organização, já que os mesmos se relacionam com questões que vão desde fatores ambientais e de segurança até o nível de rentabilidade. Para DeWald (2014), em muitas empresas a ênfase da gestão está na produção, enquanto materiais de manutenção, reparo e operação são colocados em segundo plano, fato que acarreta em quebras frequentes, longos tempos de parada e indisponibilidade de peças de reposição. Por outro lado algumas empresas adotam uma abordagem proativa e visam a redução do tempo parado de máquina, melhoria no controle de estoques e redução de paradas emergenciais. Essas organizações entendem o estoque de peças sobressalentes como parte importante do negócio, bem como a gestão da manutenção. A grande importância das áreas de operação e manutenção remete a necessidade de atendê-las da melhor forma possível, com peças, materiais e insumos sendo fornecidos pela cadeia logística de abastecimento e pelo setor responsável pela gestão dos estoques, em algumas empresas sendo de responsabilidade do setor de suprimentos.

As organizações possuem demanda de materiais e componentes que precisam ser gerenciados e mantidos para atendimento às demandas dos clientes internos. Estoque, segundo Lélis (2007), é tudo aquilo que é guardado de forma adequada para atender a necessidade de um cliente, ser utilizado ou incorporado ao processo. Os estoques são considerados um componente do capital da empresa, na sua maioria constituído de produtos em processo, semiacabados, produtos acabados, insumos e peças sobressalentes para ser incorporadas ao processo produtivo. Tadeu *et al* (2010) dizem que a área de estoques de uma organização é responsável pelo controle de fluxo de materiais internamente, e portanto, deve equilibrar as necessidades e disponibilidades de recursos da organização, sejam de materiais, espaço físico, financeiro, entre outros. Para Rego e Mesquita (2015), tanto do ponto de vista prático e acadêmico, o controle dos estoques de peças sobressalentes é muito complexo e envolve milhares de materiais.

O estoque de peças sobressalentes, diferentemente dos estoques de produtos acabados, semiacabados, e insumos, são mantidos para suportar operações de manutenção e manter o processo produtivo em operação, segundo Silva (2009). Kennedy *et al* (2002) afirmam que as políticas de gestão para estoque de peças sobressalentes ou MRO são diferentes das utilizadas no gerenciamento de produtos em processo e produtos acabados. Xu *et al* (2014) ressaltam que a cadeia de suprimentos tem dispensado maior atenção ao desenvolvimento de equipamentos que permitam maior disponibilidade operacional, além de descrever de forma breve o processo de suprimento de peças de reposição, como segue: no caso de ocorrência de uma falha, é necessário disponibilizar a peça para que a manutenção do equipamento seja realizada. Caso a peça de reposição não esteja disponível, ocorre um atraso no atendimento e conseqüentemente perda de produção, a indisponibilidade da peça de reposição deve ser sanada para que o nível de estoque seja repostado e a falha seja corrigida.

O processo de compras de materiais e peças sobressalentes é outro ponto que deve ser observado na gestão de materiais MRO. Para Rego e Mesquita (2015), as peças de reposição vão desde itens com demandas muito elevadas ao mês até itens com baixa ou sem movimentação no ano. Esse fato mostra que parte significativa do trabalho dos compradores é realizada com peças sem necessidade de aquisição no momento, sendo estocadas e mantidas em estoque sem previsão de consumo. Alguns desses itens não são solicitados em estoque e permanecem sem movimentação ou giro até o descarte ou leilão de peças obsoletas. Esse fato impacta na administração do sistema de compras, acarreta dificuldade de gerenciamento, lentidão nos processos de compras e impacta na disponibilidade de itens ao cliente final.

Os valores dos materiais MRO estocados podem representar quantias significativas. Conforme Silva (2009), Botter & Fortuin (2000), Gasnier (2002), Lélis (2007), MacInnes & Pearce (2003), Roda *et al* (2014), uma empresa típica de manufatura mantém em estoque de peças de reposição entre \$5 milhões e \$15 milhões de dólares, com um custo médio de oportunidade de 20% a 40% do valor de estoque. O capital investido nesses materiais tem grande probabilidade de não serem recuperados pela organização. Lopes (2012) destaca que o tempo entre manutenções possa ser de meses ou anos, fato que impacta diretamente na obsolescência dos materiais estocados e conseqüente redução do valor do dinheiro imobilizado, fato que impede a organização de recuperar o valor investido nas peças de reposição na sua integridade. Mesmo com a venda dos materiais a organização recupera apenas parte do valor gasto para adquirir os componentes.

As peças de reposição precisam ser disponibilizadas a um baixo custo, sendo desejável um alto nível de disponibilidade. O conflito entre disponibilidade e custo é constante e recorrente nos mais diversos setores industriais. Stoll *et al* (2015) afirmam que um eficiente sistema de estocagem e armazenamento é essencial para boa operação dos equipamentos de produção e para organização. Nos processos de mineração essa situação tomou maior relevância nos últimos anos, em função da queda significativa dos preços de venda do minério de ferro e aumento da competitividade do setor. Segundo Rangel (2012), as variações do preço do minério de ferro são decorrentes da desarticulação da cadeia de suprimentos, gerando descompasso entre investimentos no setor de siderurgia e mineração.

Para melhor adequação aos diversos cenários da indústria mineral, é desejável que os estoques sejam dimensionados adequadamente com peças sobressalentes realmente necessárias a manutenção, reparo e operação do processo produtivo.

O problema a ser estudado é a tomada de decisão de estocagem de peças de reposição, mais conhecidas como materiais MRO em processo contínuo de beneficiamento mineral. O estudo será limitado nas peças que devem ser estocadas, em qual quantidade, a qual custo, qual o benefício em se estocar esses itens e qual o impacto no nível de serviço. Neste trabalho foi adotada a convenção proposta por Sherbrooke (1992), na qual o termo item representa um específico tipo de peça de reposição. O termo unidade refere-se à quantidade de peças estocadas do item.

Baseado nos autores citados, a motivação deste trabalho visa mitigar o problema da estratégia de estoque de materiais MRO (manutenção, reparo e operação) de baixo giro e alto impacto em processos contínuos de beneficiamento mineral, através da utilização de métodos de decisão multicritério e programação linear. Busca fornecer subsídios para lidar com a relação conflitante entre custos de estoque e disponibilidade de peças de reposição. O estudo contribui ainda para mitigar problemas decorrentes de decisões incorretas de estocagem, como obsolescência, aquisição de materiais desnecessários, falta de espaço para armazenagem, não atendimento às demandas dos clientes internos, custos de pedido, dentre outros, além de quantificar a importância das peças. Por essa razão, a revisão crítica e a adequação da estratégia de estoque irão trazer importantes contribuições, tanto na forma de conceitos acadêmicos como na própria vivência dos aspectos do gerenciamento da cadeia de suprimentos para materiais MRO.

1.2. Relevância da pesquisa

Os estoques chamados de MRO (manutenção, reparo e operação) existem para atendimento aos processos produtivos, apresentando uma contribuição direta para que os processos atinjam seus objetivos e as expectativas dos clientes. Os estoques de materiais MRO ainda possuem alguns processos pouco estudados, com modelos aplicados em casos específicos e poucas comparações entre os resultados apresentando lacunas na literatura (Rego e Mesquita, 2011).

Este estudo busca contribuir cientificamente para sanar parte dessas lacunas, referentes às tomadas de decisão de estocagem, com a utilização do método multicritério AHP e programação linear, além do desenvolvimento de um modelo de tomada de decisão, para melhorar o planejamento e controle de estoques de itens MRO em uma empresa de beneficiamento contínuo de minério de ferro. O foco é propiciar o apoio adequado à tomada de decisão de quais itens incluir, retirar ou manter em estoque. Muitos estudos utilizam dados gerados de simulação para validar os modelos de estoque propostos segundo Silva (2009) e Bacchetti e Sacanni (2012). Neste estudo a base de dados é real, sendo extraída do histórico de uma mineradora.

Nos estudos encontrados na literatura se destaca a aplicação de modelos em organizações do terceiro setor com foco na gestão dos materiais já estocados, onde a competitividade é muito elevada e a redução de custos pode definir a sobrevivência de uma empresa. Roda *et al* (2014) estudaram o processo de mineração de cobre, mas se limitaram a análise de critérios de decisão. Diversos autores relatam os elevados valores imobilizados em materiais estocados como Gasnier (2002), Lélis (2007), Tadeu *et al* (2010), Bachetti e Saccani (2012) e Rego e Mesquita (2015). Quando se trata de *commodities* com o preço final estabelecido pelo mercado, fato que ocorre no caso de boa parte dos minerais, se torna ainda mais necessária a redução de capitais investidos em estoques. Não foram encontrados estudos referentes a tomada de decisão em processos contínuos de beneficiamento mineral de minério de ferro na literatura estudada com foco em peças de reposição. Uma das contribuições será a elaboração de um modelo que consiga quantificar de forma adequada o processo decisório, que proporcionará aos tomadores de decisão a possibilidade de mensurar os benefícios de estocar o item e compará-los.

O estudo é relevante no desenvolvimento de um modelo de otimização linear baseado no problema da mochila que possa ser aplicado a diversos processos produtivos e permita encontrar a melhor combinação de materiais MRO que devem ser estocados.

1.3. Delimitação do tema

O estudo de peças sobressalentes ou de reposição é bastante vasto na literatura. Existem trabalhos focados em processos de aquisição, classificação dos itens, indicadores de desempenho, decisão de estocagem, modelos de previsão, dentre outros. Diante desse vasto campo de pesquisa se faz necessário delimitar o tema a ser estudado.

A proposta deste trabalho é estudar diferentes abordagens e teorias relacionadas ao processo decisório de estocagem do item para desenvolver uma metodologia de tomada de decisão que possa ser aplicada em materiais de manutenção, reparo e operação em empresas de beneficiamento contínuo de minério de ferro. Serão estudadas as peças de reposição de uma grande empresa multinacional do setor de mineração.

A delimitação do tema pode ser resumida nos seguintes pontos, conforme revisão realizada na literatura sobre o assunto em questão:

- estoque de peças MRO (manutenção, reparo e operação);
- itens MRO para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa, ou seja, clientes internos;
- os itens MRO estudados estão estocados em local único;
- estudar a tomada de decisão e modelos de quais itens estocar;
- estoques MRO em mineradoras de beneficiamento mineral contínuo de minério de ferro;

Delimitado o tema a ser estudado será realizada uma breve descrição do estado da arte para melhor entendimento do assunto abordado.

1.4. Objetivos

1.4.1. Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo de tomada de decisões usando o método AHP (Análise Hierárquica de Processos) e programação linear. As tomadas de decisões referem-se à estocagem de peças de reposição que fazem parte dos materiais

conhecidos como MRO (manutenção, reparo e operação). O modelo é aplicado em base de dados reais de uma empresa de beneficiamento mineral contínuo, algo não encontrado na revisão de literatura realizada durante o estudo. O método auxiliará na mitigação do *trade-off* (custo x benefício) das peças a serem estocadas e redução da possibilidade de inclusão de materiais sem demanda futura em estoque.

1.4.2. Específicos

Espera-se ao final deste trabalho atingir os seguintes objetivos específicos:

- identificar critérios e subcritérios relacionados à decisão de estocagem de peças de reposição, aplicáveis ao processo produtivo mineral;
- desenvolver um modelo de tomada de decisão multicritério;
- aplicar os critérios e subcritérios compatíveis ao modelo desenvolvido;
- identificar os itens que devem ser estocados;
- aplicar o modelo de tomada de decisão de estocagem a base de dados;
- avaliar o desempenho do modelo de tomada de decisão de estocagem;
- permitir que a decisão de estocagem de um item seja tomada de forma “mais quantitativa” e “menos subjetiva”;

Este trabalho busca elaborar um modelo de tomada de decisão e atender a demanda de decisões de estocagem do triângulo de tomada de decisões logísticas para processos de beneficiamento mineral em processo contínuo. Dessa forma, os modelos utilizados neste trabalho estão delimitados pelas especificidades desse tipo de processo produtivo, sendo que, para aplicação em outros processos produtivos, se faz necessária uma análise prévia dos parâmetros e abordagens utilizadas.

Capítulo 2

Exame de literatura

2.1. O problema de estocagem de materiais MRO

A formação de estoques se faz necessária em diversas etapas da cadeia produtiva com diferentes finalidades. Recentemente a gestão de estoques tem ganhado maior atenção das organizações devido aos valores investidos e à alta competitividade, que pede respostas rápidas no atendimento às demandas dos clientes. O interesse pelo assunto tem recebido especial atenção no meio acadêmico, devido às diversas possibilidades de estudo, como desenvolvido nos estudos de Stoll *et al* (2015), Felice *et al* (2014), Rego e Mesquita (2015), Bochkov e Zhigirev (2014), Rego e Mesquita (2011), Roda *et al* (2014), dentre outros. Trabalhos podem ser desenvolvidos em modelos de previsão de demanda para peças de reposição, decisões e planejamento de compras, fundamentos de estocagem, desenvolvimento de modelos para otimização dos estoques, planejamento logístico, dentre outros. Todos os tópicos podem ser aplicados e analisados em especificidades decorrentes de cada processo produtivo. A maior parte da literatura sobre estoques está focada em métodos de ressurgimento e no gerenciamento dos estoques em ambientes produtivos e na rede de distribuição dos produtos acabados, baseados em diversas técnicas relacionadas ao grau de certeza e histórico de dados, conforme apresentado por Bacchetti e Saccani (2012).

O crescimento da competitividade a nível mundial fez as organizações melhorarem seus processos de forma rápida e, conseqüentemente, aumentarem sua capacidade produtiva, o que destacou ainda mais a importância dos materiais estocados e serviços de fornecedores na habilidade organizacional para atender às necessidades dos consumidores, afirma Suryadi (2007). O autor ainda destaca que em alguns casos todas as máquinas precisam operar ao mesmo tempo e necessitam da realização das manutenções programadas, que demandam peças sobressalentes que devem ser fornecidas em tempo hábil para suportar o planejamento da manutenção. Existem poucos estudos relacionados a matérias MRO, devido a particularidades dos mesmos.

As peças de reposição (MRO) atendem às necessidades de manutenção e reparo de produtos e equipamentos industriais. Com alto custo de capital, decorrente dos valores

imobilizados, e forte impacto no nível de serviço ao cliente, segundo Rego & Mesquita (2011). A grande multiplicidade de componentes e baixas demandas dificulta a gestão. Os mesmos autores encontraram algumas lacunas referentes à decisão de estocagem ou não de um item e de estudos de caso na aplicação prática dos modelos.

Diversas definições para peças sobressalentes são encontradas na literatura. Para Roda *et al* (2014) a função geral de estoques de peças de reposição é ajudar a equipe de manutenção a manter os equipamentos produtivos em condições de funcionamento. Portanto, as políticas que regem os estoques de peças de reposição são diferentes daquelas que regem outros tipos de estoques como matéria-prima, produtos em processo e estoques de produtos e acabados, e torna o processo de gestão específico para esse tipo de material.

Outro ponto de atenção são os custos dos estoques que são separados em custos por item, custos de manutenção, custos de pedidos, custos relacionados à capacidade e ao esvaziamento de estoques. Os mesmos podem ser detalhados e calculados para maior controle. Para Bošnjaković (2010) o controle de peças de reposição é essencial para as organizações. Esse ponto reforça ainda mais a necessidade de se evitar a estocagem de peças de forma desnecessárias e que não tem relevância significativa para o processo de suporte a produção e manutenção.

Diante do exposto, a literatura sobre a tomada de decisão de quais peças estocar em estoques MRO, para atendimento ao processo produtivo e manutenção da própria empresa, tende a ser mais escassa. Os estudos e modelos desenvolvidos nos últimos anos tendem a apresentar metodologias para tratar o problema de peças de reposição, para manutenção em equipamentos instalados nas estruturas físicas dos clientes ou em produtos vendidos aos clientes.

A finalidade dos itens MRO estocados são diferentes e impacta diretamente nos modelos de gestão, capital imobilizado, tipo de estocagem, giro e nível de serviço, dentre outros aspectos. Os estoques de materiais MRO segundo Botter & Fortuin (2000), apresentam três tipos de situações possíveis:

- peças sobressalentes para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa;
- peças sobressalentes para manutenção em sistemas instalados no cliente;
- peças sobressalentes para reparos em produtos de consumo, em oficinas de serviços.

O foco deste estudo são os materiais MRO para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa. Dessa forma o conceito de cliente se aplica aos usuários da organização, chamados clientes internos. Os mesmos se caracterizam principalmente pelos usuários de manutenção e operação que dependem dos materiais estocados para continuidade da operação do processo produtivo.

O problema de estocagem de materiais MRO tem outra dimensão que é relacionada à existência de um único ou múltiplos locais de estocagem (Kennedy *et al*, 2002) e Bacchetti e Saccani (2012). Botter e Fortuin (2000) limitam seu estudo em apenas dois níveis de estocagem, descartando os estoques nos clientes ou fora do escopo. Diante do exposto este trabalho irá abordar a estocagem em local único.

Os itens MRO estocados demandam esforços da rede logística para que a mesma consiga atingir o nível de serviço adequado aos clientes. Tracht *et al* (2013) afirmam que o longo *lead time* das peças de reposição associado a reposição imediata para atendimento ao cliente exigem a estocagem de peças sobressalentes. Lélis (2007) afirma que manter estoque representa um custo muito alto para as empresas, e que as tomadas de decisões sobre o que manter em estoque devem ser vistas como uma das mais importantes para os gerentes. Uma alternativa para redução dos níveis de estoque de peças MRO consiste na revisão crítica da necessidade de manter ou não cada um dos itens ativos (Rego & Mesquita, 2011). Os mesmos autores afirmam também que existe uma lacuna na comparação dos diferentes critérios para decisão de estocagem em grandes amostras de dados. Botter & Fortuin (2000), Gasnier (2002), Bošnjaković (2010) reforçam que uma das perguntas básicas a serem respondidas é quais peças devem ser estocadas, ou que itens manter em estoque. Stoll *et al* (2015) afirmam que o tema central da logística de peças de reposição é a estocagem dos materiais. Dessa forma o trabalho limita-se a estudar a tomada de decisão de quais itens estocar.

A aplicação prática de modelos desenvolvidos em estudos de casos é destacada como uma lacuna na literatura, conforme (Rego & Mesquita, 2011), Bachetti e Saccani (2012) e (Rego 2014). Para Silva (2009) existe o desenvolvimento de diversos modelos teóricos, mas poucos estudos de caso na literatura sobre peças de reposição. Bacchetti e Saccani (2012) detalham as aplicações empíricas das técnicas propostas. Eles destacam que encontraram apenas sete estudos onde os métodos de classificação foram efetivamente aplicados pela organização. Outros apresentam estudos de caso como testes da metodologia proposta, enquanto alguns apresentam simulações baseadas em métodos quantitativos ou qualitativos

em amostras de dados reais ou hipotéticas. Os autores destacam ainda que há forte necessidade de estudos de caso que descrevam a implementação real dos métodos de classificação com foco em problemas de aplicabilidade prática. Este estudo utiliza uma base de dados real e aplica a mesma aos modelos estudados e desenvolvidos.

2.2. Estoque de materiais MRO

Os materiais MRO têm características e finalidades distintas. Os mesmos não apresentam as mesmas características dos materiais aplicados ao processo produtivo. As manutenções realizadas nas organizações são atendidas pelas peças de reposição e devem ser realizadas com qualidade e no menor tempo possível. De acordo com Tracht *et al* (2013) o longo tempo de execução da manutenção está diretamente relacionado a reposição e disponibilidade de peças em estoque. Kennedy *et al* (2002) e Roda *et al* (2014) destacam que alguns aspectos são únicos nas peças de reposição, conforme os principais pontos abaixo:

- políticas de manutenção, ao invés do uso do cliente, ditam a necessidade de estoque de peças de reposição;
- geralmente informações confiáveis sobre previsibilidade de falhas dos equipamentos não estão disponíveis;
- as falhas das peças são geralmente dependentes, ou seja, a ineficiência de um componente na maioria dos casos impacta em outro item aplicado no mesmo sistema;
- a demanda de uma peça pode causar o aumento no consumo de outras peças;
- a falta de uma peça de reposição geralmente impacta na qualidade e algumas vezes em perda de produção, e os custos são difíceis de mensurar;
- a obsolescência pode ser um problema, visto que as máquinas para as quais as peças de reposição foram projetadas são substituídas;
- existe a preferência para reposição de peças menores em detrimento de conjuntos maiores devido a custos e possibilidade de reparo.

Os estoques de materiais MRO são vistos de forma diferente, dependendo da organização. Para DeWald (2014) algumas delas focam em produção e deixam os itens de reposição em segundo plano, fato que torna o processo vulnerável e, em momentos pontuais de paradas produtivas, ocorre o despendimento de muita energia para encontrar a peça

necessária. Outras organizações atuam de forma proativa e visam à redução do tempo de paradas, melhora do ciclo de manutenção e elevação da qualidade no controle dos estoques. Essas organizações enxergam os estoques de materiais MRO como uma importante parte dos negócios. DeWald (2014) afirma que em qualquer situação organizacional existe a necessidade de estocagem desses itens. Na mesma linha de pensamento, Dias (2006) afirma que sem estoque é impossível uma empresa trabalhar, pois ele funciona como um amortecedor entre os diversos estágios produtivos.

2.2.1. Custos relacionados a estoques

Um dos pontos relevantes em um sistema de estoque conforme Contador (2010) são os custos relacionados para manter as peças de reposição armazenadas na organização, que geralmente são elevados e forçam a gestão a objetivar a redução do gasto total. Para Stoll *et al* (2015) as estratégias logísticas para peças de reposição podem ter uma contribuição substancial para eficiência do nível de serviço e redução dos custos do processo. Os custos relevantes para um sistema de estoques podem ser segregados em três categorias conforme Contador (2010). As categorias são as mesmas apresentadas por Silva (2009):

- custos de obtenção;
- custos associados à existência do estoque;
- custos associados à falta de estoque.

Os custos de obtenção são relacionados ao processo comercial de aquisição, referentes aos valores do item propriamente dito e de transporte. A mensuração do custo de pedido sofre influência de vários fatores que podem alterar de pedido para pedido. Alguns processos comerciais podem ser finalizados via contrato, com negociações mais longas devido aos valores envolvidos ou compras urgentes por exemplo. Por outro lado tem-se o valor do item que pode ser encontrado pelo valor médio dos pedidos.

O custo associado à existência de estoque é proporcional ao número de itens e ao tempo que permanece estocado. Esses custos ocorrem quando o fornecimento excede a demanda, como os listados a seguir:

- custo de estocagem;
- custo de movimentação;
- custo de obsolescência;

- custo de depreciação;
- custo de oportunidade de capital.

Podem ocorrer outros custos, como aluguel e furto que ocorreram em situações específicas de cada organização.

Os custos decorrentes da falta de estoque para atendimento à demanda, seja pela produção ou manutenção, gera consequências negativas ao desempenho do sistema, devido à perda ou atraso na venda, bem como ociosidade dos equipamentos e mão de obra disponibilizada na planta produtiva. Para recuperar o volume de produção perdido com o tempo parado, ocorrem custos decorrentes da necessidade de operação em regime diferenciado de operação. Existem outros custos relacionados ao sistema de estoques, como o custo de sistemas administrativos, segurança patrimonial, limpeza, sistemas de informação, que em certos sistemas são relevantes.

2.3. Tomada de decisão

Para que se tenha um estoque de peças sobressalentes, faz-se necessária a tomada de decisão de quais itens incluir em estoque. A qualidade da decisão está intimamente condicionada às informações existentes. Para Saaty (2008), as decisões envolvem fatores intangíveis, muitas das vezes *trade-off*. Para auxiliar esse processo a intangibilidade deve ser medida da melhor forma possível para atender os objetivos da tomada de decisão. Tudo o que se faz consciente ou inconscientemente é resultado de uma decisão. As informações que reunimos ajudam a entender as ocorrências e desenvolver bons julgamentos para tomada de decisão.

Vale ressaltar que nem toda informação é útil para melhorar o entendimento e as análises. As decisões feitas intuitivamente geralmente inclinam o tomador de decisão a acreditar que todos os tipos de informações são úteis e quanto maior a quantidade melhor. Para Filho *et al* (2014) decisão envolve fatores dinâmicos onde, na maioria das vezes, existe o comprometimento de recursos.

Dentre as atividades que compreende a gestão de materiais, Gasnier (2002), Dias (2006), Lélis (2007), Tadeu (2010), Rego e Mesquita (2011) e Stoll *et al* (2015) apontam aspectos importantes na tomada de decisão de estoques de materiais MRO:

- a decisão de manter itens em estoque impacta diretamente nos valores investidos;

- os itens estocados apresentam grande variação na demanda;
- os materiais devem ser inventariados periodicamente;
- o controle dos valores e a reposição de peças necessitam de uma rotina;

O dimensionamento dos estoques segundo Dias (2006) reside na relação entre capital investido, disponibilidade de estoque, custos incorridos, consumo ou demanda. Gu *et al* (2015) relatam que o excesso de peças sobressalentes leva a um alto custo de retenção de capital e pode impedir o fluxo de caixa, no estudo realizado na indústria aeronáutica. A decisão de estocagem ou não dos itens impacta diretamente no dimensionamento e principalmente na disponibilidade de itens diversos ao cliente final. Suryadi (2007) diz que, para atender as necessidades das unidades de produção e de manutenção, é necessário influenciar as atividades de aquisição e orçamento. Na verdade, a empresa tem orçamento limitado para executar programa de aquisição de material. Entretanto os gestores de estoques precisam de fornecimento de material, independentemente de restrições financeiras. Assim, as empresas têm conflitos funcionais cruzados ou *trade-offs*, o que necessita definir um modelo de decisão para esses critérios conflitantes.

Para tomar uma decisão, necessita-se saber o problema, a necessidade e a finalidade da decisão, os critérios de decisão, seus subcritérios, partes interessadas e grupos afetados e as ações alternativas a tomar, de acordo com Saaty (2008). Então, tentar determinar a melhor alternativa, ou no caso da alocação de recursos, priorizar as alternativas para alocar o recurso em cotas adequadas se torna relevante. No processo decisório de estocagem a correta aplicação de recursos financeiros é de suma importância organizacional. A decisão de estocagem pode ser tomada de diversas formas e existem alguns modelos desenvolvidos que suportam esse processo.

2.4. Modelos de suporte a decisão

Uma das formas de reduzir os valores estocados é revisar de forma crítica a necessidade de manter o item em estoque, modelos desenvolvidos na premissa de que todos os itens serão estocados devem ser revistos (REGO E MESQUITA, 2011). Os autores fazem uma revisão dos métodos encontrados para tomada de decisão de estocagem, mas diversos modelos partem da condição de peças já colocadas em estoque, com exceção dos modelos propostos por Olthof e Dekker (1994 apud TRIMP et al., 2004), que propõem a decisão de estocagem comparando o custo de estocagem anual e o custo da falta do item (compra emergencial e

penalidades pelo tempo parado). O ponto negativo desse modelo é que o cálculo do custo da falta do item varia drasticamente, dependendo de diversas variáveis como custo do frete, local do processo parado, custo do equipamento, tempo de deslocamento e variáveis que não podem ser mensuradas, como dimensionamento e cálculo do tempo de parada no caso da falha. Rego (2014) estudou a gestão de estoques de peças de reposição utilizando simulação e dados empíricos. O trabalho era aplicado na indústria automobilística, onde o foco era a manutenção em produtos vendidos ao cliente.

A identificação dos critérios para tomada de decisão é importante tanto para análises qualitativas quanto quantitativas. Roda *et al* (2014) realizaram uma revisão com base em modelo de classificação multicritério para peças de reposição. O estudo foi realizado em empresas de mineração de cobre chilenas. Segundo Murthy *et al* (2002), os custos anuais de manutenção representam 40 a 50 por cento do orçamento anual, o que demanda especial atenção na otimização da manutenção e forma geral, o que, segundo Roda *et al* (2014), justifica considerar o setor de mineração como significativo para aplicação de práticas avançadas em gestão de materiais MRO.

Um trabalho desenvolvido com método multicritério para classificação de estoques no varejo teve como foco maximizar o nível de serviço e minimizar os custos totais de estoque. O estudo realizado por Babai (2015) foi de encontro à lacuna existente entre a constante utilização do método de classificação ABC para diferentes SKUs e validação com dados empíricos. Outros modelos como o R-model, ZF-model, Ng-model e H-model foram apresentados e trabalham com os critérios de demanda por unidade de tempo, desvio padrão, *lead-time* do item, quantidade de ordem e nível de cobertura para melhor atendimento ao cliente final. Nesse caso o foco é mantido na previsão mais assertiva dos itens e não na decisão de estocagem.

Outro estudo realizado para decisão de estocagem de suprimentos militares foi desenvolvido em dois níveis. O modelo criado por Xu *et al* (2014) utilizava o custo para delimitar o objetivo e as restrições eram baseadas no nível de cobertura desejado para os itens. O modelo usava como variáveis de decisão o custo das peças, o período de abastecimento, *lead time* de compras, além do nível de estoque, demanda e quantidade fixada no intervalo. O modelo busca atingir o melhor nível de cobertura com o menor custo possível, mitigando a possibilidade de falha no processo de abastecimento.

Um estudo realizado na indústria eletrônica realizado por Botter e Fortuin (2000) aplicou o método AHP, a classificação VED de criticidade, em conjunto com uma classificação de demanda alta, média ou baixa para tomada de decisão de estocagem. Outra possibilidade é a utilização de dados empíricos para decisão de estocagem como pode ser encontrado em Rego (2006), onde são formulados critérios como estocar somente peças com demanda nos últimos três meses e atribuição de pesos.

A tomada de decisão de estocagem de materiais MRO é um tema vasto, com diversas possibilidades de pesquisa, mas estudos sobre decisão de estocagem possuem uma menor quantidade de publicações. O volume de publicações mais baixo sobre o assunto é destacado por Rego & Mesquita (2011), que relatam que não foram encontradas mais referências sobre critérios de decisão de estocagem de um item, e que em alguns casos estocar é uma decisão implícita na própria formulação. Os autores destacam também a baixa quantidade de pesquisadores brasileiros sobre o assunto.

2.5. Método AHP

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) caracteriza uma teoria de medição ou classificação, baseadas em comparação par a par. Utiliza prioridades definidas de forma empírica, preferencialmente analisada e comparada por especialistas na área do problema. No método AHP, o problema é estruturado em níveis hierárquicos, sendo o primeiro nível correspondente ao propósito geral do problema; o segundo aos critérios; e o terceiro às alternativas. (MARINS *et al* 2009).

AHP é um modelo multi-critério de tomada de decisão (MDCM – *multi-criteria decision making*), que auxilia os processos decisórios de problemas complexos com múltiplos conflitos e critérios subjetivos. O autor aplicou o método para avaliar o nível de satisfação de pacientes dos hospitais públicos da Nigéria (OYATOYE, 2014). Nos mais diferentes campos de conhecimento, segundo Bochkov e Zhigirev (2014), grande número de tarefas são resolvidas em condições onde o comportamento do estudo se ramifica, sendo necessário definir pesos e probabilidades relativas dos possíveis cenários com a comparação de objetivos. Já Tracht *et al* (2013) relatam que o planejamento das peças de reposição são influenciados por outros parâmetros, além do financeiro, que devem ser considerados.

Os julgamentos podem ser inconsistentes e o método AHP mensura as inconsistências e melhora a análise quando possível (SAATY, 2008). O autor ainda relata que para tomar a

decisão em um caminho lógico e organizado é necessário gerar prioridades e decompor o processo em etapas como segue:

- Definir o problema e determinar o tipo de conhecimento necessário.
- Estruturar a hierarquia da decisão de topo, com o objetivo da decisão, em seguida os objetivos com uma perspectiva ampla através do nível intermediário, com critérios subsequentes de elementos dependentes, e no último nível usualmente é o conjunto de alternativas.
- Construir o conjunto de matrizes de comparação par a par. Cada elemento em um nível superior é utilizado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo relacionado.
- Utilizar as prioridades obtidas nas comparações para pesar as prioridades do nível anterior. Fazer isso para todos os elementos. Então, para cada elemento do nível inferior adicione seus valores e obtenha a prioridade global ou o valor global. O processo continua até que as prioridades dos níveis mais baixos são obtidas.

Marins *et al* (2010) afirmam que o método AHP está entre os métodos mais utilizados na tomada de decisão com múltiplos critérios. No caso do estudo de peças de reposição há uma diversidade de critérios, como criticidade do material, risco de quebra, impacto no processo produtivo devido à falta do componente, processo de aquisição, obsolescência, demanda, dentre outros. O método AHP necessita de três passos, identificação dos critérios e das alternativas de decisão, atribuição de valores de importância para os critérios e valores de desempenho das alternativas, síntese dos resultados.

A comparação par a par, utilizada no método AHP, possui uma deficiência essencial segundo Bochkov e Zhigirev (2014), que é caracterizada pelo trabalho decorrente do aumento de entradas necessárias para os cálculos, com o crescimento do número estimado de objetos. Suryadi (2003 e 2007), Tam e Tummala (2001) utilizaram o sistema de escala de classificação, que auxilia e classifica sem a comparação par a par direta. Evita o grande tempo consumido com o método na ocorrência de elevado número de critérios e alternativas. Stoll *et al* (2015) realizaram a comparação entre os critérios para reduzir o longo tempo computacional.

Um fato que pode mitigar o elevado número de cálculos é a possibilidade de retirar os elementos com baixo impacto no objetivo geral e recalcular os valores. Saaty (1991) destaca

que a hierarquia não precisa ser completa, ou seja, um elemento de um dado nível não tem que funcionar como atributo ou critério para todos os elementos dos níveis seguintes.

Uma das dificuldades na tomada de decisão relacionadas à estocagem é a quantificação que pode ser sanada pelo método AHP. Vale ressaltar a dificuldade de julgamento de critérios por especialistas sobre o assunto de forma científica, devido ao baixo nível de publicações sobre o assunto, complexidade dos julgamentos, rotatividade de funcionários, dificuldade de obtenção de dados, bem como falta de tempo por parte dos profissionais para uma análise mais criteriosa e detalhada.

2.6. Método VED e classificação XYZ

As organizações que mantêm estoques de peças de reposição comumente classificam os materiais estocados por diferentes critérios, assumindo diferentes níveis de serviços para cada categoria. Para Rego e Mesquita (2011) o método VED (vital, essencial e desejável) e a classificação XYZ buscam segmentar os materiais estocados para facilitar a análise e tomada de decisão. As metodologias desejam capturar a importância das peças para o cliente, seja interno ou externo. O intuito é agregar mais informação às rotinas de planejamento, reposição e gerenciamento, e possibilitar que os gestores tenham novas aberturas de análises para melhorar o processo decisório de quais peças estocar. De acordo com Stoll *et al* (2015), o método VED pode ser combinado com diversas formas de análise, inclusive com o método AHP.

No modelo de classificação VED (vital, essencial, desejável), também realiza-se a separação entre as peças, que podem ser relacionadas a funcionalidade do equipamento ou cosmética, que não causa danos a funcionalidade do equipamento. Outros critérios também são utilizados como tempo de resposta, ciclo de vida, demanda, tempo de aquisição e preço, por exemplo. Os autores consolidaram a classificação vital e essencial em uma mesma categoria, diante da dificuldade de diferenciação, segundo Botter e Fourtuin (2000).

Esse método de classificação pode ser aplicado em base de dados diversa, com o intuito de obter uma redução na quantidade de itens a serem analisados. Dentre os estudos encontrados na literatura com foco em peças de reposição, o mesmo apresenta uma limitação relacionada ao fato de que as peças cosméticas em alguns casos são muito importantes para o cliente final. A indústria automobilística é um bom exemplo, onde acessórios representam

boas oportunidades de negócio e são considerados fundamentais para alguns clientes, fato que não ocorre nos processos produtivos de minério de ferro.

Os métodos qualitativos tentam avaliar a importância da manutenção de peças de reposição em estoque, com base em informações sobre o uso específico das peças e fatores que influenciam seu gerenciamento segundo Bacchetti e Sacanni (2012). Os autores reforçam a característica qualitativa do método VED, que apesar de uma estrutura simplificada pode ser uma tarefa difícil, já que o método é influenciado diretamente pelos julgamentos subjetivos de usuários.

A classificação XYZ foi desenvolvida para classificar itens em três classes baseado em critérios relacionados às características da demanda, segundo Babai (2015). O processo de classificação também é baseado em um julgamento técnico. Esse julgamento é detalhado por Gasnier (2002), onde a classe X, ordinário, representa os itens de baixa criticidade, com pouco impacto no atendimento aos clientes; os itens Y, crítico, representam transtorno considerável ao processo; e os de criticidade Z, vital, que gera consequências desastrosas na organização. Um ponto de destaque da classificação XYZ é a utilização de critérios mais sólidos com base em árvore de encaminhamento, que reduz significativamente a inferência de usuários internos. A árvore de encaminhamento tem como base perguntas claras e diretas, na maioria das vezes com base em outras classificações, como número de retiradas do material em estoque (popularidade); previsibilidade; local de aplicação; tipo de aquisição, que pode ser complexa, difícil ou fácil; impacto na qualidade ou no processo, como perdas, no caso de falta de forma mensurável.

Ao se comparar a metodologia VED e a XYZ percebe-se grande similaridade no objetivo final, onde os itens X e Desejáveis, com pouco impacto, Y e Essenciais com impactos moderados, e Z e Vital, com danos significativos ao processo ou ao produto. Nos modelos aplicados a peças de reposição, não foi encontrado na bibliografia consultada, a utilização deles em empresas de mineração para a construção de modelos de tomadas de decisão, o que torna necessária a aplicação e análise criteriosa dos resultados obtidos com os métodos já estudados em outros processos produtivos.

2.7. Programação linear

Existem diversas ferramentas que suportam a tomada de decisão, desde técnicas de gerenciamento, gráficos, curva ABC, indicadores de desempenho, modelos estatísticos, dentre

outros. Pode-se incluir nessa lista a programação linear, que é um ramo da Pesquisa Operacional como sendo de grande importância no setor logístico. Conforme Pizzolato (2009), a Pesquisa Operacional utiliza métodos quantitativos para o gerenciamento de sistemas e a tomada de decisão.

A programação linear visa encontrar a melhor solução para problemas que são representados por modelos de expressões lineares de acordo com Bregalda (1981). O mesmo autor destaca ainda que o intuito é maximizar ou minimizar uma função linear, chamada de Função Objetivo (FO), que respeita uma série de restrições formadas por um sistema linear de igualdades ou desigualdades. De acordo com Spievy (1962), o objetivo do problema estudado pode ser aproximado satisfatoriamente de uma função linear e as restrições expressas em igualdades ou desigualdades. As restrições do modelo determinam uma região chamada de conjunto de soluções viáveis. A melhor solução desse conjunto viável recebe o nome de solução ótima e maximiza ou minimiza a função objetivo. Bazarra (1990) destaca que a popularidade da programação linear pode ser atribuída à capacidade de modelagem de grandes e complexos problemas, conjuntamente com a capacidade de resolução em uma quantidade de tempo razoável por meio de algoritmos eficazes. Nesse ponto destaca-se a utilização de computadores compatíveis para aplicação. Bazarra (1990) destaca ainda que a ampla aplicação só foi possível após o desenvolvimento do método Simplex, desenvolvido por George B. Dantzig em 1947. Tracht *et al* (2013) afirmam que, para otimizar os estoques de peças sobressalentes sobre uma base competitiva, deve ser levado em conta aspectos relativos ao custo. O problema de programação linear (PPL) tem como objetivo determinar a solução ótima. Algumas situações diferentes do ótimo de maximização ou minimização podem ocorrer segundo Ferreira (2012), como múltiplas soluções ótimas, restrições redundantes, soluções ilimitadas e inviabilidade.

Existem dois passos fundamentais para a resolução de um PPL de acordo com Bregalda (1981). O primeiro é a modelagem do problema, em seguida há o método de solução do modelo. O autor ressalta a inexistência de técnicas precisas, capazes de permitir o estabelecimento do modelo de um problema e que a experiência e a capacidade de análise e síntese são de fundamental importância.

Pode haver casos em que uma ou todas as variáveis de decisão são restritas a assumir somente valores inteiros, o que nos leva a um caso específico de programação linear, conhecido como programação linear inteira (FERREIRA, 2012). Dantzig (1960) destacava

que esse tipo de problema era promissor e realizou uma revisão sistemática para classificar os problemas que poderiam ser reduzidos a essa classe. Outro caso específico, segundo Pizzolato (2009), ocorre quando as variáveis só podem assumir valores 0 ou 1, também conhecida de programação zero-um ou programação binária.

Os problemas de programação linear vêm sendo estudados com frequência nos meios acadêmicos e organizacionais. Dentre os mais conhecidos estão O Problema da Mochila, O Problema do Caixeiro Viajante, O Problema de localização de facilidades, O Problema da Dieta, O Problema de Alocação de Recursos, O Problema da Formação de Ligas Metálicas, conforme Dantzig (1960), Bregalda (1981) e Pizzolato (2009).

2.8. Problema da mochila

No problema da mochila clássico, dado um conjunto de itens cujos valores e pesos são deterministas, o objetivo é encontrar um subconjunto de itens para colocar na mochila a fim de maximizar os valores totais, sem incorrer estouro segundo Chen e Ross (2014). Os autores apresentam ainda casos nos quais a capacidade da mochila pode ser excedida mediante uma penalidade aplicada conforme especificidade do problema abordado.

O problema da mochila pode ser associado ao de uma pessoa que vai viajar e dispõe de uma mochila de tamanho ou capacidade b . O viajante tem n opções de objetos que podem ser selecionados, e o item j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) possui valor c_j e peso a_j para cada material. O problema consiste na decisão do viajante em quais itens j levar respeitando a capacidade b da mochila e obter o maior benefício possível. Seja então, a variável $x_j = 1$ se o item j for escolhido e $x_j = 0$ no caso contrário. Com essas considerações conforme Pizzolato (2009), o modelo se torna:

O modelo do Problema da Mochila.

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^n c_j * x_j$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j=1}^n a_j * x_j \leq b$$

$$x_j = \{0,1\} \forall j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Verificando o modelo apresentado, encontram-se semelhanças entre o estudo de caso em questão e o problema da mochila. Na decisão de quais materiais devem ser estocados, deseja-se maximizar o número de itens com o melhor retorno possível. No estudo se trata de aumentar a disponibilidade operacional com a maior quantidade de peças estocadas, ou seja, aumentar as chances de o cliente interno encontrar uma peça em estoque quando necessário. Chen e Ross (2014) apresentam modelos adaptados do problema original onde o tomador de decisão pode selecionar um item disponível ou parar o processo em cada fase da otimização e obter os resultados momentâneos da otimização. Diante das compatibilidades apresentadas entre os problemas desenvolve-se um modelo para a tomada de decisão baseado no problema da mochila.

2.9. Programação multiobjetivo

O problema de programação multiobjetivo determinista tem sido amplamente estudado por pesquisadores em uma variedade de campos segundo Wang *et al* (2015). Para Ojha e Ota (2014), a maioria dos problemas reais são multicritérios com múltiplas possibilidades, e nesses casos as funções objetivo devem ser analisadas simultaneamente. Os problemas multiobjetivo possuem mais de uma função objetivo. Alves *et al* (2014) afirmam que os tomadores de decisão não estão interessados apenas em maximização ou minimização. Os modelos de otimização devem explicitar aspectos múltiplos de avaliação referentes aos objetivos distintos, visto que não existe uma resposta ótima simultânea para todas as funções objetivo.

O processo de apoio à decisão de modelos multiobjetivo de otimização é baseado em ciclos iterativos de computação, onde as informações resultantes de novas soluções computacionais podem ser confrontadas com dados previamente armazenados, tendo em vista a convergência segundo Alves *et al* (2014), na qual a solução final estabelece um resultado aceitável entre as funções objetivo concorrentes.

As diversas soluções encontradas durante o processo interativo formam a curva Pareto Ótima e podem ser encontradas por métodos de geração ou da restrição ϵ , conforme Ojhal e Biswal (2014) e Ojhal e Ota (2014). O método da restrição ϵ consiste em otimizar uma das funções objetivo enquanto os outros objetivos são utilizados como restrições no modelo de acordo com Ojhal e Biswal (2014). A técnica da restrição ϵ segundo Alves *et al* (2014) tem como pontos máximos e mínimos os valores limites das funções concorrentes e a função

objetivo que é utilizada como restrição limita o valor de cada iteração. Ojhal e Biswal (2014) afirmam que os métodos de geração são pouco populares devido aos elevados esforços computacionais.

Diante do exposto utiliza-se o método da restrição ϵ para construção da curva Pareto Ótima, o que nos permite traçar diversos cenários para comparar quantidade de peças estocadas e preço imobilizado, o que vai de encontro à afirmativa de Alves *et al* (2014), de queo modelo de otimização deve disponibilizar múltiplos aspectos de avaliação referentes aos objetivos distintos.

Capítulo 3

Metodologia

3.1. Metodologia do estudo

Os métodos de pesquisa devem ser classificados de acordo com o tipo de abordagem utilizada durante a pesquisa. Este trabalho apresenta um estudo de caso em um único objeto (por exemplo, uma única empresa), o que, segundo Marins *et al* (2010), deve ser classificado como uma abordagem qualitativa. O autor reforça ainda que o método AHP, apesar do forte embasamento matemático, não pode ter sua classificação feita puramente como pesquisa quantitativa. Outras classificações segundo Marins *et al* (2010), como a abordagem mista, podem ser seguidas se for dada atenção a aspectos específicos da aplicação, no caso de uma pesquisa combinar estudo de caso e modelagem matemática com ênfase na aplicação do AHP, como descrever de forma clara a atribuição das importâncias para os critérios no método, pode ser classificada como uma abordagem mista quanti-qualitativa. Diante do exposto, a metodologia adotada nesta pesquisa é mista e se enquadra na abordagem quanti-qualitativa.

Para Voss *et al* (2002), o estudo de caso tem sido uma das mais poderosas ferramentas para desenvolvimento de novas teorias na área de Gestão Operacional. O trabalho utiliza um estudo de caso com objeto único, com apresentação clara das atribuições de importâncias do método AHP, bem como desenvolver um modelo matemático com base na escala de classificação obtida pela aplicação do método multicritério de tomada de decisão. Apesar das características de estudo de caso devido ao aprofundamento em condições do objeto de pesquisa, o foco é o desenvolvimento de um modelo de tomada de decisão para materiais MRO e analisar o seu desempenho, para formular recomendações exatamente sobre sua aplicabilidade, o que contribui cientificamente para os conhecimentos acadêmicos e científicos do foco da pesquisa com utilização de dados empíricos.

Serão detalhadas a seguir as principais etapas da metodologia a ser desenvolvida neste trabalho:

- planejamento;
- detalhamento do estudo de caso;

- desenvolvimento de protocolos e instrumentos;
- levantamento de dados;
- classificação dos itens;
- aplicação do modelo AHP aos dados classificados;
- aplicação do método VED (vital, essencial, desejável) ou classificação XYZ aos dados classificados;
- análise e validação dos resultados encontrados nos modelos AHP, VED ou classificação XYZ;
- determinação de parâmetros e políticas para modelo desenvolvido;
- construção do modelo de decisão de estocagem;
- análise dos resultados do modelo desenvolvido;

Com a construção e análise dos modelos, atingimos os objetivos gerais e específicos propostos no trabalho.

3.2. Planejamento

Para realização adequada de um estudo de caso, é necessário definir o escopo. São definidos os objetivos principais e secundários do estudo e destacados outros aspectos relevantes, como coleta e manipulação de dados, definição do problema, levantamento de questões para as quais se buscam respostas. Filho (2001) mostra a importância do planejamento que deve permitir ao pesquisador obter informações de qualidade com o menor tempo possível. Todas essas ações devem ser adequadamente analisadas na escolha do caso para que os objetivos estabelecidos sejam alcançados dentro do prazo adequado ao estudo.

3.3. Desenvolvimento

O desenvolvimento deve possuir protocolos, procedimentos, instrumentos e regras gerais, detalhando de onde ou quem os diferentes tipos de informações serão extraídos. Esses controles devem ser mantidos para garantir a confiabilidade e validade dos dados do estudo de caso. A extração e manipulação inadequada dos dados impactam diretamente nos resultados do estudo. Em casos específicos podem inviabilizar a pesquisa e gerar conclusões duvidosas dentro dos objetivos desejados.

Este trabalho será desenvolvido com os dados cedidos por uma empresa do ramo de mineração de ferro com dados reais de consumo, movimentação, estocagem e classificação das peças de reposição. O estudo será focado no processo decisório de estocagem, incluindo itens críticos e não críticos com diferentes padrões de consumo. As informações serão extraídas do sistema SAP R/3 módulo MM de administração de materiais. Os dados analisados representam uma base histórica de gerenciamento da organização. Neste trabalho não serão abordados modelos de previsão ou consumo dos itens nos últimos anos, visto que o objetivo é analisar o material antes de inclusão do mesmo em estoque. Na organização em estudo, após dois anos da estocagem do material os itens são considerados obsoletos, que segundo Rego e Mesquita (2011), ocorre com o encerramento da produção do produto e das suas peças de reposição exclusivas. No limite desses casos, não estocar pode ser a decisão mais econômica para o gestor. A retirada do estoque deve ser realizada depois de devida comunicação às partes envolvidas. Caso a peça seja mantida, sua manutenção deve ser justificada conforme aplicação e criticidade do item para o processo produtivo ou equipamento. Nesse momento o item passa a ser considerado novamente como um item recém-incluído no estoque e será analisado novamente após dois anos sem movimentação. Esse processo decisório nos remete novamente ao *trade-off* de estocar ou não um dado item. As informações utilizadas no estudo serão fornecidas pela Gerência de Suprimentos e Logística, que é responsável pelo gerenciamento das peças de reposição.

As análises dos resultados, validação da metodologia desenvolvida serão suportadas pelos dados extraídos do sistema SAP R/3 módulo MM, entrevistas, bem como pelo julgamento e análise das partes interessadas e confrontação com metodologias desenvolvidas em outros estudos da bibliografia.

3.4. Levantamento de dados

O sistema SAP R/3 é um ERP mundialmente conhecido e muito utilizado em organizações de grande porte. Os dados nos permitem diversas aberturas e análises, como histórico de consumo, popularidade referente à quantidade de apanhas, classificação ABC, classificação referente à aquisição e tempo entre apanhas. Os dados serão estruturados com foco na tomada de decisão entre quais itens estocar. O levantamento da base de dados constou com 40.002 itens de materiais MRO (manutenção, reparo e operação). O estudo foi realizado com itens do sistema que estão ativos, corretamente cadastrados e fazem parte da gestão de materiais. Alguns itens podem estar cadastrados, mas sem a realização de gestão de estoques,

como itens de projetos específicos adquiridos uma única vez, ou podem constar no sistema e o local de aplicação já ter sido desativado, dentre outras possibilidades. O estudo será realizado em toda população dos materiais.

3.5. Classificação dos itens

Uma das formas mais usuais de classificação dos itens em estoque é a classificação ABC, onde os itens A são prioritários e devem receber maior atenção do gestor de materiais. Os itens B são intermediários, considerando a representatividade econômica, e os itens C são secundários e sua importância em alguns casos é justificada, já que a falta pode inviabilizar a continuidade do processo, mas geralmente seu impacto econômico é baixo, o que possibilita menor esforço. Quando as empresas não dispõem de recursos humanos e tempo hábil para acompanhar todos os itens em detalhes, são priorizados os materiais da classe A nas políticas de estoques devido à maior importância econômica (Gasnier, 2002). Diversos estudos aplicaram a classificação ABC para escalonar os itens de maneira mais adequada, como Roda *et al* (2014), Stoll *et al* (2015), Silva (2009) dentre outros.

A classificação XYZ indica a criticidade do equipamento de acordo com seu impacto no processo produtivo, em caso de indisponibilidade em paradas de manutenção ou durante o processo de operação. Os itens classificados como X são de baixo impacto, itens que não geram interrupções produtivas, os materiais da classe Y acarretam paradas com tempo de parada inferior a 50 horas e os Z com consequências desastrosas para organização e interrupções produtivas superiores a 50 horas. Em alguns casos pode-se encontrar itens Z com baixos valores, fato que os deixariam de um controle mais eficiente se a análise fosse baseada apenas com base na classificação ABC.

Como o estudo será realizado com toda base de dados, este trabalho não aborda métodos de amostragem. Nos itens em estoque nas organizações, dentre os classificados como A é desejável que todos tenham movimentação, visto que há um elevado valor mobilizado. Caso a movimentação não ocorra dentro de determinado período, pode-se questionar a necessidade de estocagem do item, já que o capital imobilizado é significativo. Como a demanda, quantidades retiradas, tempo entre apanhas só ocorrem após a inclusão do item em estoque, esses parâmetros só podem ser avaliados de forma qualitativa e ou estimativa durante a decisão de estocagem. Dessa forma não serão realizadas classificações com base no comportamento dos itens após sua inclusão em estoque. Esses critérios poderão ser utilizados

para analisar os resultados obtidos no estudo e confrontar os itens sugeridos a serem estocados e sua movimentação real em estoque.

3.6. Modelo de decisão

Para suporte ao processo decisório será utilizado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que é um dos modelos multi-critério de tomada de decisão (MDCM – *multi-criteria decision making*). Os critérios de análise serão desenvolvidos para aplicação no modelo de estoques em local único de peças de reposição para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa.

A aplicação do método AHP, segundo Saaty (2008), se destaca na tarefa de mensurar termos intangíveis e qualitativos de forma consistente. Suryadi (2003), Saaty (1991), Bochkov e Zhigirev (2014) e Roda *et al* (2014) argumentam as vantagens de se utilizar o método AHP no processo de estocagem e como o mesmo apresenta benefícios significativos de processos puramente qualitativos, como atribuir pesos diferentes para critérios, quantificar pequenas variações dentre os critérios existentes, método de apoio para cálculo de criticidade, desenvolvimento de um índice geral de classificação.

Os modelos de classificação ABC, XYZ e VED serão aplicados como ferramentas auxiliares e direcionadoras do estudo. As mesmas têm como função auxiliar as entradas de informações ao método AHP e validação dos resultados obtidos. A decisão pode ser tomada com base na inclusão dos itens mais bem ranqueados após a utilização do método AHP.

Será desenvolvido um modelo para decisão de estocagem de materiais MRO, utilizando como base modelos propostos baseados no método AHP, dentre os modelos multi-critério de tomada de decisão. O sistema atual considera a tomada de decisão de estocagem com informações qualitativas predefinidas que são respondidas pelo usuário que tem interesse em estocar o material. O nível gerencial é envolvido para aprovar ou não o valor que será imobilizado em estoque com a inclusão da peça de reposição. O modelo atual será comparado com o modelo proposto com o objetivo de avaliar o desempenho de cada um deles.

Os critérios de decisão a serem avaliados no método AHP terão com base os apresentados em Suryadi (2003), Suryadi (2007), Botter e Fortuin (2000), Stoll *et al* (2015), Braglia *et al* (2004), Saaty (2008) e Bošnjaković (2010), que são adequados ao modelo de estocagem em local único de peças de reposição para empresas de minérios de ferro. Demais

critérios poderão ser desenvolvidos para melhorar a análise e o processo decisório do estudo de caso.

Os níveis hierárquicos do modelo decisão serão construídos para quantificar os atributos qualitativos da tomada de decisão. Esse processo pode ser considerado como uma forma de se calcular o benefício em estocar cada item. Quanto maior o valor encontrado, melhor o benefício. Nessa etapa o valor disponível pela organização é um *trade-off* em relação à quantidade de itens que devem ser estocados. À medida que se aumenta o benefício, os recursos imobilizados em estoque crescem, mas o ideal é que os valores em estoque sejam cada vez mais baixos.

O software *Super Decisions* – 2.2.6 do ano de 2013 será utilizado para realizar os processos computacionais e cálculos do método AHP. As análises e comparações dos resultados serão realizadas posteriormente por meio de tabelas de comparação em planilhas eletrônicas em decorrência do grande volume de informações.

3.7. Análise de resultados

Com o resultado do método AHP, analisaram-se cenários e convergências de informações nos quais as melhores pontuações sejam condizentes com os itens que apresentaram maior popularidade em estoque ou que sejam realmente críticos ao processo. Do lado oposto, os itens com menor pontuação ou benefício, que justamente não deveriam ser estocados. Os materiais já estocados foram utilizados para análise e comparação com os resultados encontrados no estudo. O período considerado para retirada da peça sobressalente de estoque é de dois anos, pois, esse é o tempo no qual o item é considerado obsoleto e se realiza novamente sua análise crítica de manutenção. Após esse processo, o material pode ser separado e destinado ao depósito de materiais obsoletos e inservíveis, sendo disponibilizados para venda.

Nessa etapa, confirmam-se algumas teorias e buscam-se algumas respostas sobre novas abordagens. A análise será direcionada para o benefício de se estocar o item e custo total de estoque, com o intuito de quantificar o *trade-off*, custo benefício em materiais de manutenção, reparo e operação em empresas de beneficiamento mineral.

Capítulo 4

Estudo de caso

4.1. A empresa

O estudo de caso foi desenvolvido utilizando a base de dados de uma grande empresa multinacional do setor de mineração, com a avaliação de estoque de peças de reposição em local único na planta de extração e beneficiamento de minério de ferro em Minas Gerais. O armazenamento dos materiais é realizado em depósito centralizado com o gerenciamento de todo o processo realizado pela Gerência de Suprimentos e Logística na planta.

O sistema utilizado no controle dos estoques é o SAP R/3 com predominância do módulo MM. Esse *software* é utilizado a partir da inclusão do material no estoque, ou seja, após o processo decisório, no qual o mesmo passa a ser de responsabilidade da Gerência de Suprimentos e Logística. Antes da inclusão em estoque, o sistema serve como banco de dados dos itens e para o processo comercial de compras conforme demanda do usuário interno. Com a definição de que o item deve ser estocado, a equipe de suprimentos e logística realiza a parametrização do sistema, para que o mesmo entre no ciclo de previsão, inventário, movimentação, valor de estoque, curva ABC e demais ferramentas de gestão.

O sistema SAP R/3 se aplica bem para o controle de itens de alto giro com demanda regular. No entanto, não tem boa aderência para itens de baixo giro com demanda intermitente, que é o caso de grande parte das peças de reposição (SILVA, 2009). No caso de tomada de decisão de estocagem, o sistema não apresenta nenhuma funcionalidade mais robusta, visto que a organização utiliza um questionário simples para analisar as solicitações de áreas internas sobre as demandas de estocagem de materiais MRO, onde o fator de decisão é a aprovação do responsável pela área solicitante. As demais informações servem apenas como dados para inclusão no sistema de cadastro.

Os principais processos decisórios de inclusão ou não do item em estoque são baseados em critérios qualitativos, conhecimento baseado na experiência dos colaboradores, argumentação dos interessados ou análises superficiais, como verificar apenas a importância do equipamento para o processo produtivo ou dificuldade de previsibilidade da falha. Rego e Mesquita (2011) destacam que uma alternativa para redução dos níveis de estoque de peças de

reposição e, conseqüentemente, os valores imobilizados, consiste na revisão crítica da necessidade de manter cada um dos itens ativos.

Uma necessidade levantada é o desenvolvimento de um modelo ou sistema de tomada de decisão que permita avaliar de forma mais quantitativa o benefício de se estocar determinado material, e caso seja tomada a decisão de estocagem, realizar uma análise de possíveis itens candidatos a serem retirados do estoque para evitar que o valor imobilizado supere o limite estabelecido pela organização. Outro fator é reduzir o volume de materiais sem movimentação em estoque, que não são críticos para o processo de manutenção e produção, e que foram estocados de forma indevida devido a falhas no modelo atual de decisão.

No estudo será utilizado o método AHP baseado em critérios que podem ser identificados e analisados antes de incluir o item em estoque, sem a necessidade de se aguardar um determinado período de tempo para gerar histórico de dados. Esse processo permite eliminar o gasto em diversas etapas de forma desnecessária, como o trabalho das pessoas envolvidas no processo de cadastro, parametrização do item no sistema, processo comercial, transporte, recebimento e inspeção, movimentação de estocagem, inventários e, posteriormente, nova análise para retirada dos estoques.

4.2. Descrição do problema

Os estoques de materiais MRO são necessários em grande parte dos processos produtivos e instalações industriais. Para Braglia *et al* (2004), Roda *et al* (2014), Stoll *et al* (2015), o aumento da eficiência produtiva e a redução do tempo de máquina parada estão diretamente relacionados às peças de reposição estocadas. O problema é decidir quais peças manter e em qual quantidade para atendimento nos momentos de parada de produção e quebras de equipamento, lembrando que a estocagem das peças de reposição está limitada por restrições financeiras e de espaço. Esse fato implica em manter os níveis de peças de reposição da forma mais adequada possível, o que representa uma questão crítica e importante de gerenciamento. De acordo com Saaty (2008), existem duas abordagens possíveis para desenvolvimento de um modelo de decisão: modelos matemáticos e abordagens de classificação.

O processo de desenvolvimento de um modelo de decisão possui algumas peculiaridades relacionadas aos materiais MRO para manutenção de processos produtivos,

equipamentos e sistemas da própria empresa. Primeiramente o volume de peças estocadas é influenciado pela forma como o equipamento é utilizado e mantido. A decisão pode ser impactada pelo tempo de análise e informações disponíveis, sendo superficial ou mais minuciosa. Outro ponto a ser observado é que as variáveis de decisão devem ser obtidas em tempo hábil, visto que a demora do processo decisório impacta todas as etapas subsequentes, podendo retardar a disponibilidade da mesma em estoque. Uma última observação se relaciona aos modelos matemáticos e de classificação, que em alguns casos usam dados históricos e permitem a estocagem de itens desnecessariamente, pode-se citar a classificação de itens por popularidade de retiradas do estoque, ou modelos matemáticos que consideram dados históricos para previsões futuras.

A empresa em estudo utiliza um questionário para decisão de inclusão do item em estoque mediante a devida aprovação dos níveis gerenciais de acordo com o valor. O preenchimento da planilha se baseia em questionamentos que não disponibilizam informações suficientes para subsidiar a tomada de decisão. O processo é formalizado por e-mail e anexado ao código do item no sistema SAP R/3 módulo MM. Anualmente a Gerência de Suprimentos e Logística analisa os itens sem movimentação há dois anos para retirada de estoque e realização de leilões para liberação de espaço em estoque e possibilitar a inclusão de novos itens. Esse processo mostra a fragilidade do modelo de decisão e comprova a existência de excesso de estoques em vários itens.

Nesse modelo percebe-se que a maioria das informações tem caráter qualitativo, fato que facilita a inclusão de itens em estoque e conseqüente impacto em espaço, segurança operacional e custos. O modelo de gerenciamento de estoques é integrado e composto por módulos estatísticos de previsão de demanda, sazonalidade, visualização de demandas futuras, dentre outras ferramentas. O problema em questão é que muitos itens apresentam baixa rotatividade, ou seja, permanecem em estoque por muito tempo e sem demanda e em alguns casos nem chegam a ser consumidos, devido a alterações no processo produtivo, ou até mesmo inclusão de materiais de forma indevida em estoque.

Com a constante inclusão de itens, ocorrem diversos problemas que merecem ser destacados. O primeiro é o aumento significativo do valor de estoque, que faz com que os responsáveis pela gestão tomem a decisão de reduzir as quantidades ou excluir itens de estoque para que o valor não ultrapasse a meta estabelecida. O segundo é a dificuldade de armazenamento, que acarreta na constante demanda de novas áreas e projetos de readequação,

sem na realidade ter a certeza de que os materiais estocados são necessários ao processo produtivo. Uma solução constantemente utilizada para sanar os dois problemas é a realização do leilão de peças sem movimentação a mais de dois anos em estoque. O procedimento consiste na retirada das peças do estoque, liberando espaço físico e reduzindo o valor total do mesmo. Um ponto de destaque nessa prática é que os valores obtidos com as vendas dos materiais são muito inferiores aos de aquisição, ou seja, prejuízos constantes e cíclicos.

Analisando com calma esse cenário percebe-se que muitos custos adjacentes à manutenção de estoques como movimentação, inventário, perdas, avarias, custo de aquisição e logísticos não são computados.

Portanto o desenvolvimento de uma metodologia que possa tratar problemas inerentes à inclusão de peças sobressalentes em estoque traz benefícios importantes à empresa e às demais organizações com o mesmo modelo de processo produtivo. Destacam-se ainda os benefícios científicos que, segundo Rego e Mesquita (2009), incluem a carência de publicações de autores brasileiros sobre o assunto, e que estudos de caso, além de explorar os modelos de apoio à decisão, permitem discutir aspectos da implantação dos sistemas de controle gerencial e de tecnologia da informação que são de grande importância para aplicação prática dos desenvolvimentos acadêmicos. O modelo de decisão desenvolvido pode ser replicado a outras áreas industriais e formas de estocagem mediante revisão de critérios, mas a metodologia pode ser mantida, o que permite a construção de modelos adequados às especificidades de cada processo.

4.3. Análise dos dados

Os dados obtidos do sistema ERP SAP R/3 módulo MM, que é responsável pela gestão de materiais estocados com alta confiabilidade e segurança das informações devido às suas características de integridade, funcionamento em tempo real e forte integração de processos, na qual as demandas dos diversos setores da organização são associadas para correta funcionalidade do sistema. Todas as solicitações de retirada de estoque, entrada de mercadoria, cadastro de material, alimentação de notas fiscais, regularização de inventário, parametrização são realizadas no sistema, evitando controles paralelos e distorção de informações.

A classificação dos itens em estoque de almoxarifado é realizada em diferentes grupos de mercadoria de acordo com a utilização do material como: materiais de papelaria,

laboratórios, uniformes, equipamentos de segurança, moinhos e redutores, rolamentos e mancais, transportadores e componentes, dentre outros. A pesquisa analisará os materiais MRO (manutenção, reparo e operação) que representam basicamente as peças de reposição utilizadas para manutenção do processo, que pertencem à gestão de materiais, que representa toda estrutura de cadastro, gerenciamento, planejamento de compras, logística de recebimento, movimentação e descarte, previsão de demanda, gestão de fornecedores, dentre outras. A gestão das peças de reposição é de responsabilidade da gerência de suprimentos, que deve garantir a disponibilidade dos materiais às áreas de operação e manutenção em tempo hábil com a qualidade desejada. O modelo será desenvolvido para atender a gestão dos materiais que atualmente não possui um modelo sólido para definir a necessidade de incluir a peça em estoque. As gerências de manutenção e operação são os principais clientes internos que devem ser atendidos pelas peças sobressalentes mantidas em estoque. As áreas clientes pedem a inclusão do material, e, feito esse processo, toda responsabilidade do gerenciamento é do setor de suprimentos.

O objetivo é centralizar os esforços de análise, validação e desenvolvimento do modelo em peças de reposição que justifiquem processos mais estruturados de gestão. A análise da demanda de consumo possui importância apenas na parte de coleta e seleção dos dados, não sendo o foco deste estudo melhorar a assertividade de previsões de demandas futuras. O trabalho tem por finalidade melhorar o processo decisório antes da inserção de materiais MRO em estoque.

4.3.1. Detalhamento dos itens

Para tornar a manipulação, processamento de dados, aprofundamento e análise mais adequados durante o processo experimental geralmente é realizada a segregação dos materiais estocados, que consiste em reduzir o total de itens estocados para uma amostra apropriada ao estudo. Neste trabalho os itens não serão segregados e as peças de reposição utilizadas na rotina da manutenção, operação e suprimentos foram classificadas e analisadas conforme aberturas necessárias.

A organização em estudo possui mais de 70 mil itens de estoque classificados como MRO, já desconsiderando materiais cadastrados para projetos que não fazem parte da gestão de materiais da rotina e são analisados de forma estratégica pela organização como investimentos, bem como itens sem necessidade de gestão pela área de suprimentos que são adquiridos para atendimentos pontuais. O estudo considerou os itens sobre controle da

gerência de suprimentos e logística. Para possibilitar análises mais profundas e permitir a construção do modelo de tomada de decisão foi necessário realizar classificações não contidas no sistema SAP R3P. As novas aberturas foram baseadas nos manuais de manutenção e suprimentos que contemplam as necessidades do setor de operação e manutenção, além do alinhamento com os especialistas. Um requisito básico é que os materiais estejam cadastrados adequadamente e com os parâmetros básicos para análises preenchidos. Com essas definições, chega-se ao valor de 40.002 materiais saneados na base de dados, o que significa estudar toda a população de itens cadastrados no sistema geridos pelo setor de suprimentos e logística.

A classificação ABC, que tem como princípio a análise de valor dos materiais estocados, foi utilizada por diversos autores para segregarmos os materiais e definir os itens a serem analisados. Braglia *et al* (2004) usaram esse método para suportar a decisão final antes da definição das políticas de gestão de estoque. Stoll *et al* (2015) aplicaram a classificação ABC como um critério inicial de classificação devido à sua facilidade de aplicação, mas ressaltou a necessidade de uma estrutura bem construída para gestão de peças sobressalentes. Silva (2009) também realizou sua primeira seleção de itens do estudo com base nesse modelo, reduzindo de mais de 10 mil peças para 1.000 materiais e posteriormente aplicou critérios específicos para reduzir ainda mais sua base amostral. Os itens A são tidos como prioritários, segundo Gasnier (2002), pela sua importância econômica e devem ser foco de atenção do gestor de materiais, o que justifica um tratamento especial. Na base de dados em estudo não foram realizadas reduções por esse método. Esse tipo de seleção de materiais considera apenas o aspecto financeiro e não avalia a importância dos materiais para o processo produtivo (Roda *et al*, 2014). Para sanar essa deficiência utilizam-se outros métodos, como a classificação de criticidade XYZ ou VED.

As classificações XYZ e VED segmentam os itens em estoque baseado no critério do impacto resultante da falta, agregando mais informações para as rotinas de planejamento, reposição e gerenciamento. De acordo com Botter e Fortuin (2000), o método VED separa as peças de reposição em três categorias. As peças vitais causam grandes perdas no caso de indisponibilidade das peças, os itens essenciais geram perdas moderadas e os materiais desejáveis acarretam baixo ou nenhum impacto ao processo. Devido à dificuldade de diferenciação dos itens entre vital e essencial, os mesmos autores consolidaram as duas classificações em apenas uma. Stoll *et al* (2015) incluíram a classificação VED dentro da sua árvore de decisão na análise de impacto do processo produtivo. A classificação XYZ tem praticamente o mesmo foco de análise. Para Gasnier (2002), os itens X que são de baixa

criticidade comprometem o atendimento de usuários, mas não trazem maiores consequências. Os materiais Y representam um transtorno razoável e custos devido à falta. Já as peças de reposição classificadas com Z geram consequências desastrosas, como interrupção do processo, comprometimento da integridade dos equipamentos. Na empresa em estudos os materiais MRO já são classificados como XYZ, mas com um nível de detalhe maior, onde se coloca o tempo de parada do processo no caso de indisponibilidade das peças. Dessa forma há os itens: X com baixo impacto no processo por possuir recursos alternativos, outras rotas produtivas, materiais substitutos ou possibilidade de realização de manutenções paliativas, Y com impacto de parada inferior a 50 horas previstas e Z com paradas superiores a 50 horas previstas do processo produtivo. Nessa fase escolheu-se por utilizar a classificação XYZ por ser mais criteriosa e ter um parâmetro de análise quantitativo.

Para efeitos de detalhamento e verificar a variabilidade, a base de dados é detalhada em outras formas de classificação: popularidade, criticidade e aquisição. Conforme Gasnier (2002), a classificação de popularidade expressa a frequência de transações do item no período, transações podem ser entendidas como apanhas, coletas, ou seja, o momento em que os itens são retirados dos estoques para atendimento às demandas dos clientes internos da operação e manutenção. Bachetti e Saccani (2012) destacam que uma pequena parte das peças estocadas, cerca de 16%, é responsável por aproximadamente 80% da quantidade de pedidos e movimentações de estoque no estudo realizado em dez empresas italianas. No estudo foram utilizadas as seguintes faixas, considerando 12 meses de movimentação: alta popularidade (P), maior que sete retiradas de estoque; média popularidade (Q), de duas a sete apanhas; baixa popularidade (R), uma coleta em estoque. Os itens sem consumo nos últimos 12 meses serão classificados como (N). Outra abertura será referente ao processo de aquisição que representa identificação, qualificação e desenvolvimento de fornecedores, em atendimento a confiabilidade e prazos para atendimento ao processo de reabastecimento. Essa categorização utilizada pela empresa trabalha com as classes 1, classe 2 e classe 3, que respectivamente representam aquisições complexas (com mais de 45 dias), difícil (entre 15 e 45 dias) e fácil (abaixo de 15 dias). Para o estudo essa classificação deve ser alinhada com a XYZ, ou seja, o processo de aquisição tem de atender o processo, incluindo o transporte em caso de quebra de equipamentos ou rupturas de estoque. No caso de falha de um item Z, que prevê uma parada superior a 50 horas, a peça tem de ser entregue antes dessa previsão.

Classificação	Qtd itens Base	% itens Base
P – popularidade alta - > 7 und	1.041	2,60%
Q – popularidade média – 2 a 7 und	2.430	6,07%
R – popularidade baixa – 1 und	2.090	5,22%
N – sem consumo 12 meses	34.441	86,10%
Classe 1 – Aquisição complexa - > 45 dias	11.462	28,65%
Classe 2 – Aquisição difícil – de 15 a 45 dias	23.012	57,53%
Classe 3 – Aquisição fácil – < 15 dias	5.528	13,82%
Criticidade X – Sem impacto	38429	96,06%
Criticidade Y – Médio impacto - < 50 horas	1573	3,93%
Criticidade Z – Alto impacto - > 50 horas	3	0,04%
Total	40.002	100,00%

Tabela 4.1 – Estratificação dos itens da base de dados

As diferentes aberturas dos itens MRO detalha a variabilidade da base de dados do estudo. Percebe-se que existe um grande volume de itens sem consumo nos materiais saneados na base de dados, um percentual de 86,1% de peças de reposição sem movimentação nos últimos 12 meses. A construção do modelo AHP e análise dos resultados comparados com a base poderão verificar se os itens de maior pontuação contêm os elementos mais críticos para organização e os itens de menor pontuação possuem boa parte dos materiais sem giro e sem impacto. A análise serve de parâmetro para verificar os critérios de decisão e os julgamentos, dessa forma os itens de menor pontuação devem possuir menor prioridade de estocagem se comparados ao de maior pontuação, por carregar um menor benefício ao estoque. Esse ponto de análise separadamente deve apenas avaliar o modelo AHP. Para decisão de estocagem, os valores de cada peça sobressalente e as quantidades mínimas a serem estocadas devem ser consideradas.

Os itens da base de dados serão classificados conforme árvore de decisão do modelo desenvolvido utilizando o método AHP. Os itens serão os dados de entrada do modelo multicritério de decisão, sendo avaliados conforme os critérios e subcritérios do modelo. Ao final cada material receberá uma pontuação, que representa quão importante o componente é para a organização, ou seja, o benefício que esse item representa ao ser estocado para atendimento de uma demanda futura do cliente interno da operação ou manutenção. A classificação final dos itens será comparada a base de dados reais obtida na empresa. O intuito é verificar itens com baixa pontuação e que não apresentaram movimentação no histórico de dados. Nesse caso, o modelo sugeriria a não estocagem, devido à baixa pontuação do mesmo,

o que evita o armazenamento equivocado de itens. Já as peças sobressalentes com alta pontuação serão analisadas do ponto de vista de movimentação e necessidade de estocagem. A análise entre o modelo proposto e o histórico de movimentação dos dados serve como parâmetro sobre a robustez do modelo desenvolvido.

Capítulo 5

Desenvolvimento do modelo AHP

5.1. Desenvolvimento do modelo de classificação

Para a construção dos níveis hierárquicos do processo decisório, foram utilizados os critérios aplicados em modelos desenvolvidos na literatura consultada como Suryadi (2003), Suryadi (2007), Botter e Fortuin (2000), Stoll *et al* (2015), Braglia (2004), Bošnjaković (2010). Esse tipo de abordagem permite selecionar critérios já analisados por outros especialistas e aplicados em outros estudos. O método de seleção e ponderação dos pesos foram embasados nos mesmos estudos, bem como em Tam e Tummala (2001). Os pontos de análise levantados serão avaliados para verificar sua aplicabilidade ao problema em estudo e podem ser descartados de acordo com a viabilidade de aplicação. Outros critérios foram incluídos devido à sua relevância para a tomada de decisão de estocagem de materiais MRO em mineradoras conforme detalhado na seção seguinte.

A metodologia consiste em quantificar os critérios que sejam qualitativos com base no método AHP, orientados por uma pesquisa na literatura para estabelecer uma metodologia consistente. Utilizando a comparação entre os critérios serão obtidos os valores quantitativos que vão servir para validar o processo de comparação e checar os materiais atualmente estocados e seu consumo. Posteriormente a avaliação o desenvolvimento do modelo de apoio a decisão pode ser detalhado conforme estudo de caso.

Um aspecto importante deste estudo é medir o desempenho dos critérios e do método AHP para investigar se os mesmos são mais eficientes que a metodologia atual de decisão de inclusão de estocagem. A metodologia proposta busca reduzir limitações inerentes à tomada de decisão de estocagem de materiais de reposição, como obsolescência de itens, gastos desnecessários com aquisição, estocagem e movimentação de itens sem demanda, imobilização desnecessária de capital da empresa em estoques sem giro.

Boa parte dos trabalhos desenvolvidos sobre tomada de decisão e materiais MRO utilizam pequenas amostras de dados, com lacunas entre teoria e prática, além de poucas publicações de autores brasileiros conforme Rego e Mesquita (2011). O estudo desenvolvido busca testar com dados reais e amostras significativas de dados o processo decisório de

estocagem ou não de peças de reposição, aplicado em processos de beneficiamento mineral para manutenção do processo produtivo da organização com armazenamento em local único.

5.2. Método de seleção dos critérios de decisão

Os critérios de decisão que serão aplicados no método AHP para análise hierárquica foram obtidos com base na literatura, em estudos realizados sobre a tomada de decisão de estocagem ou não de materiais MRO ou incluídos no caso de atendimento a especificidades do processo de beneficiamento mineral. Abaixo segue o detalhamento dos critérios de seleção encontrados na revisão da literatura, que serão utilizados como direcionadores para os critérios a serem utilizados no trabalho. As tabelas são nomeadas com a referência dos trabalhos pesquisados e na sequência são esclarecidas nomenclaturas e siglas dos estudos não apresentadas anteriormente.

Suryadi (2003)	
Processo	Companhia produtora de gás
Tipo de estoque	Peças sobressalentes para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa.
Métodos utilizados	<i>Cut off point</i> Binário (0,1) Escala de classificação Árvore de decisão híbrida MCR (<i>Material Criticality Rating</i>)
Subcritérios de decisão	<i>Lead time</i> Grau de relação com o negócio Impacto no processo produtivo Capacidade do fornecedor em fornecer o material Material de segurança Confiabilidade da peça de reposição Consumíveis Frequência de utilização Feito sob medida
Níveis de decisão	Nível 1 – Pontuação de criticidade do material Nível 2 – Decisão binária e não-binária Nível 3 – Escala de classificação Nível 4 – Alternativas (materiais avaliados)

Tabela 5.1 – Detalhamento baseado em Suryadi (2003)

O método *Cut off point*, segundo Tam e Tummala (2001), realiza a análise de relevância do critério pela classificação em três níveis: “não importante”, nota 1; “um pouco

importante”, nota 2; e “muito importante”, nota 3. O questionário é respondido por um número de profissionais envolvidos no processo. O valor final é encontrado pela média dos valores de cada avaliação multiplicado pelo percentual de pessoas que responderam da mesma forma. Posteriormente os critérios são escalonados de forma decrescente e o ponto de corte são os valores iguais ou maiores que 2,3 conforme Tam e Tummala (2001), e aplicado em Suryadi (2003). O método *cut off point* pode ser aplicado em diversas situações. Gallon *et al* (2013) utilizaram o método para classificar sistemas de coleta. Kundid e Ercegovac (2011) afirmam que o método *cut off point* pode ser útil para investigações futuras no financiamento de crédito de pequeno e médio porte. Neste estudo foi utilizada a aplicação da metodologia conforme encontrado nos estudos relacionados a seleção de critérios e subcritérios para peças de reposição.

No modelo binário (0,1) do trabalho desenvolvido por Suryadi alguns itens são previamente inseridos ou excluídos da base. Os itens de segurança da companhia devem obrigatoriamente ser estocados e recebem o valor 1. Se o material tiver uma data de validade muito curta não deve ser estocado e recebe o valor binário 0. Os demais materiais que não se enquadram no método binário são inseridos na escala de classificação e árvore de decisão híbrida. Devido à utilização de diversos métodos em uma mesma árvore de decisão, foi inserido o adjetivo híbrido. A escala de classificação foi inserida devido ao elevado número de comparações par a par que seriam realizadas na aplicação do método AHP, a escala de classificação utiliza cinco critérios “facilmente notado”, “bons”, “intermediários”, “razoável” e “insignificante”. Para finalizar a análise, os materiais são incluídos na escala de classificação e multiplicados pelos pesos dos critérios conforme o ponto de vista nesse critério selecionado pelo método *Cut off point*. O MCR é composto de três níveis provenientes desse processo iterativo, onde MCR1 são estoques vitais, MCR2 estoque essencial e MCR3 não essenciais. Este trabalho mesclou parte da metodologia AHP com diversos critérios para minimizar as características qualitativas. Vale destacar que a decisão binária do material é tomada com base no conhecimento e experiência dos profissionais envolvidos.

Suryadi (2007)	
Processo	Processos de manufatura
Tipo de estoque	Peças sobressalentes para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa

	<i>Cut off point</i>
Métodos utilizados	AHP na etapa de ponderação dos critérios Escala de classificação MCR (<i>Material Criticality Rating</i>)
	<i>Lead time</i>
Subcritérios de decisão	Impacto no processo produtivo Data de validade do material Capacidade do fornecedor em fornecer o material Material de segurança Custo das peças de reposição Custo de manutenção Confiabilidade do material
Níveis de decisão	Nível 1 – Prioridade de aquisição Nível 2 – Critério por área envolvida Nível 3 – Subcritério relacionado a cada área Nível 4 – Escala de classificação Nível 5 - Alternativas (materiais avaliados)

Tabela 5.2 – Detalhamento baseado em Suryadi (2007)

Inicialmente foram identificadas as quatro áreas que possuem maior envolvimento nos processos de peças de reposição, sendo operação, manutenção, armazenagem e aquisição. Inicialmente foram levantados 17 critérios. Pelo método *Cut off point*, foram selecionados apenas nove, que foram relacionados como de interesse de cada setor envolvido. Na escala de classificação os valores atribuídos são 1, 3, 5, 7, 9 para os critérios “facilmente notado”, “bons”, “intermediários”, “razoável” e “insignificante” respectivamente. Posteriormente os materiais são avaliados conforme o critério de interesse de cada área e posteriormente são disponibilizadas as prioridades. Para seleção dos critérios e das áreas mais importantes relacionadas a peças de reposição, foi utilizada a técnica de grupo nominal em cinco empresas de manufatura. O trabalho teve como objetivo principal minimizar o conflito entre as áreas organizacionais relacionadas a peças de reposição. Ao comparar os critérios selecionados no estudo de 2003 e de 2007 desenvolvidos por Suryadi, percebem-se algumas alterações que podem ser compreendidas em decorrência do objetivo final e da aplicação do modelo em um caso real.

Botter e Fortuin (2000)	
Processo	Dispositivos eletrônicos para aplicações industriais
Tipo de estoque	Peças sobressalentes para manutenção em sistemas instalados no cliente

Métodos utilizados	VED (vital, essencial, desejável) Classe de itens X,Y,Z (alto, médio e baixo giro respectivamente) FSN (fast moving, slow moving, no moving) LOS (Level of service)
Subcritérios de decisão	Criticidade da função a ser executada por um sistema que se tornou defeituoso Preço Tempo de resposta entre a solicitação de reparo e a reativação do sistema Consumo total por período Peças sem giro não devem ser estocadas
Níveis de decisão	Não foi utilizado o método AHP. Não se aplica.

Tabela 5.3 – Detalhamento baseado em Botter e Fortuin (2000)

O modelo desenvolvido por Botter e Fortuin (2000) descartou a aplicação da metodologia AHP, por considerar a mesma como um modelo de classificação e o objetivo era avaliar a criticidade dos itens estocados. Para decidir quais itens estocar foi desenvolvido um método com a utilização do método VED apenas com dois critérios, essencial e desejável devido à dificuldade de mensurar o que é essencial e o que é vital. Os itens foram escalonados nesses dois grandes grupos e posteriormente pelo consumo do item no período mensal. A decisão foi estocar todas as peças essenciais e a quantidade a ser estocada iria variar conforme a quantidade consumida (FSN), nível de serviço ao cliente e preço. Para decidir a quantidade de peças a serem estocadas, foi descartada a hipótese de modelos matemáticos sofisticados decorrentes da dificuldade de implantação e manutenção. A classificação final indicava quais peças estocar e onde estocar, no centro de armazenagem geral ou nos galpões locais de armazenamento. A classificação final visa atender o nível desejado de atendimento superior a 95% das demandas dos clientes. O foco foi atender as necessidades da organização que eram melhorar a performance financeira e manter altos níveis de satisfação dos clientes, que tinham tempos contratuais de atendimento de 2 a 4 horas, no próximo dia ou superior a um dia, o que deixa claro a necessidade dos estoques nesse cenário.

Stoll et al (2015)	
Processo	Indústria automobilística
Tipo de estoque	Peças sobressalentes para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa

Métodos utilizados	ABC XYZ (previsibilidade de demanda) VED Classificação tridimensional AHP Árvore de decisão
Subcritérios de decisão	<i>Lead time</i> Frequência de falha Prioridade do equipamento Tempo de instalação Disponibilidade do equipamento Processos alternativos
Níveis de decisão	Nível 1 – Criticidade total Nível 2 – Manutenção e operação Nível 3 – Os critérios selecionados Nível 4 – VED por critério

Tabela 5.4 – Detalhamento baseado em Stoll *et al* (2015)

Stoll *et al* (2015) desenvolveram uma abordagem tridimensional em cooperação com uma empresa automobilística alemã, baseada na análise de valor, previsibilidade da demanda e criticidade das peças de reposição. A análise ABC para classificar as peças referentes a valor, o método XYZ para previsibilidade de demanda, onde X para demandas constantes, Y para previsibilidade média e Z para itens com demanda aleatória. A avaliação de criticidade foi baseada no método VED (vital, essencial e desejável). Para cada diferente combinação entre os métodos como item C-Z-V, ou seja, baixo valor, demanda aleatória e peça vital ao processo, é tomada uma decisão de estocagem, como estocar uma unidade, estoque zero, aquisição sob demanda, quantidade ótima de pedido. A quantidade a ser estocada era encontrada com base da quantidade econômica de pedido. O método AHP foi utilizado para operacionalizar a dimensão de criticidade. A comparação par a par foi realizada entre os critérios selecionados nos quais os itens eram alocados conforme os três níveis possíveis estabelecidos previamente. Os critérios que pertencem à ramificação da manutenção (frequência de falha, *lead time* e tempo de instalação) foram comparados entre eles, bem como os critérios de produção. Na comparação global foi realizada a comparação par a par entre manutenção e produção. Os critérios foram divididos entre manutenção e operação, que classificam cada um em três níveis referentes ao método VED. Para exemplificar, o critério frequência de falha foi dividido em maior que seis vezes, como vital; maior ou igual a três vezes e menor que seis falhas essencial; e menor que três falhas ao ano como desejável. Todos critérios foram divididos em três níveis para classificação das peças. Os materiais MRO eram

inseridos na árvore conforme classificação dos critérios e método VED, o que não permitiu a realização da comparação entre os itens. Foi uma forma de adequar a aplicação do método AHP devido a grande quantidade de dados. Com a criticidade final dos itens se traçava a estratégia de estocagem a ser utilizada para cada peça de reposição.

Braglia et al (2004)	
Processo	Indústria de papel
Tipo de estoque	Peças sobressalentes para manutenção do processo produtivo e sistemas da empresa
Métodos utilizados	AHP RCM (<i>Reliability centered maintenance</i>) Árvore de decisão
Subcritérios de decisão	Problemas de qualidade Perdas de produção Efeito dominó Impactos ambientais e de aspectos de segurança Preço Espaço para armazenagem Obsolescência Prazo de validade Tempo perdido Peças intercambiáveis <i>Lead time</i> Número de potenciais de fornecedores Tempo interno de reparo População instalada do mesmo item Redundâncias Frequência de falha
Níveis de decisão	Nível 1 – Criticidade, Utilização, característica de fornecimento e criticidade da peça para planta produtiva Nível 2 – Critérios de análise Nível 3 – RCM (<i>Reliability centered maintenance</i>) Nível 4 – Alternativas

Tabela 5.5 – Detalhamento baseado em Braglia (2004)

O trabalho de Braglia (2004) busca identificar a política mais adequada para gerenciamento dos estoques. Para atingir o objetivo foi utilizada a técnica RCM – Manutenção centrada em confiabilidade para obter a classificação dos conjuntos de nós de decisão, ou seja, o levantamento dos critérios. Posteriormente os mesmos foram analisados

com base na criticidade do impacto de falha e análise ABC para finalmente classificar a estratégia de gestão dos estoques. Todos os critérios foram abertos em três níveis e analisados conforme um grupo determinado sendo: criticidade, características de abastecimento, problemas de estocagem e taxa de utilização. Foi destacada no estudo a relação entre peças sem movimento, segundo Braglia (2004) chamada de “estoque morto” e itens *slow moving*, na qual existe uma intercessão entre essas duas características, em que o estoque morto não pode ser eliminado. Os mesmos critérios apresentados por Braglia (2004) foram a base de análise do estudo proposto por Roda *et al* (2014) no estudo de empresas de mineração chilenas, fato que torna desnecessário replicar um novo detalhamento de subcritérios. Vale destacar que o estudo desenvolvido por Roda *et al* (2014) teve como foco principal mapear os principais critérios utilizados pelas mineradoras chilenas, não sendo desenvolvido um modelo de tomada de decisão. Nesse ponto estão os materiais críticos para o processo. Como conclusão foram definidas três políticas de estocagem, sendo não estocar, manter uma única peça em estoque, utilizar a política *just-in-time* ou a estocagem de múltiplos itens, essa última sendo considerada como a de custo mais elevado.

Bošnjaković (2010)	
Processo	Não especificado, sem estudo de caso
Tipo de estoque	Peças sobressalentes em geral
Métodos utilizados	AHP, ABC, VED e FSN
Subcritérios de decisão	Tempo de perda de produção Redução da quantidade de produção Perda de qualidade da produção Prazo de entrega desconhecido Prazo de entrega longo Fornecedor único Perigo para o ambiente Impacto sobre a operação de outra máquina Menor perigo de estocagem Problemas de deterioração Espaço requerido para transporte e armazenagem Preço para estocagem
Níveis de decisão	Nível 1 – Pontuação máxima entre os critérios Nível 2 – Grupos de critérios Nível 3 – Critérios Nível 4 – Alternativas

Tabela 5.6 – Detalhamento baseado em Bošnjaković (2010)

Com foco em identificar a política mais adequada para estocagem de material em Bošnjaković (2010) assim como Braglia (2004), foi realizada a separação dos critérios em quatro grandes grupos sendo produção, fornecimento, segurança operacional e estocagem com três subcritérios cada grupo. Os critérios eram classificados em 1, 2 e 3 para adequação à escala VED respeitando a ordem: vital recebe valor 3, essencial 2 e desejável 1. Apenas os critérios do grupo produção utilizavam classificação diferente, na qual é realizado o produto entre a classificação VED e criticidade do equipamento de 1 a 10, realizado o produto entre eles e posteriormente extraída a raiz quadrada. Os valores encontrados recebem faixas para receberem valores 1, 2 ou 3. A última análise é referente ao método FSN (frequência de apanhas em estoque), onde F é relativo a itens frequentemente retirados do estoque, S para peças pouco utilizadas e N para peças com apanhas muito raras. Com o método são encontradas 27 combinações possíveis, posteriormente cada uma das combinações recebe uma política de gestão de estoque dentre as três apresentadas pelo autor, que são: sem peças em estoque, uma peça em estoque ou mais peças em estoque. A compra dos materiais é feita sob demanda para estoque zero. Depois de retirada as peças da primeira compra que estão em estoque, as peças são repostas com aquisições unitárias para peças com ponto de reposição igual a 1 e pelo lote econômico de compras para itens com mais de uma peça estocada. Foi destacada a facilidade de implementação na prática, além de sua aplicação em estoques de empresas de manufatura e serviços.

Todos os critérios levantados anteriormente servem como base para seleção dos possíveis pontos de análise a serem utilizados no modelo de decisão para peças de reposição em processos contínuos de mineração. Nessa etapa não se pode desconsiderar as especificidades do método AHP que será aplicado no estudo de caso, de tal forma que os critérios selecionados se adequem ao modelo. Para mitigar a possibilidade de falhas nessa etapa, levantam-se os pontos de destaque apresentados por Saaty (2008), onde são abordados como fazer uma decisão utilizando a análise hierárquica de processos.

De acordo com Saaty (2008), deve-se conhecer os critérios de decisão, seus subcritérios, partes interessadas, grupos afetados e ações alternativas. Como critérios aplicáveis ao processo de beneficiamento mineral, pode-se detalhar Braglia (2004), que utilizou criticidade operacional, características de suprimentos, problemas de estocagem e taxa de utilização; Suryadi (2007), que delimitou também quatro critérios, sendo operação, manutenção, aquisição e estocagem; e Stoll *et al* (2015) que, no segundo nível, utilizaram apenas os critérios de manutenção e produção.

Percebe-se que a gestão de materiais tem como principais processos envolvidos a operação, a manutenção, aquisição e estocagem. Por entender que o objetivo de manter estoque é cumprido quando a peça é entregue ao usuário, neste trabalho consideram-se aquisição e estocagem como um único critério, nomeado como suprimentos. A consolidação das áreas se justifica devido à dependência direta entre elas. Mesmo que a organização possua a melhor equipe de compras e entregue os processos comerciais dentro do prazo, o material não será entregue ao usuário no prazo se a equipe de estocagem não conseguir localizar a mesma no armazém. Por outro lado o estoque com acuracidade total não atende aos clientes se o setor de compras não finalizar os processos comerciais a tempo e a logística não entregar no local e no horário adequado. Logo os subcritérios relacionados a compra, movimentação, logística e estocagem serão considerados como sub-níveis do critério de suprimentos. Os critérios utilizados neste estudo são: operação, manutenção e suprimentos. Esses critérios estão relacionados à criticidade global da planta, ou seja, cada peça estocada mitiga um risco operacional conhecido. Assim cada peça estocada inclui-se em estoque o benefício da disponibilidade da peça, equipamento ou material de que se necessita em um momento de quebra de máquinas, perda de produção, falhas de sistemas, manutenções preventivas, dentre outros diversos eventos adversos que podem ocorrer em um processo produtivo. Nessa etapa da decisão, cada peça estocada traz o benefício de mitigar um problema operacional. Os pesos finais encontrados com o método AHP são considerados como criticidade da falta do item que pode ser mitigada com a estocagem da mesma.

Seleciona-se a meta, que é encontrar o benefício de cada material que se deseja estocar, o primeiro nível da hierarquia. O segundo nível com os critérios (operação, manutenção e suprimentos) detalha os subcritérios correspondentes ao terceiro nível da árvore de decisão. Para decidir quais critérios utilizar, foram excluídos, dentre os encontrados nos estudos mencionados acima, todos que têm como princípio a necessidade de dados históricos, bem como os apresentados em duplicidade ou redundantes com nomenclaturas diferentes. Exemplifica-se com o termo “redução da quantidade produzida”, “perdas de produção” e “tempo de perda de produção”, todos com o mesmo significado de impacto no processo produtivo. A retirada de critérios com necessidade de dados históricos se justifica, visto que o intuito é evitar a inclusão em estoques de materiais que não apresentarão demanda futura e dificilmente irão apresentar histórico de dados. Com a aplicação dessa regra nos 56 subcritérios encontrados na revisão de literatura e descartando os apresentados em duplicidade, tem-se 21 subcritérios. Os mesmos foram avaliados sob a ótica de aplicabilidade

ao processo de mineração contínuo, descartando os critérios “prazo de validade”, “menor perigo de estocagem” e “obsolescência”. A validade dos materiais não impacta para decisão de estocagem, visto que praticamente a totalidade de materiais não é impactada pelo tempo de estocagem, fato que descarta também a necessidade de análise da obsolescência, que considera validade e mudança tecnológica de forma rápida que impede a aplicação dos componentes. O processo em estudo aplica equipamentos com longa vida útil, diversas manutenções e reparos, fato que, segundo os especialistas da empresa, torna desnecessário analisar o critério obsolescência. O perigo de estocagem é um risco inerente a produtos químicos e explosivos que são adequadamente armazenados e manuseados. Realizado as etapas acima restaram 18 critérios, como mostra a Tabela 5.7:

Subcritérios sem necessidade de histórico de estocagem	
	<i>Lead time</i>
	Impacto no processo produtivo
	Material de segurança
	Confiabilidade do material
	Consumíveis
	Feito sob medida
	Custo de manutenção
	Criticidade da função a ser executada por um sistema que se torna defeituoso
Subcritérios de decisão	Preço
	Prioridade do equipamento
	Disponibilidade do equipamento
	Processos alternativos
	Impactos ambientais e de segurança
	Espaço para armazenagem
	Peças intercambiáveis
	Número de fornecedores potenciais
	População instalada do mesmo item
	Perda de qualidade da produção

Tabela 5.7 – Subcritérios sem necessidade de histórico de dados

Aos 18 critérios restantes foram incluídos os critérios: “dificuldade de aquisição” e “possibilidade de manutenção interna”, que são analisados frequentemente na organização em estudo conforme especialistas da organização.

Para identificar os critérios relevantes, foi realizada uma pesquisa envolvendo 30 membros escolhidos aleatoriamente de diferentes áreas diretamente envolvidos com o processo de estocagem. A entrevista foi aplicada individualmente para evitar a influência dos julgamentos. Os entrevistados foram solicitados a classificar cada um dos fatores utilizando a escala de três pontos, também chamada de *Cut of point*. O mesmo método de seleção de

critério foi utilizado em Suryadi (2003), Tam e Tummala *et al* (2001). A escala desse método consiste em “não importante”, “pouco importante” e “muito importante”, que correspondem a valores 1, 2 e 3 respectivamente. O valor médio do critério é encontrado pela soma da multiplicação do percentual de entrevistados que classificaram o critério pelo valor do mesmo. O valor de corte deve ser maior ou igual a 2,3 para os critérios relevantes.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a seguir apresentam os resultados dessas análises para os critérios de produção e operação, manutenção e suprimentos.

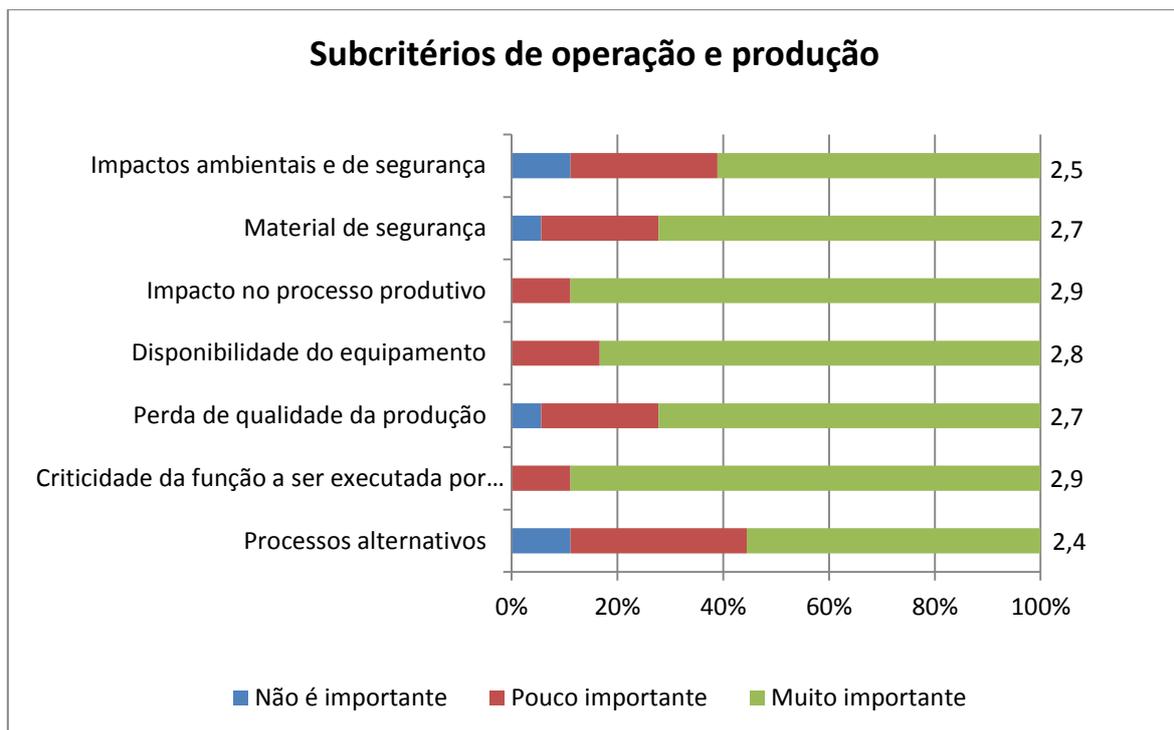


Figura 5.1 – Seleção de subcritérios relevantes de operação e produção

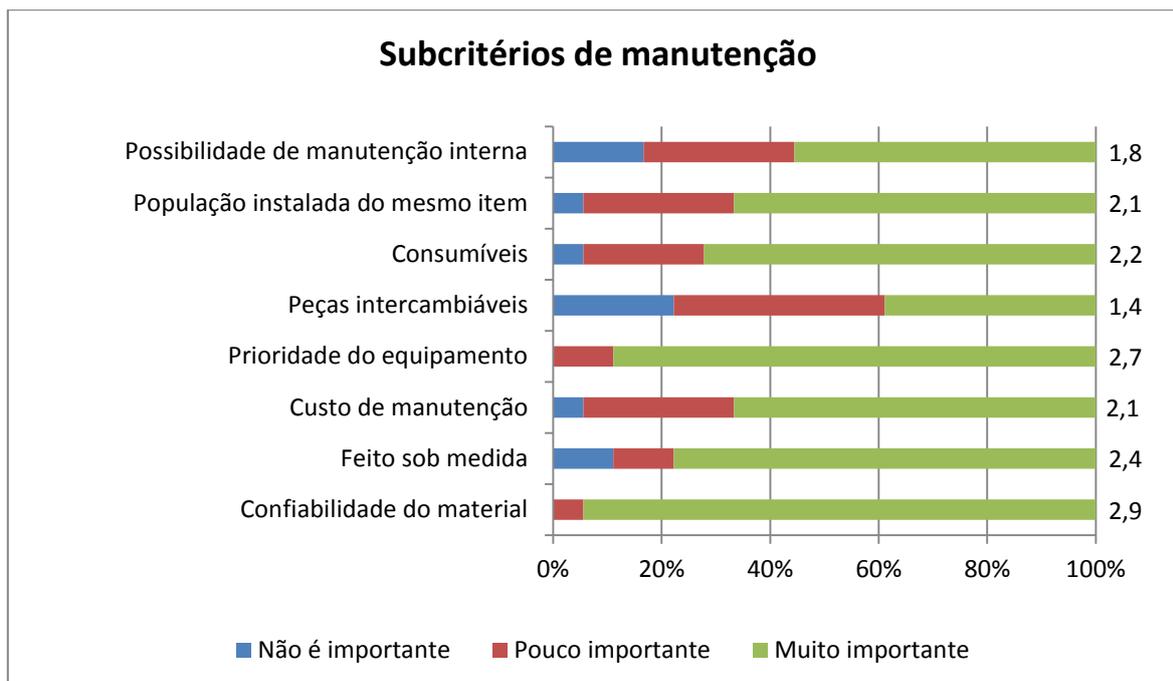


Figura 5.2 – Seleção de subcritérios relevantes de manutenção

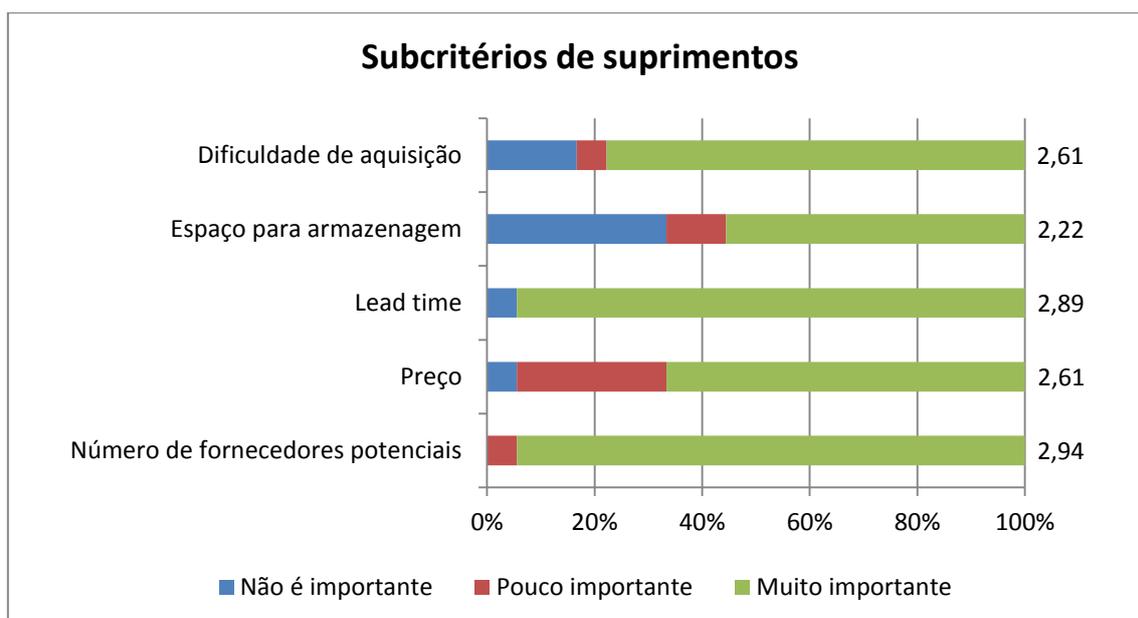


Figura 5.3 – Seleção de subcritérios relevantes de suprimentos

Os critérios com valores de média acima de 2,3 serão selecionados para utilização no modelo AHP, conforme Tam e Tummala (2001), aplicado em Suryadi (2003) e Suryadi (2007), estão listados na tabela abaixo e serão utilizados na construção do modelo AHP, para tomada de decisão de quais peças sobressalentes estocar em empresas de beneficiamento mineral contínuos.

Critérios	Subcritérios
Produção e operação	Processos alternativos
	Criticidade da função a ser executada por um sistema que se torna defeituoso
	Perda de qualidade da produção
	Disponibilidade do equipamento
	Impacto no processo produtivo
Manutenção	Material de segurança
	Impactos ambientais e de segurança
	Confiabilidade do material
Suprimentos	Feito sob medida
	Prioridade do equipamento
	Número de fornecedores potenciais
	Preço
	<i>Lead time</i>
	Dificuldade de aquisição

Tabela 5.8 – Subcritérios e critérios selecionados

Selecionados os critérios, a etapa seguinte é a construção do modelo de tomada de decisão, onde se analisa a melhor forma de aplicação do método AHP, bem como a viabilidade de utilização dos critérios levantados.

5.3. O modelo AHP e VED aplicados aos critérios e subcritérios

O método AHP pode ser utilizado de duas formas conforme Tam e Tummala (2001), Suryadi (2003 e 2007), Saaty (2008). Na forma mais usual, o modelo relativo, são realizadas as comparações par a par entre as alternativas a serem escolhidas. Cada subcritério é relacionado com todas alternativas. A outra maneira é o modelo de classificação onde são estabelecidas categorias de classificação para cada critério.

Uma grande desvantagem da comparação par a par usual é a explosão do número requerido de comparações em grandes quantidades de alternativas, o que torna o processo computacionalmente difícil e algumas vezes ineficaz. Pode-se calcular o número de comparações par a par necessárias pela equação.

$$I = n(n - 1)/2 \quad (5.1)$$

Onde

I – número de comparações par a par

N – número de alternativas

Na existência de 20 alternativas existem 190 comparações em cada subcritério. Neste estudo trabalhou-se com 40.002 itens, o que tornaria o processo computacional muito custoso para um processo de tomada de decisão.

A comparação dos resultados entre o modelo relativo e o modelo de classificação foi estudado por Saaty (2008) e destaca que os dois métodos não apresentam os mesmos resultados de priorização. O modelo relativo onde as alternativas são comparadas entre si são mais exatos se comparados ao modelo de classificação. Ressalta que o método de classificação tem a vantagem de que se pode avaliar um grande número de alternativas bastante rapidamente, e os resultados são adequadamente próximos aos encontrados no método relativo. Dessa forma será utilizado o método AHP com modelo de classificação, pois apresenta resultados satisfatórios e permite a análise rápida de grande número de alternativas.

O método AHP apresenta forma de análise que permitem verificar a consistências e qualidade dos julgamentos. Braglia *et al* (2004), Marins *et al* (2010), Saaty (2008), apresentam esses critérios baseados no autovalor e autovetor das matrizes de comparação par a par que foi desenvolvido e apresentado em Saaty (1980). O índice de consistência IC de uma matriz $n \times n$ é definido pela equação abaixo.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5.2)$$

Onde λ_{\max} é o maior autovalor da matriz. A qualidade dos julgamentos é medida por I_R que é calculado pela razão e indica a inconsistência:

$$I_R = IC / IR \quad (5.3)$$

O termo IR é um índice randômico, conforme apresentado por Saaty (1991) para matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório apresentada abaixo.

nxn	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tabela 5.9 – Índice randômico do AHP

Os julgamentos são aceitáveis quando $I_R \leq 0.1$.

Para a adequada utilização do modelo de classificação é necessário construir uma escala de classificação entre os critérios e subcritérios selecionados. Uma forma de classificação é o método VED, utilizado por Botter e Fortuin (2000), Bošnjaković (2010) e Stoll *et al* (2015) apresentados na seção 2.6 deste trabalho. Por se tratar de um método de classificação qualitativo, o mesmo depende diretamente das ponderações subjetivas do responsável pela classificação. Neste estudo os valores dos julgamentos foram baseados nas diferenças obtidas entre os subcritérios após a aplicação da metodologia *cut off point*, sendo mais equilibrada que o julgamento de apenas um avaliador. A divisão de prioridades entre os critérios de operação/produção, manutenção e suprimentos foram obtidos por meio da entrevista sobre qual setor tem maior importância e prioridade no processo de estocagem de materiais. Botter e Fortuin (2000) destacaram a dificuldade de diferenciação entre as classes vital, essencial e consolidando as mesmas. Stoll *et al* (2015) inicialmente descartaram a utilização do método VED diretamente como escala de classificação, justificaram que seria impraticável uma política de manutenção baseada em peças de reposição, onde os critérios fossem analisados apenas com critérios qualitativos. Stoll *et al* (2015) delimitaram limites quantitativos e, na impossibilidade de quantificar, determinou critérios claros de classificação de acordo com as categorias VED.

As categorias foram desenvolvidas de acordo com cada subcritério selecionado para processos de produção mineral, abaixo dos critérios de produção/operação, suprimentos e manutenção. O desdobramento irá permitir uma abordagem clara e objetiva dos níveis de abertura, detalhamento não encontrado na bibliografia consultada para mineradoras e que contribui significativamente para o estudo e aplicações futuras da metodologia, visto que os critérios foram avaliados com a colaboração dos especialistas de uma empresa multinacional de grande porte do setor de mineração.

Subcritério	VED	Limites
Processos alternativos	Vital	Não possui
	Essencial	Possui um processo
	Desejável	Mais de um processo
Críticidade da função a ser executada	Vital	Equipamento não opera
	Essencial	Opera com restrições
	Desejável	Opera normalmente
Perda de qualidade da produção	Vital	Perda > 5%
	Essencial	Perda ≤ 5%
	Desejável	Sem perda de qualidade

Disponibilidade do equipamento	Vital Essencial Desejável	> 95% ≥ 90% e ≤ 95% < 90%
Impacto no processo produtivo	Vital Essencial Desejável	> 50 horas paradas < 50 horas paradas Sem paradas previstas
Material de segurança	Vital Essencial Desejável	Potencial de fatalidade Potencial de lesões graves Potencial de lesões leves
Impactos ambientais e de segurança	Vital Essencial Desejável	Impacto irreparável Reparável Sem impacto

Tabela 5.10 – Limites quantitativos para subcritérios de produção e operação

Os subcritérios de manutenção são apresentados na Tabela 5.11.

Subcritério	VED	Limites
Confiabilidade do material	Vital Essencial Desejável	Falha imprevisível Falha previsível Sem impacto de falha
Feito sob medida	Vital Essencial Desejável	Conforme desenho próprio Conforme desenho fornecedor Item sem desenho
Prioridade do equipamento	Vital Essencial Desejável	Restrição > 10% Restrição ≤ 10% Sem restrição produtiva

Tabela 5.11 – Limites quantitativos para subcritérios de manutenção

Para finalizar classificam-se os subcritérios de suprimentos na metodologia VED adaptada. O critério preço e suas aberturas servem para mensurar a dificuldade do processo comercial para aquisição da peça sobressalente. Não se pode afirmar que todo material com preço baixo não possui importância para o processo produtivo. Itens de baixo valor podem ser importantes. Esse detalhe é analisado especificamente nos subcritérios: “processos alternativos”, “criticidade da função a ser executada”, “perda de qualidade da produção”, “disponibilidade do equipamento”, “impacto no processo produtivo”, “confiabilidade do material” e “prioridade do equipamento”. Na base de dados os itens classificados como Z possuem valor acima de R\$ 17 mil, o que é uma peculiaridade da base de dados e não pode ser considerado como regra. A maioria dos itens Y possuem valores elevados inclusive acima

de R\$ 25 mil, bem como alguns com valores inferiores a R\$ 1 mil, o que reforça que a classificação de preço não está diretamente relacionada a importância do material.

Esse subcritério de suprimentos é referente à dificuldade de aquisição de itens com valores elevados, pois demandam um planejamento anual, e caso seja realizada a compra sem o orçamento prévio é necessário alterar ou deixar de realizar alguma atividade planejada anteriormente. Os itens da classe vital no subcritério preço são classificados de forma diferente pela organização no sistema ERP e são comprados mediante orçamento realizado no ano anterior, fato que justifica classificá-los como vitais, sendo que a falta dessa peça em estoque não é facilmente sanada.

Subcritério	VED	Limites
Número de fornecedores potenciais	Vital	Fornecedor único
	Essencial	\leq cinco fornecedores
	Desejável	$>$ cinco fornecedores
Preço	Vital	$>$ R\$ 25.000
	Essencial	\geq R\$ 1.000 e \leq R\$ 25.000
	Desejável	$<$ R\$ 1.000
Lead time	Vital	\geq 04 meses
	Essencial	$>$ 01 mês e $<$ 04 meses
	Desejável	$<$ 01 mês
Dificuldade de aquisição	Vital	Complexa $>$ 45 dias
	Essencial	Difícil \geq 15 dias e \leq 45 dias
	Desejável	Fácil $<$ 15 dias

Tabela 5.12 – Limites quantitativos para subcritérios de suprimentos

A escala de classificação será construída conforme técnica apresentada por Stoll *et al* (2015). A comparação par a par das matrizes serão realizadas entre os subcritérios, onde cada elemento da matriz terá um vetor de ponderação, na qual a soma dos elementos desse vetor é igual a 1, ou seja, vetor normalizado após a comparação par a par dos subcritérios. Esse vetor representa a influência de cada elemento da árvore de decisão no nível seguinte. O modelo VED também possuirá seu vetor onde cada classificação, vital, essencial ou desejável, influenciará os níveis superiores. As matrizes e figuras esquemáticas do modelo são apresentadas na seção 9.3.

Para efeitos de cálculos do modelo nomearam-se as prioridades de (*P*) sendo desmembradas em total e global e os pesos serão nomeados de (*v*) sendo divididos em pesos da categoria VED e pesos dos critérios, conforme Stoll *et al* (2015). Assim:

$P_{h,i}^{global}$ – A prioridade global da categoria h em termos do critério i .

v^h – peso da categoria VED e v^i – peso do critério em relação ao próximo nível.

Desta forma:

$$P_{h,i}^{global} = v^h * v^i \quad (5.4)$$

Somando-se todas as prioridades globais de um nível na hierarquia, que consiste em vários critérios i , existe a prioridade geral da categoria $P_{h,i}^{global}$ em última análise, o que é ponderado com respeito ao objetivo global.

$$P_h^{total} = \sum_i P_{h,i}^{global} \quad (5.5)$$

Isso significa que a prioridade global do segundo nível das áreas de operação, manutenção e suprimentos são obtidos pelo cálculo de prioridades globais dos critérios no terceiro nível. Analogamente as prioridades do primeiro nível são resumidas das prioridades globais provenientes dos setores de operação, manutenção e suprimentos.

5.4. Implementação do modelo AHP e da abordagem

O modelo tem como base no método de classificação. Um aspecto importante deste estudo é conseguir mitigar as análises qualitativas do processo decisório de estocagem de peças sobressalentes. Os valores das inconsistências apresentados na Tabela 5.13 são referentes a cada comparação par a par realizadas entre os níveis das tomadas de decisão.

Nível da comparação	Valor de $I_R \leq 0.1$
Operação, manutenção e suprimentos	0.00355
Subcritérios de operação	0.03042
Subcritérios de manutenção	0.00675
Subcritérios de suprimentos	0.01629
Alternativas (VED)	0.0000

Tabela 5.13 – Valores das inconsistências das comparações

Os valores de I_R apresentados para avaliar as comparações realizadas entre os subcritérios, critérios e o método VED, aplicados para classificação das peças sobressalentes,

estão adequadas à metodologia AHP, o que nos permite construir a árvore de tomada de decisão. Caso os valores de I_R apresentassem valores superiores a 0.1, indicariam discrepâncias entre análises dos especialistas nos critérios levantados, fato que tornaria o cálculo dos benefícios inviáveis, considerando as ponderações obtidas com base no método AHP.

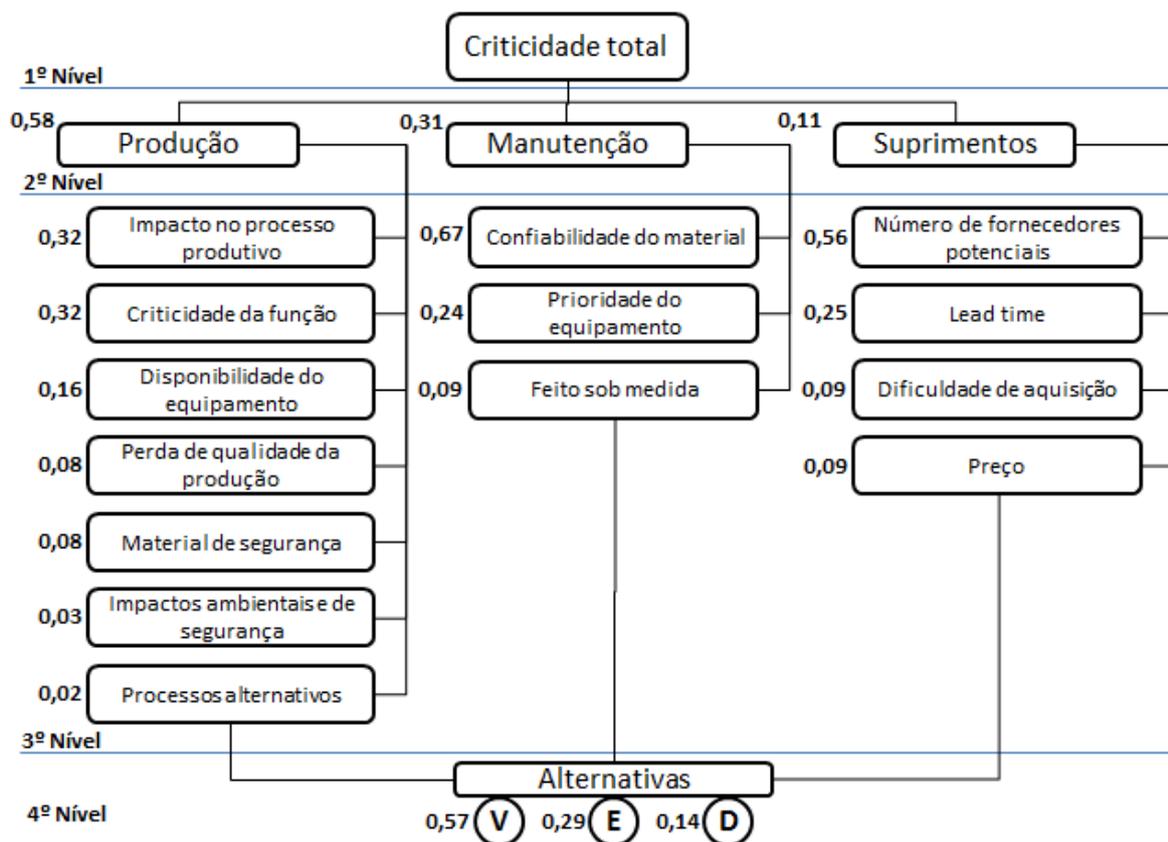


Figura 5.4 – Hierarquia e pesos dos critérios e subcritérios

A árvore de decisão da Figura 5.4 demonstra os pesos que serão aplicados para encontrar o valor final de se estocar ou não o item. Esse processo inicialmente pode demandar muito tempo em decorrência da classificação de todos os itens conforme critérios acima. Posteriormente a classificação dos itens é utilizada como forma de apoiar a decisão de quais itens devem ser estocados.

5.4.1. Análise do modelo AHP implementado e base de dados

A árvore de decisão permitiu classificar os 40.002 itens. Encontrando o benefício relativo de estocar cada item, este valor representa a criticidade de cada peça considerando os parâmetros analisados. As Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16 abaixo apresentam um exemplo de como cada um desses itens foi avaliado com base nos pesos dos critérios e subcritérios da árvore de decisão.

Subcritério Preço (R\$)	Item	Preço do item (R\$)	VED	Peso da categoria v^h (A)	Peso do subcritério v^i (B)	$P_{h,i}^{global}$ Categoria (AxB)
> 25 mil	X1	R\$ 50.000	Vital	0,57	0,095	0,05415
≥ 1 e ≤ 25 mil	X2	R\$ 12.000	Essencial	0,29	0,095	0,02755
< 1mil	X3	R\$ 750	Desejável	0,14	0,095	0,0133

Tabela 5.14 – Exemplo de classificação baseado em um subcritério de suprimentos

O processo acima foi realizado para cada item em todos os subcritérios. Ao final é realizada a soma dos $P_{h,i}^{global}$ de cada critério, conforme tabela abaixo.

Item	$P_{h,i}^{global}$ Nº Fornecedores potenciais (A)	$P_{h,i}^{global}$ Lead time (B)	$P_{h,i}^{global}$ Dificuldade aquisição (C)	$P_{h,i}^{global}$ Preço (D)	$P_h^{total} = \sum_i P_{h,i}^{global}$ (A+B+C+D)
X1	0,3192	0,1425	0,0541	0,5415	1,0573
X2	0,1624	0,0725	0,0275	0,0275	0,2899
X3	0,0784	0,0350	0,0133	0,0133	0,14

Tabela 5.15 – Exemplo de classificação baseado no critério de suprimentos

A criticidade encontrada em P_h^{total} representa a avaliação do item apenas nos subcritérios de suprimentos. Os passos devem ser repetidos nos subcritérios de manutenção e operação. Os valores encontrados foram multiplicados pelo peso de cada critério e posteriormente somados para obter a criticidade total de item. A tabela mostra a continuidade de aplicação do método AHP no segundo nível da árvore de tomada de decisão.

Item	P_h^{total} Suprimentos (A)	Peso Suprimentos (B)	$P_{h,i}^{total}$ Suprimentos (AxB)
X1	1,0573	0,11	0,1163
X2	0,2899	0,11	0,0319
X3	0,14	0,11	0,0154

Tabela 5.16 – Exemplo de classificação total baseado no critério de suprimentos

A soma dos $P_{h,i}^{total}$ referentes aos critérios de operação, manutenção e suprimentos disponibilizam o valor quantitativo da criticidade total de cada item analisado. O valor encontrado serve de parâmetro para decidir quais peças são mais importantes de serem estocadas. Podem-se considerar esses valores como o benefício que esse item traz ao ser estocado. Após o cálculo de todas as criticidades, uma análise foi realizada com o intuito de comparar os resultados encontrados com as aberturas X, Y, Z utilizadas na organização que era a única abertura existente no sistema que vinculava a estocagem do material com a utilização do mesmo sob o ponto de vista de impacto produtivo. Os materiais Z são os mais importantes e com maior prioridade de estocagem. Os itens Y tinham prioridade intermediária e os X não possuíam importância relevante para operação e manutenção.

Com construção do modelo AHP e análise dos resultados comparados com a base de dados disponibilizada pela organização, tem-se os seguintes resultados:

- Os itens classificados como Z apresentaram criticidade total encontrada pelo método AHP entre 0,428418 e 0,556448. A base da organização consta com três itens nessa classe. No resultado obtido pelo método AHP foram encontrados 671 itens nessa faixa.
- Os itens de classificação Y somam 1.573 materiais na base cedida pela empresa e possuem criticidade total entre 0,506972 e 0,16958. No resultado encontrado pelo método AHP foram encontrados 8.131 itens.
- Na base inicial foram encontrados 38.426 itens classificados com X, a criticidade total encontrada está entre 0,14 e 0,296605 com 31.200 materiais.

Os resultados obtidos pela árvore de decisão mostra uma interposição de faixas, se comparada à classificação inicial da base de dados. Vale destacar nessa etapa a grande variação existente entre os valores máximos e mínimos. Os itens X possuem a maior criticidade total de 0,29, enquanto o maior valor dos itens Y é 0,50, e o item Z com 0,55. Esse fato é decorrente do maior número de parâmetros avaliados para classificação X, Y e Z. A organização considerava apenas impactos relacionados à perda de produção e ao tempo necessário de manutenção apenas de forma qualitativa. Na metodologia AHP foram utilizados três critérios (operação, manutenção e suprimentos) e 14 subcritérios analisados nas três aberturas VED, para calcular o benefício final. A organização mantém apenas três itens classificados como Z e o método AHP teve como resultado de maior criticidade um item classificado como Z.

Devido à interposição de valores foi realizada uma análise com os dois valores mais elevados de criticidade, que são 0,556448, com apenas um item Z, e a criticidade 0,506972, com oito itens, todos classificados como Y. Esses itens foram avaliados e todos apresentam importância para o processo produtivo quanto os itens Z da organização. Por critérios internos a organização decidiu deixar apenas três materiais classificados como Z e um fator muito significativo na decisão foram falhas ocorridas após a instalação e operação do processo, critério que não pode ser mensurado previamente antes da operação dos equipamentos. O fato de destaque é que todos os outros materiais com maiores criticidades possuem potencial de impacto no processo produtivo muito próximo aos itens classificados como Z. Vale destacar que a frequência de falha pode ser decorrente de diversos aspectos como tipo de manutenções realizadas, modo de operação, falhas de montagem, erros de projeto, dentre diversas outras que não permitem a padronização para análise de forma consistente.

A frequência de falhas é um ponto de análise que precisa de dados históricos que são excluídos da árvore de decisão, pois o apoio à decisão do modelo é anterior à estocagem dos materiais. Desconsiderando a frequência de falha, todos os outros itens poderiam ser classificados como Z. Outro ponto de destaque é que a classificação da organização não considera nenhum critério de suprimentos. Essas análises nos permitem concluir que os pesos e critérios utilizados são aplicáveis ao processo mineral com estocagem em local único e que a atual classificação foi melhorada. Caso os resultados após aplicação do método AHP fossem idênticos à atual classificação, bastaria manter a categorização atual dos itens.

A tabela 5.17 detalha os benefícios máximos e mínimos encontrados nos critérios de operação, manutenção e suprimentos, com valores arredondados até a terceira casa decimal com a classificação X, Y, Z da organização. Todos três itens Z serão apresentados.

Criticidade XYZ	Criticidade AHP	Operação	Manutenção	Suprimentos
Z	Máxima	0,330	0,176	0,491
Z	Mínima	0,228	0,148	0,055
Z	Mínima	0,228	0,148	0,055
Y	Máxima	0,275	0,177	0,063
Y	Mínima	0,111	0,043	0,016
X	Máxima	0,194	0,067	0,036
X	Mínima	0,081	0,043	0,015

Tabela 5.17 – Criticidade máxima e mínima encontrados no método AHP

A criticidade total do item é um bom parâmetro de avaliação e de suporte a decisão, mas o mesmo valor pode ser considerado como o benefício de se estocar o item e o espaço de estocagem como uma mochila que comporta um número limitado onde em cada item se toma a decisão de estocar ou não. Como esta pesquisa trabalha com um conjunto de 40.002 peças sobressalentes, se torna muito complicado analisar a inclusão de um novo item. Pode haver situações em que o benefício total é elevado e a organização não possui mais recursos financeiros para imobilizar em estoque, o que demanda a necessidade de retirar outros materiais de estoque ou vender alguns itens para adequar a situação financeira. Para atender essa e outras possíveis demandas, foi construído um modelo baseado no problema da mochila, que retorna o valor otimizado da melhor combinação de itens.

Capítulo 6

Desenvolvimento do modelo linear

6.1. Desenvolvimento do modelo de programação linear inteira

O estudo de caso foi realizado em uma empresa de beneficiamento mineral. O modelo produtivo adotado é contínuo e opera em regime de 24 horas diárias. Nesse cenário produtivo é fundamental a existência de uma cadeia logística consolidada que suporte as flutuações de demanda de insumos, energia, materiais e demais recursos para a operação da empresa e consequentemente formação de estoques estratégicos.

A organização mantém estoques de insumos usados diretamente no processo produtivo, bem como de materiais MRO (manutenção, reparo e operação), com o intuito de reduzir os potenciais riscos de falta de abastecimento e disponibilidade da planta operacional. Nessa etapa o foco é direcionado ao estoque de materiais MRO e a aplicação de um PPL no mesmo.

No problema de estocagem de materiais MRO, apresentam-se n materiais a serem escolhidos, e quanto mais itens forem estocados, melhor será o nível de serviço. Como se trata de programação multiobjetivo o valor de cada item estocado aumenta o valor estocado. A cada novo item ocorre um incremento no valor. Por outro lado, a gestão de materiais e a logística visam a minimização dos valores de estoques, utilizam ferramentas como lote econômico de compras, compra sobre demanda, entrega programada, dentre outras. Dessa forma o modelo linear desenvolvido deve maximizar o número de peças estocadas, com o melhor benefício possível, minimizando os valores estocados.

O problema de otimização proposto, seus objetivos e restrições, podem ser traduzidos nos seguintes modelos baseados no problema da mochila, onde b_j representa o benefício de se estocar o item que recebe o valor de criticidade obtido na árvore AHP; r_j o valor imobilizado em reais para estocagem de cada item; x_j a variável binária que assume 1, caso o item deva ser incluído em estoque e 0 caso contrário; R_{disp} representa o valor em reais disponível pela organização para inserir peças sobressalentes em estoques; e B_{disp} o benefício mínimo desejado inserido pelo tomador de decisão. O modelo de maximização de benefício estocada é

dados pelas Equações de (6.1) a (6.4) e o modelo de minimização de recursos disponibilizados pelas Equações de (6.5) a (6.8), o modelo conflitante pelas Equações (6.9) a (6.14).

Abaixo serão apresentados os modelos.

Modelo de maximização de benefício estocado:

$$MAX f o' = \sum_{j=1}^n b_j * x_j \quad (6.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n r_j * x_j \leq Rdisp \quad (6.2)$$

$$x_j = 1 \quad \forall j \in N; N \text{ conjunto de itens críticos} \quad (6.3)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j = 1,2,3, \dots n \quad (6.4)$$

Modelo de minimização de recursos disponibilizados em reais:

$$MIN f o'' = \sum_{j=1}^n r_j * x_j \quad (6.5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n b_j * x_j \geq Bdisp \quad (6.6)$$

$$x_j = 1 \quad \forall j \in N; N \text{ conjunto de itens críticos} \quad (6.7)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j = 1,2,3, \dots n \quad (6.8)$$

Modelo conflitante onde se deseja estocar o máximo de itens com o mínimo de recursos financeiros imobilizados:

$$MAX f o' = \sum_{j=1}^n b_j * x_j \quad (6.9)$$

$$MIN f o'' = \sum_{j=1}^n r_j * x_j \quad (6.10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n r_j * x_j \leq Rdisp \quad (6.11)$$

$$\sum_{j=1}^n b_j * x_j \geq Bdisp \quad (6.12)$$

$$x_j = 1 \quad \forall j \in N; N \text{ conjunto de itens críticos} \quad (6.13)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j = 1,2,3, \dots n \quad (6.14)$$

O modelo desenvolvido para aplicação da restrição ϵ foi baseado no de maximização de benefício, pois os tomadores de decisão trabalham rotineiramente com essa variável, o que facilita sua quantificação e noção de aplicação. Caso fosse utilizada a função objetivo de minimização, seria necessário inserir um valor inicial de benefício desejado para evitar que se estocassem apenas os três itens com obrigatoriedade de estocagem pela organização. Esse valor não seria facilmente encontrado pelo desconhecimento desse parâmetro pelos gestores.

Para proporcionar a resolução do problema, será utilizada a metodologia da restrição ϵ , onde é utilizado um processo iterativo, sendo geradas diversas soluções submetidas às mesmas restrições para construção da curva Pareto Ótima. O sinal menor igual é aplicado para construção da curva na modelagem onde a função objetivo é de maximização e o sinal maior igual caso contrário. Como o objetivo principal é estocar o máximo de itens, a restrição interativa será com o sinal de menor ou igual referente a valor estocado. Esse processo é representado pela equação 14 do modelo abaixo.

A restrição interativa é utilizada para apresentar os possíveis cenários da solução do problema. Nesse caso se consegue avaliar quais os valores imobilizados em estoque, qual a quantidade de peças estocadas e qual o benefício dessa quantidade de materiais estocados para cada cenário.

Dessa forma a função objetivo de minimização será utilizada para desenvolver a restrição iterativa ϵ . O modelo é apresentado nas Equações de (6.15) a (6.19).

$$MIN f o'' = \sum_{j=1}^n r_j * x_j \quad (6.15)$$

Modelo com restrição ϵ :

$$MAX f o' = \sum_{j=1}^n b_j * x_j \quad (6.16)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n r_j * x_j \leq \epsilon_k \quad (6.17)$$

$$x_j = 1 \quad \forall j \in N; N \text{ conjunto de itens críticos} \quad (6.18)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j = 1,2,3, \dots n \quad (6.19)$$

Onde:

O contador k representa a quantidade de pontos desejáveis na curva Pareto Ótima, ou seja, quantidade de iterações realizadas.

Nesse modelo $\epsilon_k = Rdisp$ em cada iteração, servindo de limitador para impedir que todos os itens sejam estocados.

Na equação 6.16 tem-se a função objetivo de maximização de benefício, onde o material x_j é antecedido pelo valor da criticidade calculado na árvore de decisão após aplicação do método de classificação baseado no AHP. A equação 6.15 mostra a outra função objetivo que representa o objetivo de minimizar os valores estocados. Na equação 6.17 há a restrição de valor imposta pela organização. Ao pensar na função de maximização todos os materiais serão estocados. Por outro lado, a de minimização deseja que nenhum material seja estocado. Essa peculiaridade característica é o problema como multiobjetivo.

Capítulo 7

Modelo de suporte à tomada de decisão

7.1. Fluxo do modelo de suporte à tomada de decisão

O modelo de suporte à tomada de decisão foi baseado em diversos métodos relacionados a materiais MRO encontrados na literatura, como Suryadi (2007), Stoll *et al* (2015), Braglia (2004), Bošnjaković (2010) e Roda *et al* (2014).

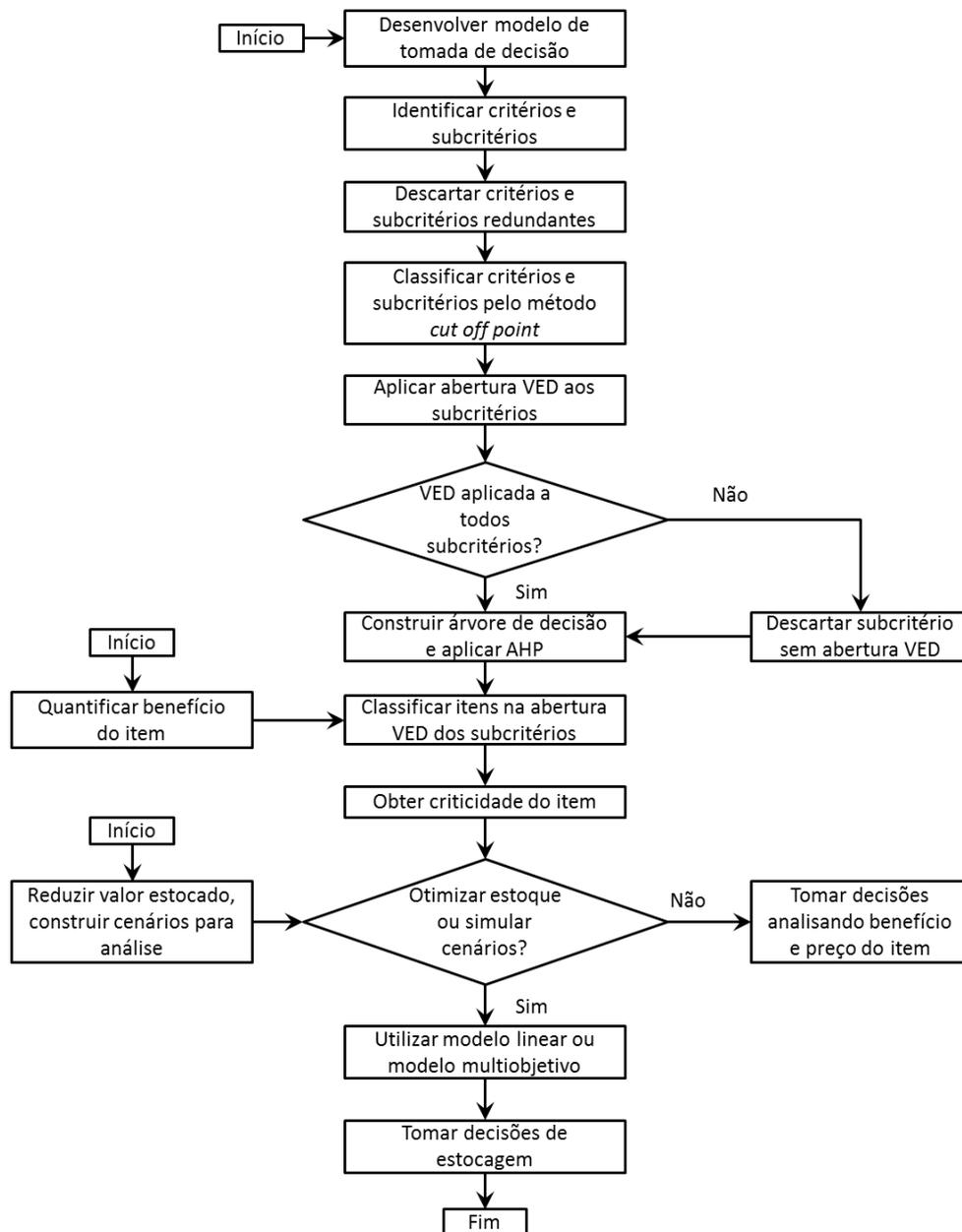


Figura 7.1 – Fluxo do modelo de suporte à tomada de decisão

O fluxo mostrado na Figura 7.1 apresenta as etapas da metodologia seguida para desenvolver o modelo de suporte à decisão deste trabalho, sendo aplicada no caso de desenvolvimento de um novo modelo de suporte à tomada de decisão, quantificação da importância de determinado item, otimização direta pelo valor estabelecido pela organização e simulação de diversos cenários por hipóteses desejadas pelo tomador de decisão.

7.2. Simulação e resultados do modelo de tomada de decisão

O modelo proposto foi implementado no programa AMPL, utilizando o otimizador CPLEX 12.5 para execução e obtenção da resposta ótima e da curva Pareto Ótima. Para execução do modelo foram simuladas diversas situações de inclusão de materiais em estoque, detalhadas em cada cenário. Nessa etapa não foi realizada a classificação do item pela árvore AHP. Os valores de benefício (criticidade) e preços foram escolhidos conforme as possibilidades de utilização do modelo e tendo como base os valores encontrados após a aplicação do método AHP. Os preços dos materiais inseridos no modelo são referentes ao total de materiais estocados sob o mesmo código, pois esse é o volume utilizado para o atendimento interno da organização.

Algumas situações não precisam ser simuladas com a aplicação do modelo de otimização. Apesar de ser útil para aplicação do modelo de classificação das criticidades pela árvore de decisão, estes cenários serão todos abordados no cenário 1. Os outros cenários utilizam o modelo linear de otimização e o modelo multiobjetivo de otimização.

7.3. Simulação do Cenário 1

Neste cenário serão tomadas decisões baseadas nas análises de benefício e preço sem utilização dos modelos de otimização. Os itens atualmente estocados na organização apresentam o menor valor de criticidade de 0,14. Deseja-se inserir um novo item em estoque e o mesmo possui um valor inferior a 0,14 e não pode ser elevado o valor imobilizado em estoque. Nesse contexto não existe a necessidade de realizar qualquer outra avaliação. Como a criticidade do novo item é inferior aos itens já estocados, o mesmo não deve ser inserido em estoque.

Outra possibilidade é o item possuir a criticidade igual a 0,14 com o valor do material em reais superior aos demais itens com mesma pontuação já em estoque, o que indica a não necessidade de estocagem do novo material por não existir a possibilidade de aumentar o valor estocado.

O cenário seguinte considera a inclusão do item com a mesma criticidade, ou seja, 0,14 dos menores itens estocados e o preço do material ser menor que o menor valor dos itens com menores benefícios. Nesse caso, pode se tomar a decisão de retirar o item de maior preço ou o de menor movimentação em determinado período ou até mesmo não estocar o novo item.

Finalizando o cenário, simula-se a situação onde o novo item possui a mesma criticidade de 0,14 encontrada pelo método AHP e preço dentro da faixa de itens como mesma criticidade. Esse cenário nos leva à tomada das seguintes decisões: caso tenha valor disponível para estocar um novo item, o material pode ser inserido em estoque; caso não tenha disponibilidade de recursos, a retirada de qualquer item com preço maior pode acontecer, e, por último, a não inclusão do novo material em estoque.

O cenário 1 simulou várias situações no limite inferior de criticidade dos itens estocados, sem a necessidade de execução do modelo de otimização de suporte a decisão. Apenas com análises diretas é possível tomar ações consistentes de forma rápida e objetiva.

7.4. Simulação do Cenário 2

O cenário 2 considera o novo item com criticidade calculada pelo método AHP, que representa o benefício do problema da mochila, superior ao menor benefício estocado. Na base de dados o menor benefício é 0,14, e para o novo item foi considerado o benefício médio de todos os itens da base, que equivale a 0,16651. O preço desse item pode ser menor, maior ou igual a dos materiais já estocados. Independentemente do valor a decisão de inserir esse item na base ou não sem aumentar o valor de estoque deve ser tomada. Nessa situação qual item deve ser retirado para maximizar o benefício em estoque, mantendo os valores de estoque? A otimização nos permite encontrar o resultado de maneira rápida e segura. Para efeitos de testes o preço atribuído ao novo item foi obtido com a média dos valores dos itens estocados. A Tabela 7.1 mostra os resultados encontrados após a execução do modelo de tomada de decisão com a utilização do modelo linear de otimização.

Item	Tipo	Benefício	Preço (R\$)	Resultado
42003	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar
32726	Antigo	0,14156	12.831,00	Retirar do estoque

Tabela 7.1 – Resultado simulação cenário 2

O resultado do modelo informa se o novo item deve ser estocado e, nesse caso, qual peça de reposição é retirada para maximizar o benefício dos itens estocados sem ultrapassar o

atual valor mantido em estoque. Nesse cenário, o benefício aumentou em 0,025, mantendo o valor de estoque.

7.5. Simulação do Cenário 3

A análise simultânea de diversos itens para inclusão em estoque pode acontecer. Nesse caso a análise é feita para mais de um item e deve ser respeitado o valor de estoque atual da organização, cenário que utiliza o modelo linear de otimização após a quantificação do benefício do item. A simulação constou com teste baseado na inclusão de 20 novos itens. Para encontrar o valor do benefício e o preço de cada item foi aplicada a média na base de dados em quatro grupos. Os dados da base estavam organizados em forma decrescente da criticidade X, Y, Z, sendo cinco materiais novos com a média de valores dos itens de 0 a 13.334, outros cinco com a média dos itens de 13.335 a 26.668, e outros cinco com a média dos itens de 26.669 a 40.002. Os outros cinco itens foram mantidos os valores da média de todos os itens da base. Como existem 40.002 materiais já inseridos em estoque, a numeração dos novos itens é de 40.003 a 40.022.

Item	Tipo	Benefício	Preço (R\$)	Resultado
42003	Novo	0,2111	6.891,62	Estocar
42004	Novo	0,2111	6.891,62	Estocar
42005	Novo	0,2111	6.891,62	Estocar
42006	Novo	0,2111	6.891,62	Estocar
42007	Novo	0,2111	6.891,62	Estocar
42008	Novo	0,1472	7.211,21	Estocar
42009	Novo	0,1472	7.211,21	Estocar
42010	Novo	0,1472	7.211,21	Estocar
42011	Novo	0,1472	7.211,21	Estocar
42012	Novo	0,1472	7.211,21	Estocar
42013	Novo	0,1413	935,88	Estocar
42014	Novo	0,1413	935,88	Estocar
42015	Novo	0,1413	935,88	Estocar
42016	Novo	0,1413	935,88	Estocar
42017	Novo	0,1413	935,88	Estocar
42018	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar
42019	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar

42020	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar
42021	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar
42022	Novo	0,16651	5.012,90	Estocar
23409	Antigo	0,14449	312.022,32	Retirar do estoque

Tabela 7.2 – Resultado simulação cenário 3

A simulação do modelo de otimização conseguiu estocar todos os 20 itens novos com um benefício total de 6.663,40 contra um benefício anterior de 6.660,60. O valor estocado teve uma redução de R\$ 211 mil e o item retirado é classificado com X pela organização. Pelo benefício simulado nos novos itens, pelo menos cinco deles seriam classificados como Y. O material retirado é referente a uma peça sobressalente utilizado na maioria das vezes em paradas planejadas e possuem um valor elevado de custos para manutenção em estoque.

7.6. Simulação do Cenário 4

Neste cenário foi utilizado novamente o modelo linear de otimização. Foram mantidas as mesmas regras aplicadas na simulação do cenário 3. Como na base existem itens com preço superior a R\$ 1,5 milhão, os preços dos novos itens foram ajustados a R\$ 1,3 milhão para testar se algum novo item deixa de ser estocado. Para facilitar a avaliação todos os novos itens receberam o menor benefício dos materiais em estoque, ou seja, 0,14. Tem-se 40.002 materiais já inseridos em estoque. A numeração dos novos itens está entre 40.003 a 40.022.

Item	Tipo	Benefício	Preço (R\$)	Resultado
42003	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42004	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42005	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42006	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42007	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42008	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42009	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42010	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42011	Novo	0,14	1.325.000,00	Estocar
42012	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42013	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42014	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar

42015	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42016	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42017	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42018	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42019	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42020	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42021	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
42022	Novo	0,14	1.325.000,00	Não estocar
9774	Antigo	0,160812	2.151.178,84	Retirar do estoque
9775	Antigo	0,160812	2.234.174,96	Retirar do estoque
9785	Antigo	0,160812	2.609.612,27	Retirar do estoque
14116	Antigo	0,153112	1.902.403,02	Retirar do estoque
20309	Antigo	0,146061	1.677.900,00	Retirar do estoque
20481	Antigo	0,146061	1.816.080,00	Retirar do estoque

Tabela 7.3 – Resultado simulação cenário 4

A simulação permitiu uma redução de aproximadamente R\$ 460 mil e obteve um benefício total de 6.660,94 contra um benefício anterior de 6.660,60. Dos 20 novos materiais que se desejava estocar, nove foram incluídos em estoque, 11 não foram estocados e foram retiradas seis peças sobressalentes de estoque, todas classificadas com X na base de dados.

7.7. Simulação do Cenário 5

Na rotina de gestão de estoque de peças sobressalentes podem ocorrer situações onde é necessário reduzir o valor total de estoque, fato que pode ser demandado para melhorar o capital da empresa, atingir meta de redução de custos, adequação ao cenário econômico ou organizacional. O tempo dedicado a identificação de quais materiais retirar pode demorar muito tempo e permitir erros de manipulação e análise de dados. O modelo de tomada de decisão desenvolvido com base nas criticidades encontradas pelo método AHP retorna os itens que são mais indicados para retirada dos estoques com a utilização do modelo linear de otimização. Posteriormente, o tomador de decisão pode analisar o resultado e acatar ou não a resposta do otimizador. Caso deseje manter algum dos itens em estoque e solicitar uma nova otimização, basta inserir esse item no modelo com valor igual a 1, que significa itens mantidos em estoque. Será realizada uma nova otimização e outros itens serão apresentados

ao tomador de decisão. O processo pode ser repetido até que se alcance o mix de itens julgados mais adequados.

O cenário simulou uma redução de valor de estoque em 5% e foram encontrados os seguintes resultados.

Tipo	Valor estocado (R\$)	Benefício	Quantidade de itens	Resultado
Base	200,5 milhões	6.660,60	40.002	200,5 milhões
Cenário	190,5 milhões	6.659,82	39.997	190,5 milhões

Tabela 7.4 – Resultado simulação cenário 5

Os itens sugeridos para retirada de estoque são classificados como X e replicam em sua maioria os itens que devem ser retirados dos estoques no cenário 4, conforme Tabela 7.5.

Item	Tipo	Benefício	Preço (R\$)	Resultado
9774	Antigo	0,160812	2.151.178,84	Retirar do estoque
9775	Antigo	0,160812	2.234.174,96	Retirar do estoque
9785	Antigo	0,160812	2.609.612,27	Retirar do estoque
14116	Antigo	0,153112	1.902.403,02	Retirar do estoque
20481	Antigo	0,146061	1.816.080,00	Retirar do estoque
20309	Antigo	0,146061	1.677.900,00	Manter no estoque

Tabela 7.5 – Resultado simulação cenário 5 detalhado

O único item que não foi repetido é o item 20.309, mas o mesmo apresenta um valor inferior ao item 20.481, o que torna o valor de estoque cerca de R\$ 130 mil menor e, conseqüentemente, melhor para a organização.

7.8. Simulação do Cenário 6

A última simulação representa o caso de aplicação da curva Pareto Ótima com a utilização do modelo multiobjetivo de tomada de decisão, que apresenta diversos cenários de forma iterativa, onde cada iteração representa uma nova situação de valor limite para estocagem, encontrado pela metodologia da restrição ϵ que torna a função objetivo de minimização de valor como limitador de valor e o modelo retorna com a quantidade de itens estocados e o benefício. Esse tipo de aplicação se torna útil quando o tomador de decisão deseja visualizar mais de uma alternativa. Para exemplificação e obtenção dos resultados o modelo foi executado para obtenção de 25 pontos na curva Pareto Ótima.

A tabela 7.7 apresenta os resultados obtidos para o cenário onde se deseja 25 cenários distintos. A cada iteração foi disponibilizado o mesmo valor para inclusão de novos itens em estoque e fica claro que nos primeiros cenários existe um grande crescimento de benefício e posteriormente o benefício com a inclusão de novos itens não é relevante. A primeira iteração representa o mínimo de valor possível a ser estocado, onde são inseridos apenas os itens classificados com criticidade Z pela organização e devem obrigatoriamente permanecer em estoque, o que representa o ótimo da função objetivo de minimização. Por outro lado, o último cenário apresenta o valor ótimo da função objetivo de maximização. O restante dos pontos são obtidos pela limitação de valor por meio da restrição iterativa.

	Iteração	Benefício	% Benefício	R\$ Estocado	% R\$ Estocado	Qtd Itens	% Qtd Itens
Min benefício	1	1,42	0,02%	R\$ 130.442,00	0,07%	3	0,01%
Restrição €	2	4.521,67	67,89%	R\$ 8.481.810,00	4,23%	27.451	68,62%
Restrição €	3	5.128,94	77,00%	R\$ 16.831.600,00	8,39%	30.961	77,40%
Restrição €	4	5.472,94	82,17%	R\$ 25.182.200,00	12,56%	32.956	82,39%
Restrição €	5	5.721,20	85,90%	R\$ 33.532.800,00	16,72%	34.329	85,82%
Restrição €	6	5.893,28	88,48%	R\$ 41.883.400,00	20,89%	35.383	88,45%
Restrição €	7	6.032,57	90,57%	R\$ 50.233.500,00	25,05%	36.184	90,46%
Restrição €	8	6.147,31	92,29%	R\$ 58.584.300,00	29,22%	36.872	92,18%
Restrição €	9	6.249,99	93,84%	R\$ 66.935.300,00	33,38%	37.439	93,59%
Restrição €	10	6.319,13	94,87%	R\$ 75.285.900,00	37,54%	37.894	94,73%
Restrição €	11	6.385,02	95,86%	R\$ 83.636.100,00	41,71%	38.292	95,73%
Restrição €	12	6.440,77	96,70%	R\$ 91.986.600,00	45,87%	38.629	96,57%
Restrição €	13	6.488,54	97,42%	R\$ 100.337.000,00	50,04%	38.927	97,31%
Restrição €	14	6.529,96	98,04%	R\$ 108.688.000,00	54,20%	39.185	97,96%
Restrição €	15	6.565,65	98,57%	R\$ 117.035.000,00	58,36%	39.414	98,53%
Restrição €	16	6.595,39	99,02%	R\$ 125.389.000,00	62,53%	39.598	98,99%
Restrição €	17	6.616,58	99,34%	R\$ 133.716.000,00	66,68%	39.725	99,31%
Restrição €	18	6.631,61	99,56%	R\$ 142.064.000,00	70,85%	39.817	99,54%
Restrição €	19	6.642,41	99,73%	R\$ 150.355.000,00	74,98%	39.884	99,71%
Restrição €	20	6.649,61	99,83%	R\$ 158.680.000,00	79,13%	39.930	99,82%
Restrição €	21	6.654,52	99,91%	R\$ 167.110.000,00	83,34%	39.962	99,90%
Restrição €	22	6.657,25	99,95%	R\$ 175.020.000,00	87,28%	39.980	99,95%
Restrição €	23	6.659,05	99,98%	R\$ 183.583.000,00	91,55%	39.992	99,98%
Restrição €	24	6.659,98	99,99%	R\$ 191.715.000,00	95,61%	39.998	99,99%
Max benefício	25	6.660,60	100,00%	R\$ 200.526.000,00	100,00%	40.002	100,00%

Tabela 7.6 – Resultado simulação cenário 6

Com os dados de cada iteração é possível realizar análises relevantes que anteriormente não poderiam ser verificadas com a tomada de decisão humana. Por exemplo, ao detalhar o resultado da iteração 19, foram retirados materiais classificados com criticidade

X pela organização, ou seja, sem impacto no processo produtivo, todos sem consumo nos últimos 12 meses, o que destaca a não necessidade da estocagem desses itens. Os materiais apresentavam aquisição difícil, o que pode ter levado à inclusão em estoque. Caso esse cenário fosse aplicado, a organização apresentaria uma redução no valor de estoque de R\$ 50 milhões aproximadamente. Esse valor aplicado a taxa Selic de 1,06% ao mês, exigível a partir de dezembro de 2015 segundo a Receita Federal do Brasil (<http://www.idg.receita.fazenda.gov>), renderiam R\$ 530.000,00 ao mês à organização. Esse valor deixaria de se desvalorizar em materiais estocados sem necessidade e poderiam ser investidos em demandas adequadas à necessidade organizacional, ou seja, o custo do dinheiro no tempo é muito elevado.

Na figura 7.2, itens estocados x benefício, acompanhou-se a evolução do benefício total estocado a cada iteração. A inclinação da curva de benefício é muito acentuada no início das iterações, fato que representa a inclusão de itens com benefícios maiores nas etapas iniciais de otimização. Ao final são inseridos materiais com criticidades menores, o que causa a suavização da curva. Na primeira iteração são inseridos apenas os itens classificados como Z e que, segundo a organização, devem ser mantidos em estoque.

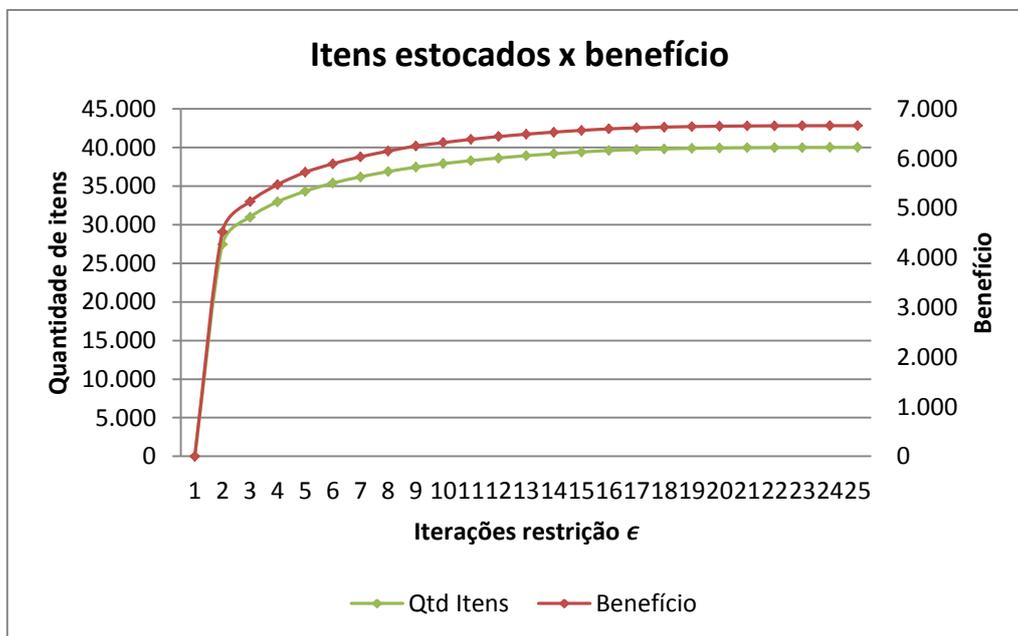


Figura 7.2 – Itens estocados e benefício por iteração

A Figura 7.2 apresenta a evolução do benefício estocado juntamente com os valores de cada iteração. Os valores são traçados em uma reta pelo fato de o preço dos itens serem utilizados como fator limitador do processo iterativo, sendo incrementado igualmente em

valor em cada ponto da curva Pareto Ótima. No eixo horizontal é apresentada a quantidade de itens estocados. Um detalhe interessante neste gráfico é que acima de R\$ 150 milhões não ocorre uma evolução significativa em benefício final dos itens estocados.

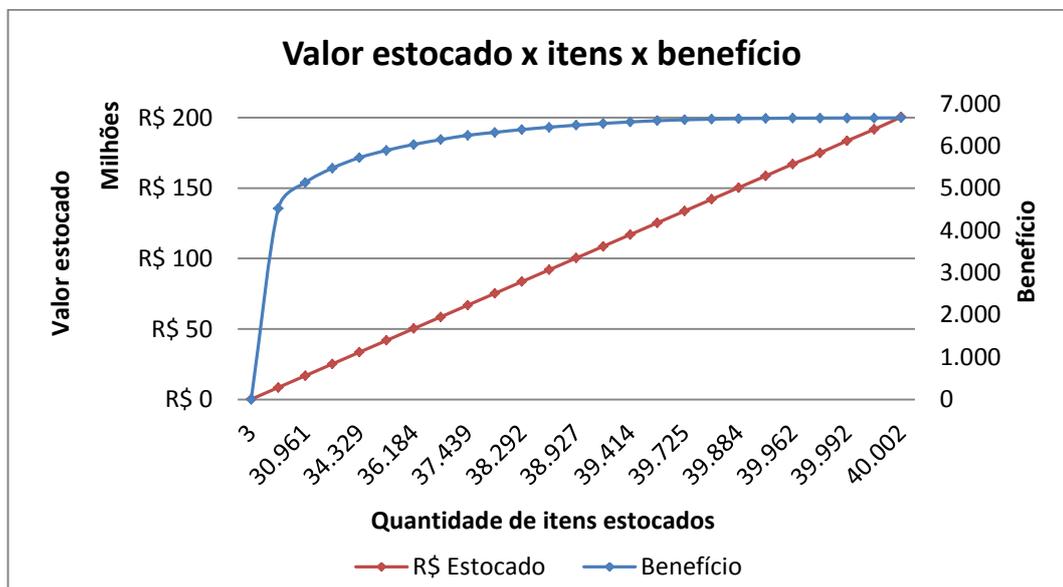


Figura 7.3 – Valor estocado, quantidades de itens e benefício por iteração

A Figura 7.3 apresenta as iterações com os respectivos valores de cada variável do modelo, detalhando todas as curvas Pareto Ótimas para uma visualização global, o que permite ao tomador de decisão direcionar melhor seus esforços.

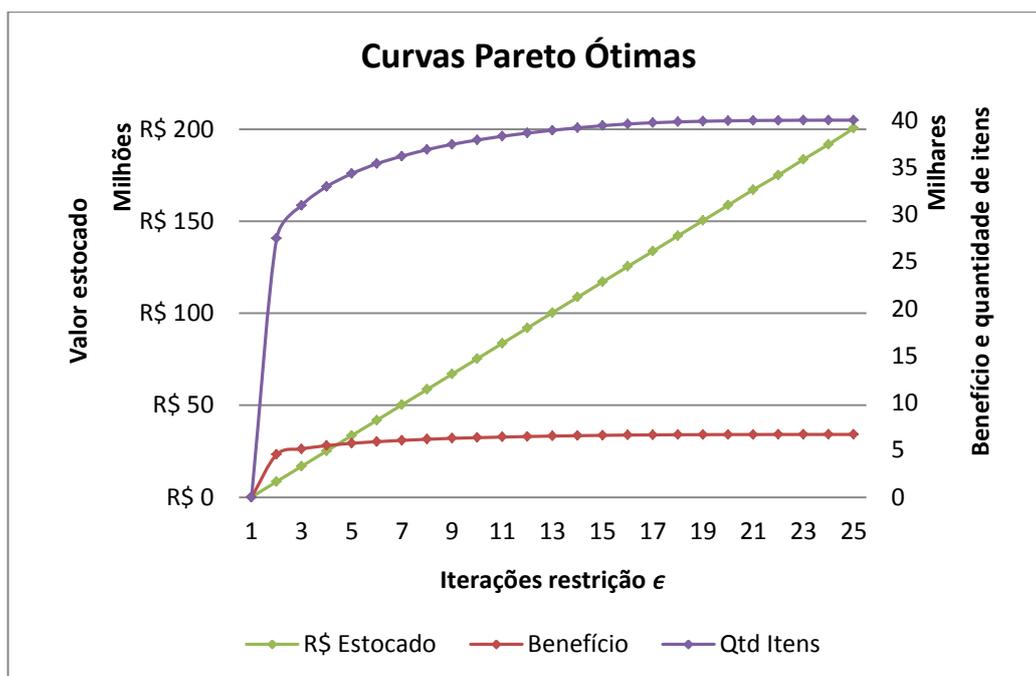


Figura 7.4 – Valor estocado, benefício e quantidade de itens por iteração

As simulações e os resultados obtidos em cada cenário mostram as diversas possibilidades de aplicação dos modelos de tomada de decisão desenvolvidos.

Capítulo 8

Resultados

8.1. Análises dos resultados

Neste estudo foi desenvolvida uma metodologia para suporte a tomada de decisão de estocagem de materiais MRO, contemplando técnicas de classificação de itens baseadas no método AHP, técnicas de abertura dos níveis de análise com a aplicação do VED, seleção de subcritérios pelo *cut off point*, desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira e aplicação do método da restrição ϵ para obtenção da curva Pareto Ótima.

Foram implantados três modelos, sendo um para classificação dos itens, outro para otimização simples e um terceiro para a curva Pareto Ótima. No primeiro modelo, a criticidade dos itens estocados é obtida percorrendo as aberturas dos três principais setores envolvidos com materiais MRO, os clientes internos de operação e manutenção e o gestor dos armazéns e logística de materiais o setor suprimentos que tem como objetivo atender as demandas internas com qualidade, prazo e minimizando os custos envolvidos. Esse processo é realizado com a utilização das técnicas *cut off point*, VED e AHP. O segundo modelo é representado pelo problema da mochila, onde a criticidade encontrada é considerada como benefício, justamente pelo fato da neutralidade desse risco ao se estocar o material. Esse modelo foi baseado em um problema linear de programação inteira, onde as variáveis são obrigadas a assumir os valores 0 ou 1. O terceiro modelo utilizou a metodologia iterativa da restrição ϵ da programação multiobjetivo para traçar diversos cenários, onde se utiliza os objetivos conflitantes entre os objetivos. No caso de materiais MRO, deseja-se possuir estoques para mitigar os riscos da operação, mas esse processo aumenta o valor dos estoques a cada peça estocada. Como esses materiais têm a característica de baixo giro, a atuação dos gestores de estoques é trabalhar na tentativa de minimizar os valores estocados, com estratégias como lote econômico, compra sob demanda, contratos de fornecimento, dentre outras, o que caracteriza o *trade off* dos estoques, porque nenhuma organização deseja manter dinheiro parado em materiais que são pouco utilizados.

Os critérios e subcritérios relacionados à decisão de estocagem foram identificados na revisão de literatura e baseados nos estudos de Suryadi (2003), Suryadi (2007), Botter e

Fortuin (2000), Stoll *et al* (2015), Braglia (2004) e Bošnjaković (2010), onde foram identificados mais de 50 critérios e subcritérios, dos quais restaram três critérios e 19 subcritérios sem necessidade de dados históricos. Os três critérios de decisão (manutenção, operação e suprimentos) foram aplicados no modelo desenvolvido por caracterizarem as três áreas de atuação nos materiais MRO. Os 19 subcritérios foram submetidos a uma pesquisa de classificação pelos especialistas da organização juntamente com dois novos critérios sugeridos e posteriormente os resultados foram tabulados e quantificados com a metodologia *cut off point*, que trabalha com uma nota de corte de 2,3 para aceitação do critério ou exclusão. Com os resultados, foram mantidos 14 subcritérios para construção da árvore de decisão, o que permitiu selecionar critérios e subcritérios aplicáveis ao processo de beneficiamento mineral.

O desenvolvimento do modelo de tomada de decisão multicritério foi atingido inicialmente com a aplicação do método AHP, onde a árvore de classificação teve seus pesos obtidos pelo *software* Super Decision, desenvolvido por Tomás Saaty, criador da metodologia de Análise Hierárquica de Processos. Antes de inserir e classificar os itens nessa base, os subcritérios selecionados foram divididos em classes adequadas à classificação VED (vital, essencial e desejável). Cada elemento da base de dados foi classificado em uma das três aberturas dos subcritérios para posteriormente ser realizado o processo de quantificação da criticidade dos itens. Com a quantificação da criticidade foi possível aplicar os critérios e subcritérios compatíveis ao modelo desenvolvido. No segundo momento, com a criticidade já encontrada, foram detalhadas as possibilidades de tomada de decisão apenas com o valor encontrado, o que nos permite concluir que as decisões são possíveis de serem tomadas, mas com restrições quanto à sua otimalidade, visto que as análises são feitas de forma pontual pelo tomador de decisão, que na maioria dos casos não consegue analisar todas as possibilidades. A aplicação dos critérios e subcritérios foram realizadas e demandou um longo esforço de manipulação, classificação e extração de dados.

Por meio da aplicação do método AHP foi possível calcular a criticidade de cada material utilizado pela organização. Esse processo permitiu um melhor detalhamento dos critérios e subcritérios significativos para tomada de decisão de quais itens devem ser estocados. A abertura dos itens na escala VED (vital, essencial e desejável) foi construída com dados e faixas de classificação obtidas diretamente do sistema ERP da empresa. Nos casos de informações não contidas no sistema, foram respeitadas as regras contidas nos

manuais de manutenção e suprimentos que contemplam a visão da operação para materiais MRO para classificação das aberturas na base de dados sendo subsidiada por especialistas.

Com a quantificação da criticidade dos itens pelo método AHP, VED, *Cut off point*, foi possível tornar a tomada de decisão puramente quantitativa caso seja de interesse do tomador de decisão, mas permite também que os resultados sejam criticados e novamente otimizados posteriormente, conforme decisão dos gestores. Esse fato torna o processo decisório muito mais dinâmico, eficiente e objetivo. As análises quantitativas podem ser realizadas pelos especialistas e servem como forma de verificação dos resultados do otimizador. Vale ressaltar que a correta classificação dos itens em todas aberturas é fundamental para a correta resposta do modelo multiobjetivo.

Tendo em vista a dificuldade de decisão de todo o conjunto de dados pelo gestor, foi desenvolvido um modelo linear de otimização inteira, onde as variáveis devem assumir valores inteiros, 0 ou 1, para que a resposta de inclusão do item fosse ótima dentro de todas as combinações possíveis. O modelo de otimização teve como princípio o problema da mochila, onde deseja-se levar objetos na mochila que possui capacidade limitada e cada objeto possui seu benefício. Esse modelo foi ampliado para o *trade off*, custo x benefício, das peças a serem estocadas, com dois objetivos conflitantes – maximizar os benefícios e minimizar os custos. A construção desse modelo multiobjetivo foi possível com a aplicação da metodologia da restrição ϵ , onde uma das funções contraditórias, no caso deste estudo, a de minimização de custo, passa a ser utilizada como limitador interno do otimizador em cada processo iterativo. A construção do modelo teve como base dois parâmetros: a criticidade calculada pela árvore de classificação do método AHP e o preço. No modelo de otimização a criticidade da peça é considerada como benefício ao inserir a mesma nos estoques, visto que o risco de indisponibilidade produtiva é minimizado devido à disponibilidade do material de forma imediata.

A construção desses modelos para classificação com base no método AHP, bem como os de programação linear inteira, nos permite concluir que o modelo multicritério de tomada de decisão foi desenvolvido de forma satisfatória e embasado em conhecimentos científicos encontrados na literatura pesquisada.

A identificação dos itens que devem ser estocados pode ser tomada diretamente pelo tomador de decisão levando em consideração a criticidade encontrada pela árvore de decisão e outros pontos que o mesmo julgar importante. Outra forma de decidir é limitar o valor

máximo de estoque e executar o otimizador que garante o melhor mix de itens que maximizam o benefício, ou ainda utilizar os especialistas da empresa para verificar e analisar de forma crítica o resultado ou até mesmo a classificação dos itens. Foram realizadas diversas simulações utilizando os modelos lineares, nos quais foram identificados os itens que deveriam ser inseridos e retirados do estoque. As simulações utilizaram itens criados com base nos valores de criticidade obtidos pelo método AHP. As simulações se mostraram eficazes na identificação dos itens a serem estocados e retirados, com tempo de processamento em cada cenário inferior a 1 segundo.

Os modelos de tomada de decisão foram aplicados a base de dados em todos os modelos desenvolvidos, o que permitiu a classificação dos 40.002 itens da base bem como a simulação de mais de 6 cenários de decisão para diversas situações de inclusão de novos itens em estoque, redução do valor de estoque, desenho de cenários para análise, análise de inclusões individuais de itens ou em quantidades de itens maiores. Foram traçados 25 cenários diferentes com a aplicação da Curva Pareto Ótima com a implementação do processo iterativo do modelo multiobjetivo.

Na simulação da curva Pareto Ótima o tempo de processamento do otimizador em cada cenário continuou inferior a um segundo, e o processamento era um pouco lento devido a limitação de máquina em decorrência do processo de arquivamento e processamento de dados. A cada iteração era necessário armazenar todos os itens estocados e todos não estocados e realizar os cálculos de valores, benefício e quantidade de itens estocados, o que consome tempo de máquina. No modelo de classificação os pesos são encontrados de forma muito rápida a dificuldade maior é a classificação da base de dados nas mais diversas aberturas. De forma geral o desempenho dos modelos de tomadas de decisão multicritério, o modelo linear e o modelo multiobjetivo apresentaram resultados de desempenho muito satisfatórios.

Um resultado importante é a aplicação do método *Cut off point* para seleção dos critérios que já haviam sido utilizados em estudos anteriores, o que corroborou a importância dos mesmo para estudos de peças sobressalentes em empresas mineradoras.

A classificação dos 40.002 da base de dados cedida pela organização é um resultado expressivo, visto que na maioria dos estudos pesquisados na revisão bibliográfica é utilizada amostra significativa da população.

Outra implicação positiva é o desenvolvimento do modelo linear de programação inteira baseado no problema da mochila, que melhora o processo decisório e reduz o tempo de análise. O cenário de redução do valor máximo resolvido pelo otimizador em um tempo inferior a um segundo demandaria um tempo muito mais elevado de análise humana e sem a garantia de obter a resposta ótima.

A possibilidade de construção de diversos cenários com a aplicação no problema da mochila com metodologia multiobjetivo da restrição ϵ , disponibilizando diversos cenários e permitindo ao tomador de decisões traçar estratégias em curto espaço de tempo com base nas respostas ótimas em diversos limites financeiros diferentes. A construção desses cenários manualmente demandaria horas de trabalho sem nenhuma garantia da otimalidade da resposta.

As simulações e os resultados obtidos em cada cenário mostram os diversos benefícios e possibilidades de aplicação do modelo de tomada de decisão desenvolvido. O tempo de processamento em cada cenário do otimizador é inferior a um segundo, o que proporciona respostas rápidas. Na aplicação do desenho da curva Pareto Ótima se gasta um tempo maior em decorrência da grande necessidade de armazenamento de dados de cada iteração.

Finalizando, o objetivo geral de desenvolver um modelo de decisão usando o método AHP foi atingido, bem como sua aplicação a uma base de dados reais, o que não foi encontrado na revisão bibliográfica realizada, conseqüentemente servindo de suporte para a tomada de decisão e mitigação do *trade off*, custo x benefício das peças de reposição. Diante do exposto, conclui-se que os objetivos específicos e o objetivo geral propostos no estudo foram alcançados.

Capítulo 9

Considerações finais

9.1. Contribuição científica e implicações gerenciais

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre materiais MRO e o problema de estocagem em local único, buscando caracterizar o estado da arte e sanar lacunas existentes nos estudos acadêmicos e aplicações práticas.

Este trabalho gerou contribuições científicas, além dos principais resultados apresentados nos capítulos 7 e 8, tais como:

- estudo desenvolvido sobre peças de reposição, que segundo Bachetti e Saccani (2012), Roda *et al* (2014), Rego e Mesquita (2011), é um assunto pouco estudado;
- quantificação da criticidade do item a ser estocado pelo método AHP e VED, que segundo Bachetti e Saccani (2012), decidir qual item estocar depende da criticidade.
- o detalhamento do procedimento sistemático (seção 7.1) para escolha dos melhores critérios e subcritérios baseados na literatura aplicáveis a mineradoras de ferro, Zeng *et al* (2012) destacam que mesmo com vários trabalhos existentes, a falta de procedimentos sistemáticos leva a um foco limitado sobre a escolha dos melhores critérios representantes de criticidade;
- desenvolvimento de um fluxo de modelo de suporte à tomada de decisão (seção 7.1), que pode ser replicada em outros processos produtivos;
- identificação dos critérios mais adequados a serem utilizados em mineração de ferro, visto que segundo Roda *et al* (2014) não existe na literatura um acordo sobre quais os critérios mais adequados a serem utilizados;
- desenvolvimento de um modelo para suporte a decisão de estocagem que pode ser aplicado a redução e descarte de materiais, que segundo Rego (2014) apresentam uma lacuna acadêmica no desenvolvimento e comparação de modelos para essas decisões;
- a construção do modelo multiobjetivo (seção 6.2) para estoque de materiais MRO, que contribui cientificamente para a construção de cenários, Alves *et al* (2014) destacam que por não haver uma resposta ótima simultânea para todas as funções objetivo é necessário possibilitar análises múltiplas.

- estudo e desenvolvimento de um modelo de tomada de decisão para materiais MRO em empresa da indústria de base, visto que, na literatura pesquisada, a maioria dos estudos são desenvolvidos em empresas do terceiro setor.

O trabalho apresenta também implicações gerenciais, que reduz a distância entre teoria e prática com a utilização de uma base de dados real e estudo de caso, como:

- modelo multiobjetivo de baixa complexidade computacional, que facilita a aplicação prática;
- redução da incerteza dos critérios utilizados pelos especialistas na decisão de estocagem de materiais MRO;
- possibilidade de gerenciar de forma quantitativa os benefícios dos materiais estocados e não mais apenas por classificação ABC e XYZ;
- disponibiliza ao gestor uma abertura escalonada entre as peças em relação a criticidade, podendo ser avaliada sobre a visão de três importantes áreas da organização (operação, manutenção e suprimentos);
- ferramenta de análise que relaciona quantidade de item estocado, capital investido e benefício obtido;
- modelo de otimização que informa a melhor combinação de peças a serem mantidas em estoque dentro do limite orçamentário;
- possibilidade de seleção de quais itens retirar de estoque com escalonamento por benefício de cada material;
- construção de múltiplos cenários para análise;
- análise do melhor conjunto de peças em estoque, simulando a inclusão de um ou diversos itens ao mesmo tempo;
- tomada de decisão anterior à estocagem do item de forma consistente.

As contribuições científicas e as implicações gerenciais podem contribuir significativamente para gestores e pesquisadores, no desenvolvimento de formas mais adequadas ao processo decisório e em trabalhos futuros das lacunas ainda existentes na literatura.

9.2. Trabalhos futuros

As peças de reposição, foco do estudo deste trabalho, apresentam características peculiares. O trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre decisão de estocagem de materiais MRO

com armazenamento em local único, buscando caracterizar o estado da arte, identificar lacunas e desenvolver um modelo adequado para empresas de mineração, como segue:

- Desenvolver uma forma robusta de quantificar de forma mais adequada os espaços disponíveis para armazenamento e quanto cada material MRO ocupa e inserir essa restrição nos modelos lineares de otimização.
- Desenvolver um parâmetro que calcule o risco que pode ser mitigado pela operação. Esse risco deve ser retirado de estoque, basicamente é quantificar os processos alternativos em decorrência das falhas das peças e inserir essa restrição ao modelo matemático.
- Subdividir o limite de recurso disponível pela organização para inclusão de materiais em estoque por setor ou área. Essa situação permitiria um equilíbrio mais adequado entre materiais estocados e importância produtiva do setor que deseja estocar o componente.
- Os modelos de decisão desenvolvidos poderiam ser ampliados e trabalhar em conjunto com previsão e programação de compras, onde o lote econômico de compras levaria em consideração o mix ótimo que o armazém pode receber, considerando os custos de movimentação e armazenagem dos itens.
- Estudar outros modelos de mochila compartimentada seja por valor ou importância no processo produtivo.

Por fim as conclusões, análises e recomendações deste trabalho são baseadas em mineração de minério de ferro. Empresas que possuam atuação e similaridade com o estudo de caso podem replicar o modelo. Para desenvolvimento desse modelo em outros processos produtivos, é recomendável uma análise crítica e revisão da metodologia para adequada aplicação e obtenção de resultados satisfatórios.

Referências

ALVES, M. J.; ANTUNES, C. H.; CLÍMACO, J. Interactive MOLP Explorer – A graphical – Based computational tool for teaching and decision support in multi-objective linear programming models. *Computer applications in engineering education*, v. 23, p. 314-326, 2015.

BABAI, M. Z.; LADHARI, T.; LAJILI, I. On the inventory performance of multi-criteria classification methods: empirical investigation. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 1, p. 279-290, 2015.

BACCHETTI, A.; SACCANI, N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Journal Omega*, v. 40, n. 6, p. 722-737, 2012.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BAZARRA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. *Linear Programming and Network Flows*. 4ªth. New Jersey: Wiley, 2010.

BRAGLIA, M.; GRASSI, A.; MONTANARI, R. Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 10, Iss 1, p. 55-56, 2004.

BREGALDA, P. F. *Introdução à programação linear*. Rio de Janeiro: Campus, 1981.

BOCHKOV, A. V.; ZHIGIREV, N. N. AHP modification for decision making under uncertainty. *Proceedings of ISAHP - International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*. Washington, D.C., U.S.A., 2014

BOCHKOV, A. V.; ZHIGIREV, N. N. The Analytic Hierarchy Process modification for decision making under uncertainty. *Reliability: Theory & Applications*, v. 9, n. 2, 2014.

BOŠNJAKOVIĆ, M. Multicriteria inventory model for spare parts. *Technical Gazette*, v. 17, ed. 4, p. 499-504, 2010.

BOTTER, R.; FORTUIN, L. Stocking strategy for service parts-a case study. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 20, n. 6, p. 656-674, 2000.

CHEN, K.; ROSS, S. H. An adaptive stochastic knapsack problem. *European Journal of Operations Research*, v. 239, p. 625-635, 2014.

CONTADOR, J. C. Coordenador. *Gestão de operações. A engenharia de produção a serviço da modernização da empresa*. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

DANTZIG, G. B. On the Significance of Solving Linear Programming Problems with Some Integer Variables. *Econometria*, v. 28, n. 1, p. 30-44, 1960.

- DIAS, M. A. P. *Administração de materiais: princípios, conceitos e gestão*. São Paulo: Atlas, 2006.
- DEWALD, D. M. *Maintenance Storerooms and MRO. Made Simple*. United States of America: Reliabilityweb.com, 2014.
- FILHO, P. J. F. *Introdução à modelagem e Simulação de Sistemas*. Florianópolis: Visual Books, 2001.
- FILHO, N. O.; SILVEIRA, F. F.; SANT ANA, P. S. O processo de tomada de decisão para a seleção de projetos em uma PME do setor de Engenharia. *Revista de Gestão e Projetos – GeP*, v. 5, n.3, 2014.
- FELICE, D. F; FALCONE, D; FORCINA, A; PETRILLO, A; SILVESTRI, A. Inventory management using both quantitative and qualitative criteria in manufacturing system. *19th World Congress The international Federation of Automatic Control*. Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014.
- FERREIRA, A. H. *Proposta de um modelo em programação linear para a solução de problemas de sistemas produtivos job shop com setup dependentes da sequência*. 112f. Tese (Doutorado em Administração) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- GALLON, R. K.; YSNEL, F.; FEUNTEUN, E. Optimization of an “in sut” subtidal rocky-shore sampling strategy for monitoring purposes. *Marine Pollution Bulletin*, v. 74, p. 253-263, 2013.
- GASNIER, D. G. *A Dinâmica dos estoques: guia prático para planejamento, gestão de materiais e logística*. São Paulo: IMAM, 2002.
- GU, J.; ZHANG, G.; LI, K. W. Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *Journal of Air Transport Management*, v. 42, p. 101-109, 2015.
- 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, n. 2, p. 201-215, 2002.
- KUNDID, A.; ERCEGOVAC, R. Credit rationing in financial distress: Croatia SME’s finance approach. *International Journal of Law and Management*, v. 53, Iss. 1, p. 62-64, 2011.
- LÉLIS, J. C. *Gestão de Materiais: Estoque não é o meu negócio*. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.
- LOPES, C. B. *Determinação da política ótima de manutenção em sistemas reparáveis sujeitos a manutenções imperfeitas*. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- MACINNES, R. L.; Pearce, S. L. *Strategic MRO: Roadmap for transforming assets into competitive advantage*. New York: CRC Press, 2003.

- MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. In: *XLI Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional (SBPO)*, p. 1778-1788, 2009.
- MARINS, F. A. S.; PEREIRA, S. M.; BELDERRAIN, M. C. N.; URBINA, L. M. S. *Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios: aplicações na indústria aeroespacial*. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2010.
- MURTHY, D.N.P.; ATRENS, A.; ECCLESTON, J.A. Strategic maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 8, n. 4, p. 287-305, 2002.
- OJHA, A. K.; BISWAL, K.K. Multi-objective geometric programming problem with ϵ -constraint method. *Applied Mathematical Modelling*, v. 38, p. 747-758, 2014.
- OJHA, A. K.; OTA, R. R. Multi-objective geometric programming problem with Karush-Kuhn-Tucker condition using ϵ -constraint method. *RAIRO operations Research*. Res. 48, p.429-453, 2014
- OYATOYE, E. O.; AMOLE, B. B.; ADEBIYI, S. O. (2014). Application of analytical hierarchy process (AHP) model to determine patients perception towards service quality of public hospitals in Nigeria. *Proceedings of ISAHP - International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*. Washington, D.C., U.S.A., 2014.
- PIZZOLATO, N. D. *Técnicas de otimização*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- RANGEL, E. P. *Desenvolvimento de uma análise sistêmica de cenários prospectivos para o setor de pelotas de minério de ferro brasileiro*. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- REGO, J. R. *A lacuna entre a teoria de gestão de estoques e a prática empresarial na reposição de peças em uma concessionária de automóveis*. 125f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- REGO, J. R. *Gestão de estoques de peças de reposição: simulação e análise de modelos com dados empíricos*. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- REGO, J. R.; MESQUITA, M. A. Controle de estoque de peças de reposição: uma revisão da literatura. *Produção*, v. 21, n. 4, p. 645-655, 2011.
- REGO, J. R.; MESQUITA, M. A. Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts. *Int. J. Production Economis*, v. 161, p. 1-16, 2015.
- RODA, I.; MACCHI, M.; FUMAGALLI, L.; VIVEROS, P. A review of multi-criteria classification of spare. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 25, n. 4, p. 528-549, 2014.
- SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. *Método de Análise Hierárquica*. Rio de Janeiro: Makron Books do Brasil e McGraw-Hill do Brasil, 1991.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SHERBROOKE, C.C. *Optimal Inventory Modeling of Systems: multi-echelon techniques*. New York: Springer Science & Business Media, 2006.

SILVA, G. L. C. *Modelo de estoque para peças de reposição sujeitas à demanda intermitente e lead time estocástico*. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SPIVEY, W. A. Linear Programming. *Science*, v. 135, p. 23-27, 1962.

STOLL, J.; KOPF, R.; SCHNEIDER, J.; LANZA, G. Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy. *Production Engineering*, v. 9, n. 2, p. 225-235, 2015.

SURYADI, K. Decision model for “material stock vs non stock” using combination of AHP and Cut off point method. *Proceedings of ISAHP - International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*. Bali, Indonesia, 2003.

SURYADI, K. Empirical experience on combining AHP with NON-AHP decision models in managing cross functional conflicts. *Proceedings of ISAHP - International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*. Viña Del Mar, Chile, 2007.

TRACHT, K.; NIESTEGGE, A.; SCHUH, P. Demand planning on performance measurement systems in closed loop supply chain. *8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, v.12, p.324-329, 2013.

TADEU, H. F. B. *Gestão de Estoques: Fundamentos, modelos matemáticos e melhores práticas aplicadas*. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

TAM, M. C. Y.; TUMMALA V. M. Y. An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system. *Omega*, v. 29, n. 2, p. 171-182, 2001.

TRIMP, M.; SINNEMA, S.; DEKKER, R.; TEUNTER, R. Optimise initial spare parts inventories: an analysis and improvement of an electronic decision tool. *Report Econometric Institute*, Erasmus Universiteit, Rotterdam, 2004.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.

WANG, Z.; GUO, J.; ZHENG, M.; YANG, Y. A new approach for uncertain multiobjective programming problem based on Pe principle. *Journal of Industrial and Management Optimization*, v. 11, n. 1, p. 13-26, 2015.

XU, T.; Qi, D.; Huichuan, Z.; Zhiheng, Z. Stocking decision for spare parts in a system with general demand distribution. *Proceedings of (Meic-14) International Conference On Mechatronics, Electronic, Industrial And Control Engineering (Meic-14)*. Atlantic Press, 2014.

Anexo 01 – Pesquisa de sub-critérios do método cut off point

Avalie cada critério usando a escala de três pontos “não é importante”, “pouco importante” e “muito importante”, sob o ponto de vista da tomada de decisão de quais peças sobressalentes devem ser estocadas.

CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO E PRODUÇÃO

1. Processos alternativos
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
2. Criticidade da função a ser executada por sistema que se torna defeituoso
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
3. Perda de qualidade da produção
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
4. Disponibilidade do equipamento
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
5. Impacto no processo produtivo
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
6. Material de segurança
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
7. Impactos ambientais e de segurança
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante

Avalie cada critério usando a escala de três pontos “não é importante”, “pouco importante” e “muito importante”, sob o ponto de vista da tomada de decisão de quais peças sobressalentes devem ser estocadas.

CRITÉRIOS DE MANUTENÇÃO

1. Confiabilidade do material
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
2. Feito sob medida
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
3. Custo de manutenção
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
4. Prioridade do equipamento
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
5. Peças intercambiáveis
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
6. Consumíveis
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
7. População instalada do mesmo item
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
8. Possibilidade de manutenção interna
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante

Avalie cada critério usando a escala de três pontos “não é importante”, “pouco importante” e “muito importante”, sob o ponto de vista da tomada de decisão de quais peças sobressalentes devem ser estocadas.

CRITÉRIOS DE SUPRIMENTOS (compras, almoxarifado, logística)

1. Número de fornecedores potenciais
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
2. Preço
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
3. *Lead time*
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
4. Espaço para armazenagem
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante
5. Dificuldade de aquisição
() Não é importante () Pouco importante () Muito importante